



SOLDAGEM
&
TÉCNICAS CONEXAS:
PROCESSOS

Ivan Guerra Machado

Prezado Leitor;
Estou disponibilizando gratuitamente esta cópia
em formato eletrônico do meu livro
"Soldagem & Técnicas Conexas: Processos",
para possibilitar que qualquer pessoa
(mesmo aquela sem recursos financeiros)
tenha acesso às informações que o mesmo contém.
Peço-lhe que ajude-me a impedir que
esta cópia seja comercializada
(em qualquer formato).

Outrossim, gostaria de informá-lo que no início de 2008
pretendo lançar outro livro, o qual versará sobre
processos e metalurgia da soldagem,
bem como projeto de juntas soldadas.

Ivan G. Machado
E-mail: welder@ufrgs.br

Porto Alegre, Inverno de 2007.

**SOLDAGEM
&
TÉCNICAS CONEXAS:
PROCESSOS**

CÓPIA AUTORIZADA
DISTRIBUIÇÃO GRUPO
PROIBIDA A COMERCIALIZAÇÃO EM OUTROS

**SOLDAGEM
&
TÉCNICAS CONEXAS:
PROCESSOS**

Ivan Guerra Machado

Engenheiro Metalúrgico; Ph.D.; SenMWeldI

Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas (LS&TC)
Centro de Tecnologia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

CÓPIA AUTORIZADA
DISTRIBUIÇÃO GRATUITA
PROIBIDA A COMERCIALIZAÇÃO EM QUALQUER FORMA

SOLDAGEM & TÉCNICAS CONEXAS: PROCESSOS

Copyright © 1996 de Ivan Guerra Machado. Todos os direitos reservados.
É proibida a reprodução parcial ou total desse livro, por quaisquer meios, sem a expressa autorização do autor.

Impresso no Brasil *Printed in Brazil*

M149s	Machado, Ivan Guerra Soldagem e técnicas conexas : processos / Ivan Guerra Machado. - Porto Alegre : editado pelo autor, 1996. 477p.: il.
	1. Soldagem. I título
	CDU 621.791

Catálogo na publicação gentilmente realizada por **Maria da Graça Lima Corrêa** (CRB 10/704)

CÓPIA AUTORIZADA PELO AUTOR.
DISTRIBUIÇÃO GRATUITA.
PROIBIDA A COMERCIALIZAÇÃO EM QUALQUER FORMATO.

*Para a Lina,
com muito amor.*

ÍNDICE ANALÍTICO

PREFÁCIO	ix
CAPÍTULO 01: INTRODUÇÃO À UNIÃO DOS MATERIAIS	1
CAPÍTULO 02: INTRODUÇÃO À FÍSICA DA SOLDAGEM	23
CAPÍTULO 03: FONTES DE POTÊNCIA PARA A SOLDAGEM AO ARCO ELÉTRICO	43
CAPÍTULO 04: SOLDAGEM A ARCO COM ELETRODO REVESTIDO	69
CAPÍTULO 05: SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO	135
CAPÍTULO 06: SOLDAGEM A ARCO COM ELETRODO TUBULAR	157
CAPÍTULO 07: SOLDAGEM A ARCO COM PROTEÇÃO POR GÁS E ELETRODO NÃO CONSUMÍVEL ("TIG")	171
CAPÍTULO 08: SOLDAGEM A ARCO COM PROTEÇÃO POR GÁS E ELETRODO CONSUMÍVEL ("MIG/MAG")	193
CAPÍTULO 09: SOLDAGEM A ARCO PLASMA	219
CAPÍTULO 10: SOLDAGEM POR ELETROESCÓRIA E ELETROGÁS	229
CAPÍTULO 11: SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA	243
CAPÍTULO 12: SOLDAGEM POR CENTELHAMENTO	269
CAPÍTULO 13: SOLDAGEM POR FRICÇÃO	279
CAPÍTULO 14: SOLDAGEM POR LASER	287
CAPÍTULO 15: SOLDAGEM POR FEIXE DE ELÉTRONS	299
CAPÍTULO 16: SOLDAGEM POR OXIGÁS	313

CAPÍTULO 17: BRASAGEM	329
CAPÍTULO 18: PULVERIZAÇÃO TÉRMICA	361
CAPÍTULO 19: PROCESSOS DE CORTE TÉRMICO	371
CAPÍTULO 20: A ECONOMIA DA SOLDAGEM	410
ANEXO 01: CONTROLE E ACONDICIONAMENTO DOS GASES	421
ANEXO 02: ASPECTOS AMBIENTAIS E DE SEGURANÇA	427
ANEXO 03: INTRODUÇÃO À UNIÃO DOS PLÁSTICOS E CERÂMICOS	435
REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA	441
QUESTÕES	447
ÍNDICE REMISSIVO	457
ORGANIZAÇÕES ENVOLVIDAS COM SOLDAGEM & TÉCNICAS CONEXAS	471
CONVERSÃO DE UNIDADES USUAIS	475

CÓPIA AUTORIZADA PELO AUTOR
DISTRIBUIÇÃO GRATUITA
PROIBIDA A COMERCIALIZAÇÃO EM QUALQUER FORMATO.

PREFÁCIO

Muitas atividades humanas apresentam riscos, não somente para quem as pratica mas, também, às outras formas de vida sobre o nosso planeta. A Soldagem (e Técnicas Conexas) não é exceção, sendo obrigação de todos aqueles ligados à esse processo de fabricação tomar as máximas precauções, para minimizar os efeitos sobre o meio ambiente provocados pelo mesmo. Devemos reconhecer que a nossa existência certamente seria muito diferente, caso ignorássemos como unir os materiais. Entretanto, por razões complexas estamos assim vivendo - nem todos do melhor modo - sobre esta (finita) Nave, à qual denominamos Terra. Porém - é sempre bom lembrar - esta viagem, que já ocorre há milhões de anos, somente se prolongará por mais um tanto, se agirmos como parte da Natureza, e não como bárbaros numa eventual incursão de pilhagem, pretensos “herdeiros naturais do paraíso...”. Recordemos que a sobrevivência de uma espécie depende de fatores muito sensíveis e de um frágil equilíbrio entre as forças cósmicas, sendo unânimemente reconhecido pelos especialistas serem maiores do que as nossas as chances de um vírus herdar a Terra...

Para os recém chegados à Soldagem (e Técnicas Conexas), é importante que percebam dois pontos importantes. O primeiro, é de que aqui se está tratando com um misto de “tecnologia/ciência/arte”, cujos valores muitas vezes são intangíveis e as origens remontam a tempos imemoriais, quando o fogo e os raios possuíam significados místicos, os quais seguramente permanecem nas profundezas do arquétipo humano. Depois, há a questão da personalidade “sui generis” da maioria daqueles que trabalham com este processo de fabricação. Por um lado e em geral, essas pessoas são teimosas, geniosas, muitas vezes até difíceis de se tratar. Em compensação, podem tornar-se leais amigas, são invariavelmente orgulhosas e, muito importante, amam o que fazem. Nestes últimos 20 anos “respirei” integralmente Soldagem, como engenheiro de fábrica, e depois consultor e professor universitário, tendo tido a honra de conviver com esses seres humanos de rara dignidade. Aprendi a admirá-los, a respeitá-los e presto-lhes aqui uma modesta, mas sincera homenagem.

Em especial, quero dizer um “muito obrigado” ao Luiz Henrique Machado Zaniratti, Técnico em Soldagem do Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas (**LS&TC**), por ter participado comigo - desde muito jovem - de parte dessa (longa) jornada, e ao promissor engenheiro metalúrgico Márcio Levi Kramer de Macedo, M.Sc., o mais novo membro da equipe desse Laboratório, de quem muito espero. Também gostaria de agradecer aos estagiários Luciana, Luciano e Juliano (demorei tanto para editar este livro, que os dois últimos já são engenheiros...), os quais desenharam grande parte das ilustrações desse livro. Preciso ressaltar, ainda, que estarei eternamente em débito com todos os meus ex- e atuais alunos, tanto da graduação, quanto da pós-graduação (Mestrado e Doutorado), por terem concedido-me o privilégio de ensiná-los e/ou orientá-los. É unicamente deles a fonte da energia, a qual me impede de não deixar findar esta aventura de desenvolver ciência e tecnologia num país com as características do Brasil.

Tentei formular este livro para que fosse útil tanto aos técnicos de grau médio, quanto aos engenheiros e pós-graduados que lidam com soldagem. Portanto, tive que enfrentar uma solução de compromisso para satisfazer essa ambiciosa pretensão, entre não ser superficial, nem transformar todo o conhecimento em complexas equações (cujos resultados, quando erradamente manipulados, podem ser antípodas da realidade). Entretanto, procurei sempre ser rigoroso na terminologia empregada e, para os assuntos que entendi estarem suficientemente maduros, busquei um tratamento formal. Sei que essa metodologia pode desagradar àqueles que somente acreditam na “prática” da soldagem. Para estes, minha resposta é que aqui se está tratando com fenômenos muito complexos, mas cujo resultado deve ser uma obra, a qual de alguma forma servirá ao Homem. Em Soldagem, tanto o exclusivamente “teórico”, quanto o completamente “prático” serão ambos perpétuos escravos da Tecnologia desenvolvida por outros. Infelizmente, o “prático” não percebe a importância que a teoria possui para a compreensão daquilo que afinal é a soldagem, ou o “modelamento”, ou a “simulação” de eventos em geral, possibilitando a antecipação e a evolução. O “teórico”, por sua vez, é incapaz de entender que a realidade, em

todos seus detalhes, é muito mais complexa do que aquela "virtual" definida pelos gigabites do seu computador, e que até mesmo esse equipamento chegar ao seu imaculadamente limpo escritório, muito trabalho foi realizado; grande esforço despendido e rios de suor foram vertidos por aqueles que colocam as riquezas da Terra ao dispor da Humanidade, pois as mesmas não aparecem com o simples apertar de teclas...

Este livro trata com relativa profundidade dos principais processos de soldagem ao arco elétrico e de outros, como aqueles de alta densidade de potência, tais como LASER e Feixe de Elétrons, os quais são antecedidos por detalhadas conceituações relativas à união dos materiais, além de examinar atentamente a Economia da Soldagem. São incluídas, também, as "técnicas conexas" mais importantes (entre outras, o Corte Térmico e a Brasagem), com extensas Referências e Bibliografia e Questões versando sobre os assuntos analisados.

Caso este volume seja adotado como livro texto num Curso de Engenharia, ou Curso Técnico sobre Processos de Soldagem (e Técnicas Conexas), sugiro que a ênfase resida nas aplicações dos processos; nos conceitos básicos das fontes de potência e na avaliação dos custos da soldagem, em conjunto com o exercício real desta tecnologia. Entendo ser didático que o futuro engenheiro ou técnico perceba desde cedo a importância de comparar custos e sinta, também, algumas das dificuldades enfrentadas por um soldador... Essa é a metodologia que adoto nas aulas no **LS&TC** para os Cursos das Engenharias Mecânica e Metalurgia da Escola de Engenharia. Nos Cursos de Pós-Graduação, minha opinião é de que os conceitos fundamentais devem ser detalhada e cuidadosamente analisados (supondo que o aluno possua sólida formação, como é de se esperar), e comparados com a aplicação desta tecnologia.

Gostaria de mencionar, ainda, que estou escrevendo uma série cobrindo os principais aspectos da Tecnologia da Soldagem. A mesma iniciou com o livro editado em 1994 pela Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem (FBTS), denominado "Sistemas de Especificação dos Consumíveis para Soldagem e Brasagem", e o presente será seguido por mais dois títulos, pelo menos, nos quais tratarei do "Dimensionamento da Junta Soldada" e da "Metalurgia da Soldagem". Acredito, assim, que não será tão penoso ao estudante, ou ao profissional seguir os (muitas vezes intrincados) caminhos desta "tecnologia/ciência/arte".

Não posso deixar de dizer, também, que além do prazer de escrever este livro, o mesmo oportunizou-me uma nova e interessantíssima experiência, a qual foi desde a diagramação até a sua editoração e arte final, pois entreguei os "filmes" prontos para a gráfica. Dessa forma, todos os erros cometidos são meus e, para que este livro seja aperfeiçoado, receberei de bom grado críticas e sugestões dos leitores, as quais podem ser enviadas em minha atenção para o seguinte endereço:

UFRGS/Centro de Tecnologia/LS&TC

Av. Bento Gonçalves, 9500
91509-900 Porto Alegre, RS.
Brasil

Tel: (051) 316-6135/316-6149
FAX: (051) 336-5932/316-6534

E-MAIL: WELDER@VORTEX.UFRGS.BR

Porto Alegre, Outono de 1996.

**C
A
P
Í
T
U
L
O

01**

INTRODUÇÃO À UNIÃO DOS MATERIAIS

O QUE É “UNIR” MATERIAIS ?	2
Cronologia da União dos Materiais	2
Superfícies em Perfeito Contato se Unem	5
Métodos de União dos Materiais	6
DESCRIÇÃO SUMÁRIA DOS PRINCIPAIS PROCESSOS	10
Soldagem em Fase Sólida	10
Soldagem Termoquímica	11
Soldagem por Resistência Elétrica	12
Soldagem por Energia Radiante	13
Soldagem por Arco Elétrico	14
Brasagem	15
Solda Branda	16
Processos Térmicos de Corte	16
Pulverização Térmica	17
CONCEITOS GERAIS	18
Juntas	18
Geometria, Diluição e Zonas de Uma Junta Soldada	18
Posições e Outras Condições de Soldagem	21

O QUE É “UNIR” MATERIAIS ?

Diversos e complexos fenômenos estão envolvidos na íntima União dos Materiais e, para compreendê-los, a análise deve ser iniciada pelos meios que permitem realizá-la. Entretanto, há competição entre os Processos de união disponíveis pois, para uma dada aplicação, é possível que vários possam produzir resultados tecnologicamente similares. Nesse caso, portanto, a escolha deverá recair sobre aquele que for mais econômico.

São estes os assuntos aqui tratados. Em outros volumes dessa série, serão estudados os aspectos Metalúrgicos; Estruturais e de Qualidade dessa Tecnologia.

Entre todos os processos de fabricação existentes, este situa-se numa posição privilegiada, pois através da união de materiais produzidos em grandes números e formas padronizadas, é possível se obter inúmeras combinações, das quais resultam desde pequenas peças, como armações de óculos, até estruturas gigantescas, exemplificadas pelas plataformas submarinas e naves espaciais. Além disso, esse também é o método que permite utilizar um material de muito menor custo como base e, somente nos locais necessários sobre o mesmo, realizar revestimento protetor próprio para enfrentar corrosão; atrito; calor, ou outro tipo de desgaste.

Dessa forma, a opção por esta tecnologia propicia, em geral, enormes reduções nos consumos de energia; tempo e material, provavelmente os mais escassos bens sobre a Terra.

Existem três grandes grupos de processos dedicados à união dos materiais, os quais são a Soldagem, a Brasagem e a Solda Branda, além dos adesivos. Como técnicas muito próximas, há o Corte Térmico e a Pulverização Térmica, esta última especializada em produzir relativamente finos revestimentos protetores com características próprias.

Cada um desses três grupos acima mencionados possui distintas aplicações e particularidades, ou seja:

❑ Soldagem

Este é, sem dúvida, o grupo que mais se destaca devido, principalmente, ao seu largo emprego e grande volume de atividades que envolve. Nesse caso, a união de dois materiais é realizada, ou através da fusão dos mesmos em íntimo contato; ou pela fusão de ambos e adição de outro material fundido; ou, ainda, simplesmente, por contato destes materiais, nas fases sólida ou

semi-sólida. Em geral, a soldagem provoca maior distorção no material base e normalmente não é utilizada sobre cerâmicos. A grande área de atuação da mesma são os metais e suas ligas, devendo-se esse fato à sua grande versatilidade e economia, além das excelentes propriedades mecânicas que as uniões assim obtidas apresentam.

❑ Brasagem

O conceito aqui empregado para realizar a união dos materiais, é completamente distinto do anterior, sendo sempre utilizado um material adicional fundido, que une os materiais base, os quais permanecem na fase sólida. Nesse caso, o material adicionado deve possuir temperatura de fusão (linha do “liquidus”) acima de 450 °C, mas abaixo daquela de solidificação (linha do “solidus”) do material base. Através da Brasagem, é possível unir praticamente todos os materiais existentes, provocando pouca distorção. Entretanto, a mesma não é geralmente empregada em grandes peças ou estruturas, devido a pequena tolerância que demonstra com relação à limpeza superficial dos materiais envolvidos; baixa versatilidade operacional e, conseqüentemente, dificuldade de se obter uniões com as necessárias propriedades mecânicas/metalúrgicas, apesar disso ser possível sob condições controladas.

❑ Solda Branda

A união é realizada pela adição de um material fundido, sendo que os materiais base também permanecem na fase sólida. Entretanto, a grande diferença com relação à Brasagem, é que a linha do liquidus do material de adição deve se situar abaixo de 450 °C e não exceder aquela do solidus do material base. Por outro lado, a Solda Branda encontra emprego principalmente na união de circuitos eletro/eletrônicos, nos quais altas propriedades mecânicas não são, em geral, de fundamental importância.

CRONOLOGIA DA UNIÃO DOS MATERIAIS

Apesar de possuir aparência moderna, existem fortíssimos indícios de que a união de materiais já era praticada há cerca de quatro mil e oitocentos anos, nos vales dos rios Nilo e Tigre-Eufrates, principalmente por brasagem e fase sólida. Da Idade do Bronze, pode-se apreciar no Museu Nacional de Dublin (Irlanda) pequenas caixas circulares de

ouro, cujas juntas foram realizadas por pressão. No Museu Britânico, em Londres, estão expostas diversas peças, principalmente de ouro, unidas por brasagem, além de ferramentas de ferro com juntas provavelmente forjadas, produzidas por egípcios e povos do Mediterrâneo. Uma estrutura que merece particular atenção, realizada há cerca de 1700 anos, é o Pilar de Ferro de Delhi (Índia), com dimensões aproximadas de 8 m de altura; 400 mm de diâmetro na base e 300 mm no topo, e pesando em torno de 5500 kg, o qual foi construído com diversas partes soldadas.

Entretanto, a união dos materiais, tal como hoje é concebida, somente se desenvolveu no final do século XIX e realmente ganhou impulso nos últimos 60 anos - na escala histórica esta tecnologia é, portanto, muito recente. Os principais marcos dessa arte/técnica são:

- Em 1800: Alessandro Volta (Itália) descobriu os princípios da bateria.
- Em 1801: Humphry Davy (Inglaterra) descobriu o gás acetileno. Além disso, usando bateria, produziu um arco elétrico entre dois eletrodos de carvão, ao qual denominou “chama voltaica”.
- Em 1837: Desbassyns De Richemont (França) descobriu a chama oxihídrica.
- Aproximadamente na metade do século XIX foi inventado o gerador elétrico.
- Em 1881: Auguste De Meritens (França) usou um arco elétrico para unir chapas de chumbo para bateria, no Laboratório Cabot.
- Em 1885: Elihu Thompson (Inglaterra) realizou soldas por resistência elétrica.
- Em 1885: Nikolai N. Bernardos e Stanislaus Olszewski (Rússia), trabalhando no Laboratório Cabot com Auguste de Meritens, obtiveram Patentes britânica, e americana em 1887, as quais se referem ao primeiro porta-eletrodos conhecido (para eletrodo de carvão).
- Em 1890: Charles L. Coffin (E.U.A.) obteve patente americana para um processo a arco elétrico com eletrodo de metal. Simultaneamente, N. G. Slavianoff (russo) obteve patente, também americana, para um processo similar, mas com a finalidade de fundir o metal num molde.
- Em 1892: H. Moissan (França) fabricou carbureto de cálcio num forno elétrico.
- Em 1895: H. Le Chatelier (França) realizou o primeiro estudo científico da chama oxiacetilênica, descortinando suas possíveis aplicações.
- Em 1898: Carl Von Linde (Alemanha) desenvolveu um método para a fabricação industrial do oxigênio.
- Em 1900: A.P. Strohmenger (Inglaterra) introduziu um arame (“alma” do eletrodo) revestido com uma fina camada de argila, para melhor estabilização do arco elétrico;
- Em 1901: E. Fouche e Ch. Picard (França) desenvolveram o primeiro maçarico oxiacetilênico para uso industrial.
- Em 1903: Hans Goldschmidt (Alemanha) inventou a soldagem por Aluminotermia.
- Em 1904: Ch. Picard (França) desenvolveu um maçarico para oxicorte.
- Em 1910: Oscar Kjellberg (Suécia) obteve patente para eletrodos revestidos (desenvolvidos em 1907), os quais são produzidos através de repetida imersão e secagem da “alma” num denso banho de minerais.
- Período da 1ª Guerra Mundial: A soldagem sofreu grande impulso. O primeiro navio completamente soldado é fabricado na Inglaterra (HMS Fulagar). A soldagem ao arco elétrico com eletrodo revestido estava estabelecida, bem como com oxigás e oxicorte.
- Em 1919: C.J. Holslag (E.U.A.) desenvolveu a soldagem com corrente alternada.
- Em 1920: P.O. Nobel (E.U.A.) desenvolveu a soldagem automática.
- Em 1924: Irwing Langmuir (E.U.A.), após pesquisar o gás hidrogênio, concluiu que é possível o uso da solda com hidrogênio atômico. Os eletrodos (não-consumíveis) eram inicialmente de carvão, mas foram posteriormente trocados para tungstênio. J. Bethenod (França) propôs o emprego de corrente de alta frequência para estabilizar o arco.
- Em (torno de) 1925: Foi desenvolvida a soldagem por Centelhamento (E.U.A.).
- Em 1926: Henry M. Hobart e Philip K. Devers (E.U.A.) utilizaram os gases hélio e argônio, respectivamente, para proteger o arco e a poça de fusão formados por eletrodo não-consumível (patente concedida em 1930). Também foram apresentados os princípios da alimentação contínua de um arame (eletrodo consumível), formando um arco sob proteção gasosa. Os precursores dos processos TIG e MIG foram considerados antieconômicos na época.
- Em 1927: C.B. Langstroth e G.G. Wunder (E.U.A.) desenvolveram o processo de extrusão do revestimento na alma, reduzindo substancialmente o custo da fabricação dos eletrodos revestidos.
- Em 1930: B.S. Robiniff et al (E.U.A.) patentearam o processo por Arco Submerso, o qual somente seria realmente popularizado em torno de

1935. John D. Creeca e S.S. Scott (E.U.A.) desenvolveram a solda por prisioneiro (patente concedida em 1936).

- Em 1937: Desenvolvimento do eletrodo com revestimento básico.

- Período da IIª Guerra Mundial (1939 a 1945): as técnicas de união dos materiais sofreram uma muito grande evolução.

- Em 1940: Robert K. Hopkins (E.U.A.) desenvolveu e patenteou o processo Eletroescória, o qual somente será realmente utilizado após as contribuições realizadas pelos pesquisadores do Instituto de Soldagem Elétrica Paton (Ucrânia), quando de sua apresentação na Feira Mundial de Bruselas em 1958.

- Em 1941: Russel Meredith e V. H. Pauleka (E.U.A.) desenvolveram a solda TIG (com patente concedida em 1942), sendo o processo inicialmente denominado “Heliarc”, pois utilizava o gás hélio para proteção. As primeiras aplicações foram somente sobre magnésio e suas ligas.

- Em 1948: A. Muller et al (E.U.A.) desenvolveram no Battelle Memorial Institute a solda MIG, utilizando hélio como gás de proteção, com patente concedida em 1950 para a Air Reduction Co.. As aplicações iniciais foram sobre alumínio e suas ligas.

- Em 1950: Harry E. Kennedy (E.U.A.) patenteou a fonte de potência para soldagem com curva característica tensão constante.

- Em 1951: realizaram-se as primeiras adições de oxigênio nos gases inertes para soldagem (MIG) MAG, permitindo a união de aços.

- Em 1953: K.V. Lyubavskii e N.M. Novoshilov (ex-U.R.S.S.) desenvolveram a soldagem MAG empregando somente gás oxidante, ou seja, arame nu continuamente alimentado e proteção com gás CO₂.

- Em 1954: Arthur A. Bernard (E.U.A.) desenvolveu o processo Eletrodo Tubular protegido por gás (“Dualshield”), patenteado em 1957.

- Em 1957: Robert M. Gage (E.U.A.) desenvolveu e patenteou o processo de soldagem por Plasma. J.A. Stohr tornou público o processo de soldagem por Feixe de Elétrons, o qual teria sido desenvolvido alguns anos antes na França e Alemanha. Em torno dessa época foi desenvolvida a solda por Fricção. A soldagem MIG/MAG por curto-circuito foi desenvolvida simultaneamente nos E.U.A., Inglaterra e (ex-) U.R.S.S..

- Em 1959: George G. Landis e D.M. Patton (E.U.A.) desenvolveram o processo Eletrodo Tubular auto-protégido (“Innershield”).

- Em (torno de) 1961: através do já então co-

nhecido uso de oxigênio em pequena proporção nos gases inertes (argônio ou hélio), popularizou-se o modo de transferência por aerossol (“spray”) na soldagem MIG/MAG dos aços.

- Em 1961: Wolfgang Krieweth e Klaus Dohm (Bélgica) desenvolveram o processo Eletrogás, com patente concedida em 1962 para a Arcos da Bélgica. Théodore H. Maiman (E.U.A.) desenvolveu o primeiro equipamento LASER.

- Em (torno de) 1962: foram desenvolvidos os processos de difusão e explosão.

- Em (torno de) 1965: foi desenvolvido na Inglaterra (no hoje The Welding Institute) a soldagem por corrente pulsada.

- Em (torno de) 1966: foi desenvolvido o processo de soldagem LASER.

- Em (torno de) 1970: iniciou-se o uso de circuitos integrados e componentes do estado sólido nas fontes de potência para soldagem.

- Em (torno de) 1975: tornaram-se comercialmente disponíveis fontes de potência para soldagem com corrente contínua, controladas analógicamente e baseadas em transistores de baixa potência.

- Em (torno de) 1980: tornaram-se disponíveis fontes com transistores de potência, as quais utilizam tecnologia inversora. Passou a ser possível controlar por (micro)computadores os parâmetros de soldagem e as demais operações. Desenvolveu-se as fontes sinérgicas. Expandiu-se o uso de robôs para soldagem.

Note-se, ainda, que a própria definição do que é uma solda tem sofrido alterações no tempo. Isso é devido, entre outros fatores, ao surgimento de novos materiais e desenvolvimentos científicos e tecnológicos em diversas áreas do conhecimento.

Por exemplo, o “Welding Handbook”, produzido por uma das mais importantes organizações de soldagem do mundo - a American Welding Society (AWS) - em 1958 definia:

“Solda: uma coalescência localizada de metal, onde coalescência é produzida pelo aquecimento à temperaturas convenientes, com ou sem a aplicação de pressão e com ou sem o uso do metal de adição. O metal de adição, ou possui ponto de fusão aproximadamente igual aos metais base, ou possui ponto de fusão abaixo daquele dos metais mas acima de 800 °F”.

Em 1987 (8ª edição do Welding Handbook), porém, essa definição era alterada para:

“Solda: uma coalescência localizada de metais ou não-metais, produzida ou pelo aquecimento dos materiais até a temperatura de soldagem, com ou

sem a aplicação de pressão, ou pela aplicação de pressão somente, com ou sem o uso de metal de adição”.

Aqui “coalescência” deve ser entendida como “o crescimento conjunto, ou crescer em um corpo”, dos materiais soldados.

Como pode ser observado, as definições acima possuem pelo menos duas importantes diferenças. A primeira refere-se somente à coalescência de “metal” e estipula condições de ponto de fusão para o metal de adição. A mais recente, entretanto, menciona “metais ou não-metais” (portanto, materiais em geral) e não faz referência às propriedades do metal de adição.

Dessa forma, é importante entender que a união de materiais, como outras tecnologias, é dinâmica e depende muito de fenômenos correlatos, tais como calor; magnetismo; eletricidade; luz; som, além de desenvolvimentos nas áreas de materiais; física; mecânica; química; eletro/eletrônica e outras.

SUPERFÍCIES EM PERFEITO CONTATO SE UNEM

Tratada a nível atômico, a união entre dois materiais pode ser realizada, baseada simplesmente na atração entre os átomos dos corpos distintos, fenômeno que ocorre dependendo do espaçamento interatômico. Dessa forma, os átomos se arranjam de maneira regular, resultando em diversas estruturas cristalinas.

Portanto, uma solda seria “espontaneamente” realizada, se duas superfícies tivessem seus átomos convenientemente próximos, de forma que resultasse uma força de atração entre os mesmos. Praticamente, entretanto, ainda não foi possível realizar tal tipo de união, pois restam dois principais problemas para serem resolvidos, ou seja:

- Preparação de superfícies perfeitamente planas a nível atômico e/ou;
- Inexistência de camadas oxidadas e gás adsorvido sobre as superfícies.

Se duas peças de metal perfeitamente limpas forem postas em contato no vácuo absoluto, as mesmas terão para separá-las somente os contornos dos grãos. A área de contato dependerá, então, da pressão aplicada sobre as peças e, se essa for suficientemente grande, a rugosidade superficial se deformará plasticamente, até que exista íntimo contato, formando uma solda. Entretanto, existin-

do atmosfera, e particularmente na Terra, estarão presentes sobre as superfícies, no mínimo, duas camadas (num total de 100 a 200 Å de espessura) compostas por um filme de óxidos e gás adsorvido, como mostrado na **Fig. 1.1**. Aplicando pressão suficientemente alta, é possível obter áreas soldadas, mas com regiões de óxidos permanecendo na interface, prejudicando a qualidade da união.

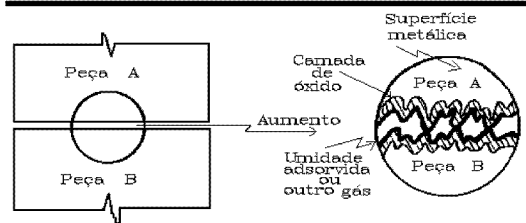


Figura 1.1 - Seção Transversal Esquemática de duas Superfícies em Contato.

Desta forma, os processos de união que serão analisados visam contornar os problemas acima citados. Sob o ponto de vista metalúrgico, existem sete métodos básicos para dissipar filmes superficiais não-metálicos, ou seja:

- Fragmentação e dispersão mecânica;
- Dissolução e difusão no estado sólido da interface da solda para o metal base;
- Dissipação por volatilização;
- Fusão, seguida de extrusão mecânica na fase líquida (do não-metal);
- Escorificação, seguida de separação por gravidade da escória resultante;
- Escorificação de todo o material no estado líquido;
- Dissolução e redistribuição em um metal no estado líquido.

Como consequência, todo o processo de união deve preencher, no mínimo, os seguintes requisitos:

- Fornecer energia para realizar a união (por fusão, pressão, difusão, etc.);
- Possuir mecanismos para remover contaminação das superfícies a serem unidas;
- Prevenir a contaminação atmosférica, ou seus efeitos;
- Permitir que os mecanismos e fenômenos envolvidos sejam controlados.

Nos processos em que a soldagem é realizada por fusão, há a formação do que se denomina “poça (de fusão)”, a qual ocorre a cada deslocamento da

fonte de energia e possui como fronteira a isoterma dada pela temperatura de solidificação do metal envolvido. Nesse caso, a energia (nominal - vide Capítulo 2) disponível é principalmente devida aos parâmetros de soldagem empregados, ou seja, corrente; tensão e velocidade e é dada pela seguinte importante equação:

$$E_N = \frac{U \times I}{V} \quad (J/mm) \quad [1.1]$$

onde:

U = Tensão de soldagem (V);

I = Corrente de soldagem (A);

V = Velocidade de soldagem (mm/s).

É possível, entretanto, realizar a solda sem fusão dos materiais envolvidos, como será visto, sendo que nesse caso somente existirá uma interface na fase sólida durante toda operação.

MÉTODOS DE UNIÃO DOS MATERIAIS

Os processos de união visam atender os requisitos já descritos, com maior ou menor eficiência, sendo que a origem da energia utilizada define-os parcialmente.

Há necessidade, portanto, que o controle da atmosfera seja correlacionado com o processo, conforme ilustrado na Fig. 1.2, observando-se sete

áreas na mesma, cujos números indicam: (1) Fase sólida; (2) Termoquímica; (3) Resistência elétrica; (4) Arco não protegido; (5) Arco protegido por fluxo; (6) Arco protegido por gás; (7) Energia radiante. As áreas hachuradas são aquelas onde um processo de união não pode existir, tal como plasma no vácuo, por exemplo, pois o mesmo é um gás ionizado.

Por outro lado, a Fig. 1.3 apresenta o interrelacionamento entre vários processos de soldagem e técnicas conexas.

Outrossim, a seguir estão listados os quase 100 processos reconhecidos pela AWS, incluindo corte térmico e pulverização térmica. Adicionalmente é mencionada a terminologia adotada nos E.U.A., pois no Brasil ainda não existe total consenso sobre o assunto e provavelmente seria fútil qualquer tentativa de imposição da mesma.

1. Soldagem a Arco (Elétrico) (“Arc Welding: AW”):

1.1 Soldagem com Hidrogênio Atômico (“Atomic Hydrogen Welding: AHW”);

1.2 Soldagem a Arco com Eletrodo Nu (“Bare Metal Arc Welding: BMAW”);

1.3 Soldagem a Arco com Eletrodo de Carbono (“Carbon Arc Welding: CAW”):

1.3.1 Gás (“Gas: CAW-G”);

1.3.2 Revestido (“Shielded: CAW-S”);

1.3.3 Duplo (“Twin: CAW-T”).

Fonte de energia		Método de proteção					
		Vácuo	Gás inerte	Gás	Fluxo	Sem proteção	Exclusão mecânica
Sem aquecimento ou aquecimento por condução		Pressão a frio	Ligação por termo compressão				Pressão a quente ou a frio
Mecânica		Explosiva		1		Explosiva	Fricção ultra-som
Termoquímicas	Flamas plasmáticas		Plasma	Hidrogênio atômico	Gas	Forja	Pressão a topo
	Reações exotérmicas			2		Atumino-térmica	
Resistência elétrica	Indução			3		Indução por alta frequência (A.F)	Indução a topo
	Direta				4	Eletroescória	Centelha-mento Resistência A.F. para topo
Arco elétrico	Eletrodo consumível		Arco elétrico gás inerte (MIG)	Arco elétrico gás ativo (CO ₂) eletrodo tubular (fluxo)	Eletrodo revestido arco submerso	Eletrodo nu prisãoeiro descarga percussão	
	não consumível		Arco elétrico gás inerte (TIG)	6	5	Arco elétrico carvão	4
Energia radiante	Eletro-magnética		7			Laser	
	Partícula	Feixe de elétrons					

Figura 1.2 - Classificação dos Processos de Soldagem, Considerando a Origem da Energia e os Métodos de Proteção.

1.4 Soldagem por Eletrogás (“Electrogas Welding: EGW”);

1.5 Soldagem a Arco com Eletrodo Tubular (“Flux Cored Arc Welding: FACW”);

1.6 Soldagem a Arco com Proteção por Gás e Eletrodo Consumível (“Gas Metal Arc Welding: GMAW”):

1.6.1 Arco Pulsado (“Pulsed Arc: GMAW-P”);

1.6.2 Curto Circuito (“Short Circuiting Arc: GMAW-S”);

1.6.3 Proteção por Gás Inerte. Nota: O termo mais utilizado no Brasil é, provavelmente, MIG (“Metal Inert Gas”);

1.6.4 Proteção por Gás Ativo (oxidante). Nota: O termo mais utilizado no Brasil é, provavelmente, MAG (“Metal Active Gas”).

1.7 Soldagem a Arco com Proteção por Gás e Eletrodo não Consumível (“Gas Tungsten Arc Welding-GTAW”). Nota: O termo mais utilizado no Brasil é, provavelmente, TIG (“Tungsten Inert Gas”):

1.7.1 Arco pulsado (Pulsed Arc: GTAW-P).

1.8 Soldagem a Arco Plasma (“Plasma Arc Welding: PAW”);

1.9 Soldagem a Arco com Eletrodo Revestido (“Shielded Metal Arc Welding: SMAW”);

1.10 Soldagem a Arco por Prisioneiro (“Stud Arc Welding: SW”);

1.11 Soldagem por Arco Submerso (“Submerged Arc Welding: SAW”):

1.11.1 Em Série (“Series: SAW-S”).

2. Soldagem em Fase Sólida (“Solid-State Welding: SSW”):

2.1 Soldagem por Coextrusão (“Coextrusion Welding: CEW”);

2.2 Soldagem a Frio (“Cold Welding: CW”);

2.3 Soldagem por Difusão (“Diffusion Welding: DFW”);

2.4 Soldagem por Explosão (“Explosion Welding: EWX”);

2.5 Soldagem por Forjamento (“Forge Welding: FOW”);

2.6 Soldagem por Fricção (“Friction Welding: FRW”);

2.7 Soldagem por Pressão a Quente (“Hot Pressure Welding: HPW”);

2.8 Soldagem por Laminação (“Roll Welding: ROW”);

2.9 Soldagem por Ultra-Som (“Ultrasonic Welding: USW”).

3. Soldagem por Oxigás (“Oxyfuel Gas Welding: OFW”):

3.1 Soldagem por Ar-Acetileno (“Air Acetylene Welding: AAW”);

3.2 Soldagem por Oxiacetileno (“Oxyacetylene Welding: OAW”);

3.3 Soldagem por Oxihidrogênio (“Oxyhydrogen Welding: OHW”);

3.4 Soldagem por Pressão e Aquecimento (com Gás) (“Pressure Gas Welding: PGW”).

4. Soldagem por Resistência Elétrica (“Resistance Welding”):

4.1 Soldagem por Centelhamento (“Flash Welding: FW”);

4.2 Soldagem por Projeção (“Projection Welding: PW”);

4.3 Soldagem de Costura por Resistência (“Resistance Seam Welding: RSEW”):

4.3.1 Alta Frequência (“High Frequency: RSEW-HF”);

4.3.2 Indução (“Induction: RSEW-I”).

4.4 Soldagem por Resistência a Ponto (“Resistance Spot Welding: RSW”);

4.5 Soldagem por resistência a Topo (“Upset Welding: UW”):

4.5.1 Alta Frequência (“High Frequency: UW-HF”);

4.5.2 Indução (“Induction: UW-I”).

5. Brasagem (“Brazing”):

5.1 Brasagem por Arco (“Arc Brazing: AB”);

5.2 Brasagem por Arco de Carbono (“Carbon Arc Brazing: CAB”);

5.3 Brasagem por Difusão (“Diffusion Brazing: DFB”);

5.4 Brasagem por Imersão (“Dip Brazing: DB”);

5.5 Brasagem em Forno (“Furnace Brazing: FB”);

5.6 Brasagem por Indução (“Induction Brazing: IB”);

5.7 Brasagem por Infravermelho (“Infrared Brazing: IRB”);

5.8 Brasagem por Resistência (Elétrica) (“Resistance Brazing: RB”);

5.9 Brasagem por Chama (“Torch Brazing: TB”);

5.10 Brasagem em Bloco (“Block Brazing: BB”);

5.11 Brasagem em Banho Circulante (“Flow Brazing: FLB”);

6. Solda Branda (“Soldering”):

- 6.1 Solda Branda por Imersão (“Dip Soldering: DS”);
- 6.2 Solda Branda em Forno (“Furnace Soldering: FS”);
- 6.3 Solda Branda por Indução (“Induction Soldering: IS”);
- 6.4 Solda Branda por Infravermelho (“Infrared Soldering: IRS”);
- 6.5 Solda Branda por Ferro Quente (“Iron Soldering: INS”);
- 6.6 Solda Branda por Resistência (Elétrica) (“Resistance Soldering: RS”);
- 6.7 Solda Branda por Maçarico (“Torch Soldering: TS”);
- 6.8 Solda Branda em Banho com Agitação (“Wave Soldering: WS”).

7. Soldagem com Alta Densidade de Energia:

- 7.1 Soldagem por Feixe de Elétrons (“Electron Beam Welding: EBW”):
 - 7.1.1 Alto Vácuo (“High Vacuum: EBW-HB”);
 - 7.1.2 Médio Vácuo (“Medium Vacuum: EBW-MV”);
 - 7.1.3 Sem Vácuo (“Nonvacuum: EBW-NV”).
- 7.2 Soldagem por LASER (“LASER Beam Welding: LBW”).

8. Outros Processos de Soldagem:

- 8.1 Soldagem por Eletroescória (“Electroslag Welding: ESW”).
- 8.2 Soldagem por Indução (“Induction Welding: IW”).
- 8.3 Soldagem por Percussão (“Percussion Welding: PEW”).
- 8.4 Soldagem por Aluminotermia (“Thermit Welding: TW”).

9. Pulverização Térmica (“Thermal Spraying: THSP”):

- 9.1 Pulverização por Arco Elétrico (“Electric Arc Spraying: EASP”);
- 9.2 Pulverização por Chama (“Flame Spraying: FLSP”);
- 9.3 Pulverização por Plasma (“Plasma Spraying: PSP”).

10. União por Adesivo (“Adhesive Bonding: ABD”).

11. Corte Térmico (“Thermal Cutting: TC”) com Oxigênio (“Oxygen Cutting: OC”):

- 11.1 Corte por Fluxo Químico (“Chemical Flux Cutting: FOC”);
- 11.2 Corte por Pó Metálico (“Metal Powder Cutting: POC”).
- 11.3 Corte por Oxigás (“Oxyfuel Gas Cutting: OFC”):
 - 11.3.1 Corte Oxiacetilênico (“Oxyacetylene Cutting: OFC-A”);
 - 11.3.2 Corte Oxihidrogênio (“Oxyhydrogen Cutting: OFC-H”);
 - 11.3.3 Corte por Gás Oxinatural (“Oxy-natural Gas Cutting: OFC-N”);
 - 11.3.4 Corte Oxipropano (“Oxypropane Cutting: OFC-P”).
- 11.4 Corte ao Arco com Oxigênio (“Oxygen Arc Cutting: AOC”);
- 11.5 Corte com Lança de Oxigênio (“Oxygen Lance Cutting: LOC”);

12. Corte Térmico por Arco (Elétrico) (“Arc Cutting: AC”):

- 12.1 Corte por Arco de Carbono com Ar (“Air Carbon Arc Cutting: AAC”);
- 12.2 Corte por Arco de Carbono (“Carbon Arc Cutting: CAC”);
- 12.3 Corte por Arco com Eletrodo Consumível e Proteção com Gás (“Gas Metal Arc Cutting: GMAC”);
- 12.4 Corte por Arco com Eletrodo Não Consumível e Proteção com Gás (“Gas Tungsten Arc Cutting: GTAC”);
- 12.5 Corte por Arco com Eletrodo Metálico Nu (“Metal Arc Cutting: MAC”);
- 12.6 Corte por Arco Plasma (“Plasma Arc Cutting: PAC”);
- 12.7 Corte por Arco com Eletrodo Revestido (“Shielded Metal Arc Cutting: SMAC”).

13. Outros Métodos de Corte:

- 13.1 Corte por Feixe de Elétrons (“Electron Beam Cutting: EBC”).
- 13.2 Corte por LASER (“LASER Beam Cutting: EBC”):
 - 13.2.1 Ar (“Air: LBC-A”);
 - 13.2.2 Evaporativo (“Evaporative: LBC-EV”);
 - 13.2.3 Gás Inerte (“Inerte Gas: LBC-IG”);
 - 13.2.4 Oxigênio (“Oxygen: LBC-O”).

Soldagem & Técnicas Conexas

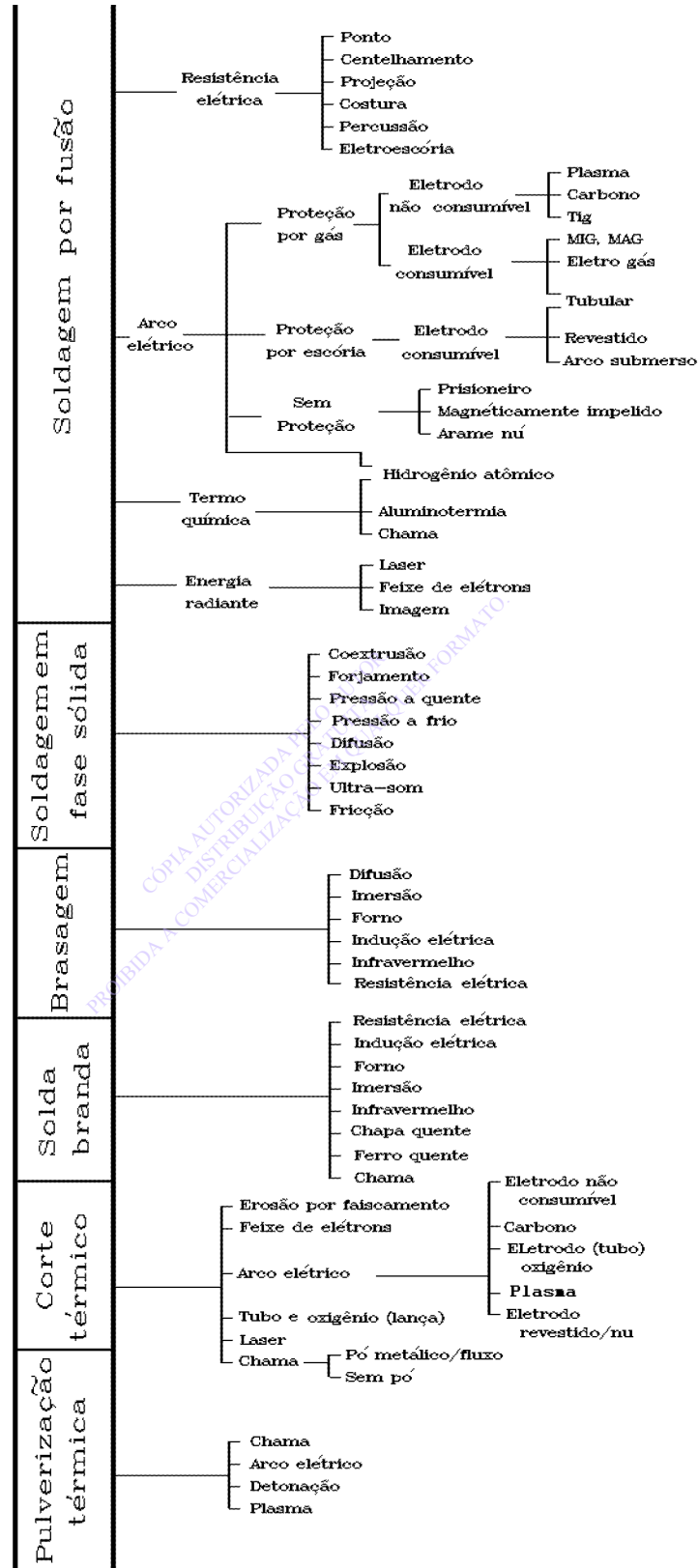


Figura 1.3 - Principais Processos de Soldagem e Técnicas Conexas.

DESCRIÇÃO SUMÁRIA DOS PRINCIPAIS PROCESSOS

Os métodos a seguir descritos, foram escolhidos por serem os mais utilizados, ou demonstrarem maior potencial de emprego num futuro próximo.

Aqueles processos marcados (*) serão detalhadamente analisados em capítulos posteriores deste livro e, portanto, aqui apresentados da forma mais resumida possível.

SOLDAGEM EM FASE SÓLIDA

Este método se vale da dispersão ou ruptura dos filmes existentes sobre as superfícies, realizando a união sob pressão.

Existe uma deformação interfacial mínima, abaixo da qual a solda não se realiza. A mesma diminui com a temperatura, a qual auxilia na expulsão de certos tipos de contaminantes superficiais; aumenta a plasticidade do material; promove difusão e pode até causar recristalização.

Os principais processos praticados são os seguintes:

❑ Soldagem por Forjamento

Provavelmente o mais antigo processo nesse grupo, o mesmo consiste em aquecer as partes das peças que se quer soldar (geralmente de maneira rudimentar) seguindo-se o martelamento das regiões que são postas em contato. Dessa forma, os óxidos superficiais são expelidos e os metais se deformam plasticamente, ocorrendo uma união metalúrgica.

Também são utilizadas variantes do método, tais como soldar através de prensas, ou matrizes de forjamento. Outrossim, a laminação de chapas formando sanduíche é um eficiente procedimento para obter relativamente grandes superfícies revestidas por outro material.

❑ Soldagem por Pressão a Quente

A junta (ou seja, as partes das peças em contato que serão unidas) são mantidas sob pressão e aquecidas até temperaturas abaixo do sólido do material. Após algum tempo, a união se realiza.

O aquecimento pode ser efetuado por chama, ou indução elétrica. Outro meio usual, é aquecer as partes através da indução de corrente de alta frequência no material a ser soldado. Quando a temperatura conveniente é alcançada, a solda ocor-

re através de pressão. Esse processo é geralmente utilizado na fabricação de tubos, conforme mostrado esquematicamente na **Fig. 1.4**. Também é possível realizar o aquecimento, através da passagem de uma corrente elétrica entre as partes em contato. A interface apresenta alta resistência elétrica e, portanto, o calor é gerado com muito maior intensidade nesse ponto, devido ao efeito Joule (I^2R). A pressão entre as peças é continuamente aplicada; os materiais se deformam plasticamente e, após certo tempo, a união está completa. É importante ser ressaltado, que esse método difere do classicamente denominado “solda por resistência elétrica”, pois naquele caso há fusão das partes, enquanto aqui esse fato é indesejável.

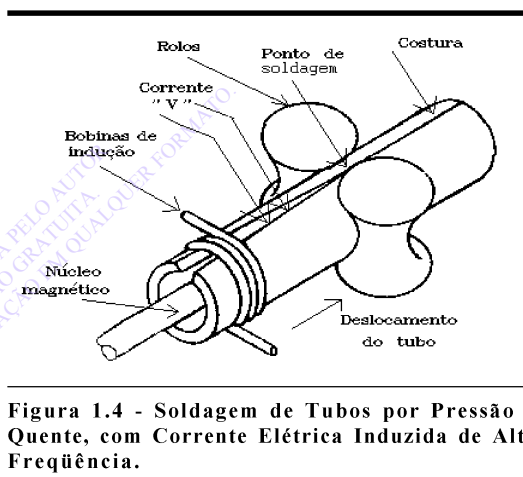


Figura 1.4 - Soldagem de Tubos por Pressão à Quente, com Corrente Elétrica Induzida de Alta Frequência.

❑ Soldagem (por Pressão) a Frio

Realiza-se a solda pressionando as peças que serão unidas, na temperatura ambiente. As superfícies em contato devem ser especialmente limpas. Os metais geralmente soldados por esse processo são o cobre e o alumínio, sendo a ductilidade dos mesmos um fator benéfico. A facilidade de realizar essas soldas decresce com o aumento da dureza e com a queda da temperatura de fusão dos materiais envolvidos. Os tipos de juntas utilizadas são de sobreposição e a topo (veja "Juntas" na página 18), ou chapas laminadas. Esse método é também empregado na soldagem de arames; tubos e barras no sentido longitudinal e folhas metálicas. Um detalhe importante, é que nas juntas por sobreposição, ou laminação, geralmente as soldas são realizadas em pequenas áreas, onde ressaltos existem nas matrizes ou nos rolos.

□ Soldagem por Explosão

Une-se as peças através do violento impacto entre suas superfícies. A alta velocidade de deslocamento (V_d) necessária é obtida através do posicionamento de cargas explosivas sobre uma das peças, conforme ilustrado na **Fig. 1.5**. Este processo é utilizado para revestir grandes superfícies, geralmente chapas, ou mesmo tubos internamente. Como mostrado na referida figura, a chapa superior é lançada sobre a inferior, conforme a detonação da carga ocorre num dado sentido. Cada material possui uma mínima velocidade necessária (V_s) para que a solda se realize sendo, por exemplo, de 255 m/s para o alumínio. Outros importantes fatores são o acabamento superficial e o ângulo de contato entre as peças em choque.

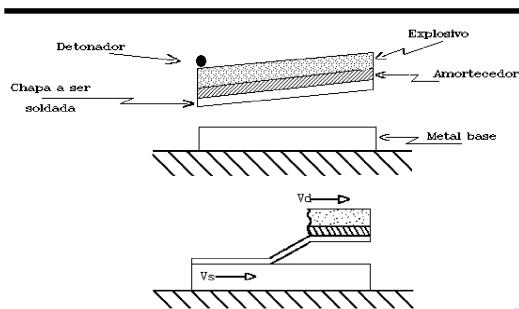


Figura 1.5 - Soldagem por Explosão.

□ Soldagem por Ultra-Som

Obtém-se a união de metais similares ou dissimilares, através da aplicação de vibração ultra-sônica nas peças, mantidas em contato por moderada pressão. Essa vibração provoca a dispersão dos filmes superficiais e aumenta localmente a temperatura. A **Fig. 1.6** ilustra esquematicamente o equipamento utilizado, com o conversor de frequência produzindo vibrações entre 15 a 60 kHz. O principal emprego desse processo é nas indústrias de componentes eletro/eletrônicos.

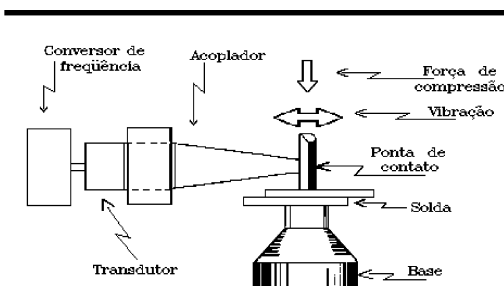


Figura 1.6 - Soldagem por Ultra-Som.

□ Soldagem por Fricção (*)

Nesse processo, peças sob pressão são friccionadas, de forma a expelir filmes superficiais e gerar suficiente calor para que as partes em contato alcancem a fase plástica. Essa fricção é, então, interrompida, com a pressão sendo aumentada e a solda realizada. Geralmente uma peça é mantida fixa, enquanto a outra sofre rotação e se desloca axialmente. O processo permite a soldagem de metais similares, ou dissimilares, ocorrendo em poucos segundos e encontrado amplo emprego na fabricação de componentes de alta qualidade, principalmente na indústria auto-motiva.

□ Soldagem por Difusão

A união é obtida, através da manutenção em contato das peças por um relativamente longo tempo em alta temperatura, o que permite a difusão dos átomos entre as superfícies. A pressão sobre as peças é pequena e, dessa forma, ocorre mínima deformação. Em certos casos, coloca-se um terceiro material entre as peças, para acelerar o processo e produzir soldas com melhores propriedades mecânico/metalúrgicas. Como são utilizadas temperaturas que podem acelerar o processo de oxidação (de 1000 °C para aços ao carbono, por exemplo) a operação normalmente se realiza em forno com atmosferas protetora; inerte, ou vácuo.

A difusão ocorre por um mecanismo envolvendo vacância na rede cristalina (ou nos contornos dos grãos) sendo que a taxa com que se realiza depende da temperatura. O fenômeno pode se processar nas fases sólida, ou líquida. No primeiro caso, a fina camada de óxidos superficiais difunde-se, permitindo a solda numa temperatura (na escala Kelvin) em torno de 70% daquela da fusão do material. Na união de materiais dissimilares, ou com um material intermediário, pode ocorrer a formação de uma fase líquida na temperatura de trabalho.

As aplicações desse processo são desde a soldagem de pastilhas de corte sobre o porta-ferramenta, até peças/componentes na indústria aeroespacial.

SOLDAGEM TERMOQUÍMICA

Este é um método de soldagem que utiliza o calor gerado por reações químicas, produzidas por compostos nos três estados da matéria.

Os seguintes principais processos são geralmente utilizados:

❑ Soldagem por Oxigás (*)

O calor para a fusão dos materiais é obtido através de uma chama, produzida pela combinação do oxigênio com um combustível. O gás acetileno é o mais empregado entre os combustíveis disponíveis, pois além da chama alcançar a maior temperatura, a mesma também possui a mais alta intensidade de combustão. O calor é transferido para os materiais por convecção forçada e radiação mas, apesar de sua quantidade ser grande, a densidade da energia é muito pequena, sendo atingidas regiões das peças que não farão parte da junta.

As aplicações industriais modernas desse processo são muito limitadas. Entretanto, é considerável seu uso em soldagem de manutenção; sobre alguns não-ferrosos, além de como fonte térmica em brasagem; solda branda e pulverização térmica.

❑ Soldagem com Hidrogênio Atômico

O calor para fundir as peças é gerado pela dissociação do hidrogênio, quando esse gás passa através de um arco elétrico, geralmente formado entre dois eletrodos não-consumíveis. Essa reação é endotérmica, mas quando o gás dissociado encontra a superfície das peças e resfria, os átomos do mesmo se recombinam e o calor anteriormente absorvido é liberado. A temperatura da chama assim formada é maior do que a da oxiacetilênica, com a quantidade de calor sendo aproximadamente igual. Devido principalmente aos problemas de segurança desse gás (perigo de explosão), seu uso é atualmente muito restrito.

❑ Aluminotermia

Nesse processo, óxidos com baixa energia de formação são misturados a agentes metálicos redutores - normalmente o alumínio - que oxidados possuem alta energia de formação. O excesso da energia de formação da reação, é utilizado para fundir ligas metálicas adicionadas no mesmo local. Dessa forma, o material fundido é vazado entre as partes a soldar, com a **Fig. 1.7** ilustrando o cadinho refratário, que é posicionado sobre a junta. O mesmo contém alumínio e o óxido do metal desejado (e usualmente elementos de liga) para melhorar as propriedades mecânicas. Como a reação não iniciará com temperatura menor do que cerca de 1300 °C (em aços), um composto especial (o qual pode ser magnésio) e que sofre fácil ignição é utilizado para ativar a mesma. O material é vazado na junta, a qual se encontra envolta num molde. Como o banho está superaquecido, parte

do metal base também funde e a solda estará completa em um ou dois minutos.

Esse processo é tipicamente empregado na união de trilhos; cabos de cobre; ou cobre em aço.

Por exemplo, na reação abaixo, um quilo do composto produz cerca de 476 g de escória; 524 g de ferro e 181.500 cal.

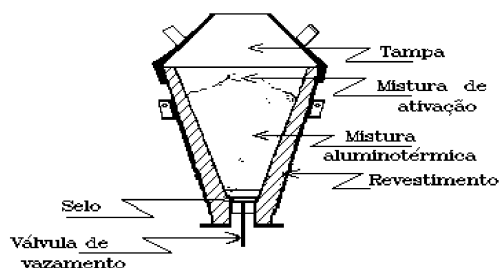
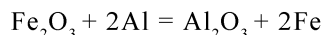


Figura 1.7 - Soldagem por Aluminotermia

SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Esse método de soldagem por fusão utiliza o calor produzido pela passagem da corrente elétrica num condutor (ou feito Joule), o qual é dado por $I^2 R \cdot t$, onde I é a intensidade da corrente; R a resistência do condutor e t o tempo da aplicação dessa corrente.

Note-se que o processo de soldagem por resistência a topo, o qual foi descrito anteriormente, possui a característica de ser realizado na fase sólida.

Os principais processos desse grupo são os seguintes:

❑ Soldagem a Ponto por Resistência (*)

Nesse processo, a solda é realizada entre peças, geralmente sobrepostas, através da fusão local provocada pela passagem de corrente elétrica entre dois eletrodos (fabricados com ligas de cobre), que pressionam as superfícies das mesmas. O processo tem ampla aplicação na fabricação de artefatos com chapas relativamente finas em geral e na indústria automobilística.

❑ Soldagem de Costura por Resistência (*)

Através da substituição dos eletrodos por um par de discos, é possível soldar as peças, com a aparência de que a solda é contínua (formando, assim, uma "costura"...). Os pontos podem ser su-

perpostos, ou espaçados, com o processo admitindo diversas variantes. Uma larga aplicação é na fabricação de tubos de parede fina, à partir de chapas calandradas, denominados “tubos com costura”. Corrente de alta frequência pode ser utilizada e a mesma tende à se concentrar na superfície da peça. Tubos são assim soldados, ocorrendo a circulação da corrente no “V” formado pelas bordas da peça.

❑ Soldagem por Projeção (*)

Este processo é uma modificação do a ponto, já que são realizados ressaltos numa ou nas duas chapas sobrepostas, localizando a pressão e o fluxo de corrente.

❑ Soldagem por Centelhamento (*)

As peças a serem soldadas são posicionadas, de forma que uma permanece fixa e a outra possa se deslocar axialmente. Ambas são conectadas à um potente transformador, com controles da intensidade e tempo de aplicação da corrente, bem como do deslocamento da parte móvel e da força com que a mesma pressionará a fixa. A soldagem é iniciada com as superfícies sendo postas em contato sob baixa tensão (elétrica) e pressão. Então, as mesmas são imediatamente afastadas numa pequena distância, ocorrendo a formação de pequenos arcos (“pontes”) com curto período, os quais criam uma fina camada semi-fundida (“pastosa”) sobre a superfície. Essa operação é intermitente e rápida, sendo que parte do material que forma essas pontes é expelido violentamente - daí o nome centelhamento, ou em inglês “flash”. Quando as superfícies se encontram aquecidas uniformemente, a parte móvel é pressionada sobre a fixa com grande força, sendo expelido todo o metal semi-fundido, e a união realizada.

❑ Eletroescória (*)

Com utilização basicamente na soldagem de peças de grande espessura, esse processo opera em passe único na posição vertical. Um arame maciço ou tubular (com fluxo no seu interior) é continuamente alimentado, sendo adicionado fluxo, o qual funde com o arco elétrico formado no início da operação. Logo após a fusão desse fluxo, é agregada uma ainda maior porção do mesmo e o arco se extingue. Pelo calor gerado na passagem da corrente elétrica no fluxo, esse se mantém fundido, bem como o eletrodo e laterais da junta. O metal e escória fundidos são mantidos por moldes (“sapatas”) de cobre refrigerados .

SOLDAGEM POR ENERGIA RADIANTE

Os processos a seguir descritos possuem, como principal característica, uma altíssima densidade de energia, focada sobre o local específico que a solda (ou corte) deve ser realizada.

❑ Soldagem por LASER (*)

A emissão de luz por um corpo pode ser devida ao retorno de elétrons para o nível normal ou intermediário, os quais foram excitados para um nível anormalmente alto de energia, ou estado estimulado. A cada caída (retorno) espontânea, é emitido um fóton, com direção e frequência aleatória. Desta forma a luz produzida é dita incoerente e, mesmo sendo focada, apresenta uma baixa densidade de energia.

A palavra LASER é composta à partir das iniciais em inglês “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” - ou Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Radiação - e designa um processo, que entre diversas aplicações, pode ser utilizado para soldagem e corte, por apresentar uma alta densidade de potência - acima de 10^7 W/mm².

Um feixe LASER é uma radiação eletromagnética coerente e amplificada, podendo ocorrer em diversas frequências. Ondas de uma energia “coerente” são uniformes no comprimento, muito bem colimadas e estão em fase na mesma direção (da largura) do feixe, permitindo que alta densidade de energia seja alcançada.

Na soldagem, o LASER apresenta as vantagens de produzir muito pequenas Zona Fundida (ZF) e Zona Afetada pelo Calor (ZAC) no metal base. Como consequência, a tensão residual é reduzida e se produz pouquíssima distorção.

❑ Soldagem por Feixe de Elétrons (*)

Elétrons possuem, além da carga elétrica, massa, o que os torna duplamente manipuláveis. Este processo utiliza energia gerada pelo impacto de elétrons sobre a superfície da junta para realizar a solda. Essas partículas são aceleradas por diferença de potencial e focadas numa área muito pequena, resultando em alta densidade de energia.

Soldas num único passe sobre peças de grande espessura, são realizadas com rapidez e características similares ao LASER, sem a inconveniência do possível desvio do feixe por superfícies com alta refletibilidade. Entretanto, é geralmente necessário realizar a operação no vácuo, já que

moléculas de gás desaceleram os elétrons.

❑ Soldagem por Imagem da Fonte de Energia

Através de lentes, ou mais efetivamente espelhos, é possível concentrar a energia radiante de uma fonte e focar a mesma sobre uma reduzida área na junta, realizando a solda. Dessa forma, podem ser obtidas densidades médias de energia, sendo provável que esse processo encontre aplicação em trabalhos realizados no espaço sideral.

SOLDAGEM POR ARCO ELÉTRICO

Os seguintes processos são, sem dúvida, responsáveis pelo maior número de aplicações na união dos materiais:

❑ Soldagem a Arco por Prisioneiro

Esse é um processo conveniente para a soldagem em larga escala de pinos, ganchos e similares, geralmente denominados “prisioneiros”. Conforme mostrado esquematicamente na **Fig. 1.8**, a pistola com o prisioneiro no seu interior é posicionada sobre a superfície de interesse e a operação inicia. A partir desse instante, a pistola efetuará automaticamente as seguintes etapas: (a) A ponta do prisioneiro é colocado em contato com a superfície; (b) Uma corrente de baixa intensidade circula, com o prisioneiro sendo afastado cerca de 1,5 mm da peça, formando-se um “arco piloto”; (c) A corrente é então aumentada, com conseqüente maior potência do arco, sendo mantida por tempo suficiente para fundir a ponta do prisioneiro e criar uma cratera na superfície; (d) O prisioneiro é, então, pressionado contra essa superfície, sendo importante essa fase na soldagem de materiais com alta condutividade térmica; (e) A solda está realizada, tendo ocorrido num muito curto intervalo de tempo, em geral menor do que 1 s.

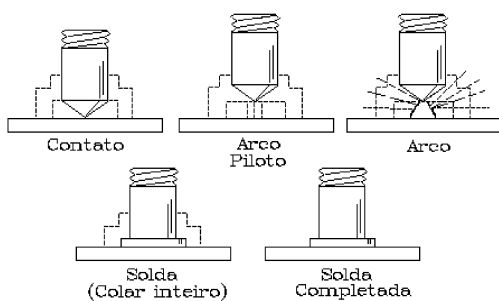


Figura 1.8 - Soldagem a Arco por Prisioneiro.

A operação acima descrita pode ocorrer sem proteção alguma, ou com um colar cerâmico com fluxo no interior, circundando o prisioneiro, que quebra quando este é pressionado contra a peça.

❑ Soldagem a Arco Magneticamente Impelido

Apesar desse processo não constar na lista da AWS anteriormente apresentada, aqui o mesmo é descrito, pois é mais uma opção para soldagem de seções ôcas em geral, de paredes finas. As peças que serão soldadas são posicionadas, sendo uma fixa e a outra com possibilidade de se deslocar axialmente. Conforme mostrado na **Fig. 1.9**, dois solenóides envolvem as peças (um em cada lado da junta e com mesma polaridade). Uma peça contacta a outra e nesse instante circula corrente elétrica, com diferença de potencial suficiente para formar um arco elétrico, quando as mesmas são afastadas cerca de 1,5 mm de distância. Como o campo magnético criado pelos solenóides é radial em relação ao arco, esse é perturbado e se desloca (gira) com alta velocidade em torno da borda superior da parede da seção. O processo é eficiente e rapidamente a (fina) parede funde na superfície, seguindo deslocamento e pressão de uma peça contra a outra. A solda está, então, realizada.

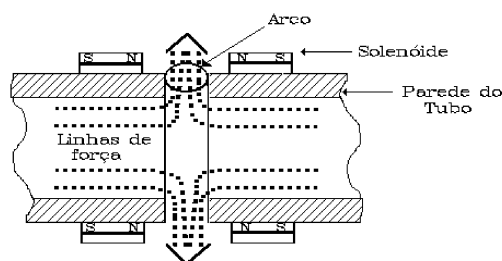


Figura 1.9 - Soldagem de um Tubo por Arco Magneticamente Impelido.

❑ Soldagem a Arco com Eletrodo Revestido (*)

Esse processo é o grande responsável pela expansão da soldagem e foi o primeiro a obter aceitação como método produtivo e de alta qualidade. O consumível (eletrodo revestido, no caso) consiste num arame (“alma”) revestido com uma massa formada por diversos minérios e compostos químicos. Entre outras funções, esse revestimento permite que o arco se mantenha; protege o metal fundido da atmosfera; estabelece as características operacionais do consumível e provê várias propriedades mecânico/metalúrgicas do metal de solda. Sendo um processo manual, o soldador inicia a operação estabelecendo um curto-circuito entre

a superfície da peça e o eletrodo, afastando-o logo em seguida e formando, assim, o arco e a poça de fusão. O processo pode ser utilizado em praticamente todas as ligas ferrosas e muitas não-ferrosas, sendo inconveniente para metais altamente reativos, ou de muito baixo ponto de fusão.

❑ Soldagem por Arco Submerso (*)

Nesse processo, um arame nu (ou uma fita) continuamente alimentado forma o arco elétrico e a poça de fusão, ambos recobertos com uma camada de fluxo em pó colocado sobre a junta. Parte desse fluxo funde e forma uma cavidade ("caverna"), onde ocorrem as reações pirometalúrgicas e a transferência de metal. O fluxo exerce diversas funções similares ao revestimento dos eletrodos para soldagem manual, apesar de possuir características próprias. O processo apresenta alta taxa de deposição (ou seja, grande massa de metal depositado por unidade de tempo) e é utilizado na maioria das ligas ferrosas e em algumas não-ferrosas, sendo automático, ou raramente, semi-automático.

❑ Soldagem a Arco com Proteção por Gás e Eletrodo Consumível (MIG/MAG) (*)

A soldagem é realizada por um arco elétrico, estabelecido entre um arame nu continuamente alimentado e a peça. A proteção do mesmo é da poça de fusão é realizada por gás que flui pelo bocal, concentricamente com o arame. Geralmente os gases utilizados são inertes, como argônio e hélio, ou do tipo oxidante, também denominado "ativo", tais como CO_2 , ou argônio+ CO_2 , ou argônio+ O_2 , ou combinação desses três gases. A operação é semi-automática, ou automática, sendo que podem ser soldadas ligas ferrosas e não-ferrosas. O processo é adequado para robotização. No Brasil, continua mais conhecido por MIG ou MAG ("Metal Inert Gas", ou, "Metal Active Gas", respectivamente.)

❑ Soldagem a Arco com Eletrodo Tubular (*)

Esse processo reúne duas importantes características, as quais são a do consumível ser alimentado continuamente e conter fluxo no seu interior (pois é um tubo). Desta forma, as benéficas reações pirometalúrgicas das quais o fluxo participa são executadas, sem o inconveniente do mesmo impedir a soldagem em posições outras que plana e horizontal, além de reduzir em muito o perigo de contaminação do mesmo pela umidade e detritos do ambiente. A proteção da poça de fusão pode ser realizada, adicionalmente, por gás, de ma-

neira similar ao MIG/MAG.

❑ Eletrogás (*)

Com configuração similar à Eletroescória, este processo permite que as juntas sejam soldadas verticalmente e num passe. Entretanto, naquele caso a fusão do arame é essencialmente realizada por resistência elétrica, enquanto nesse há arco durante toda a operação. A proteção do arco e do metal fundido é realizada por gases, similares aos utilizados em MIG/MAG, com os arames sendo maciços ou tubulares.

❑ Soldagem a Arco com Proteção por Gás e Eletrodo Não Consumível (TIG) (*)

Esse processo geralmente se destina à realização de soldas sobre peças de pequena espessura. Entretanto, quando a qualidade for um requisito essencial, o mesmo também é empregado sobre peças espessas. O arco elétrico é formado entre um eletrodo não consumível (tungstênio, ou outros compostos com esse elemento) sendo o mesmo e a poça de fusão protegidos por gás geralmente inerte, o qual flui num bocal envolvendo o eletrodo. Portanto, o arco atua somente como fonte de calor, sendo possível a adição de metal manualmente (vareta), ou automaticamente (arames finos). No Brasil, esse processo continua sendo mais conhecido por TIG ("Tungsten Inert Gas").

❑ Soldagem a Arco Plasma (*)

Este processo é, em até certo ponto, similar ao TIG. Entretanto, o arco sofre maior constrição, pois o eletrodo permanece recuado no bocal e concêntricamente flui gás geralmente inerte (denominado "de orifício"), o qual forma o plasma. Em torno desse plasma existe uma cortina adicional de gás, o qual é denominado "de proteção". Como consequência, a temperatura do arco aumenta (podendo alcançar mais de 30.000 K) e a densidade de energia é maior.

Apesar das excelentes características que as soldas produzidas por Plasma apresentam, esse processo é muito pouco divulgado (e, consequentemente, empregado) no Brasil. Em contrapartida, o processo Plasma de corte térmico é intensivamente utilizado no país.

BRASAGEM

Como mencionado na Introdução desse Capítulo, este método de união se caracteriza por utilizar um metal de adição que funde acima de 450 °C, mas abaixo do ponto de fusão do metal

base, sendo geralmente empregado um fluxo. São várias as vantagens da brasagem, entre elas a pequena distorção que provoca na estrutura e quase nula alteração das características metalúrgicas do metal base. Os fenômenos de “molhamento” do material base por aquele adicionado e de “capilaridade” são muito importantes nesse método de união.

❑ Brasagem por Difusão (*)

As partes que serão unidas formam um sanduíche, com metal de adição entre as mesmas. O conjunto é aquecido a uma temperatura conveniente e durante suficiente tempo para que ocorra difusão, podendo ocorrer fusão local de novas fases que se formam nas interfaces.

❑ Brasagem por Imersão (*)

As peças são imersas num forno cadinho que contém fluxo; sais; ou metal fundido. No primeiro caso, o metal de adição (em pasta) é posicionado na junta; após secagem num forno mufla, o conjunto é imerso por um determinado tempo, estando realizada a união quando há fusão do consumível e preenchido o espaço (capilar) entre as peças. O procedimento é similar quando são empregados sais, com exceção de também ser normalmente adicionado fluxo na junta. Com metal fundido, coloca-se fluxo na junta, sendo o conjunto imerso nesse banho, o qual é o próprio consumível.

❑ Brasagem em Forno (*)

Nesse caso, a peça é colocada num forno, já com o metal de adição e fluxo posicionado na junta. Dependendo da atmosfera do forno, pode não ser necessário o uso de fluxo.

❑ Brasagem por Indução Elétrica (*)

As peças são aquecidas através de uma bobina, ou um indutor, sendo provocada a formação de correntes parasitas, ou perdas por efeito Joule nas mesmas.

A profundidade aquecida é inversamente proporcional à frequência da corrente alternada empregada, sendo que o metal de adição e o fluxo são posicionados de maneira similar ao processo anterior.

❑ Brasagem por Infravermelho (*)

A fonte de calor gera infravermelho, sendo que a operação é similar às anteriores.

❑ Brasagem por Resistência Elétrica (*)

Eletrodos comprimem chapas (ou outras

peças) e circula corrente de alta intensidade e baixa tensão pelos mesmos. O calor gerado pela resistência elétrica desses eletrodos aquece - principalmente por difusão térmica - um metal de adição posicionado entre as peças, o qual funde, realizando a união.

❑ Brasagem por Chama (*)

Nesse caso, o aquecimento do conjunto é realizado por chama oxigás, sendo talvez um dos métodos mais populares.

SOLDA BRANDA

Este grupo emprega metal de adição com ponto de fusão máximo de 450 °C, mas menor do que a linha solidus do metal base. Geralmente é utilizado fluxo sobre a junta. Os meios de aquecimento podem ser similares aos da brasagem, mas aquele por “ferro quente” é o mais popular na solda branda de circuitos elétricos. Neste caso, o ferro quente é posto em contato com o metal de adição, fundindo-o (o aquecimento é realizado por radiação da resistência elétrica no interior desse “ferro quente”, mas o mesmo também pode ser aquecido por chama).

PROCESSOS TÉRMICOS DE CORTE

❑ Corte por LASER e Feixe de Elétrons (*)

Os princípios básicos dos equipamentos para esses processos de corte, são similares àqueles descritos na soldagem. Geralmente é empregado um fluxo de gás coaxialmente ao feixe, cujas funções são oxidar o material fundido e arrastá-lo. O corte por Feixe de Elétrons é raramente praticado. Por sua vez, o corte por LASER está se tornando cada vez mais popular no Brasil.

❑ Erosão por Faiscamento

Não é um processo normalmente utilizado para cortar (em partes), ou realizar chanfros. Fazendo uso de máquinas que produzem descargas elétricas (fâscas), é possível erodir o metal base em formas complicadas e rapidamente, sendo muito aplicado na confecção de matrizes para conformação mecânica, por exemplo.

❑ Corte por Arco Elétrico (*)

Este processo é principalmente utilizado nas seguintes formas:

- Eletrodo Carbono/Grafita

Neste caso um eletrodo de carbono/grafita mantém um arco elétrico com a peça, sendo utilizado para corte. Este método está tornando-se obsoleto, pois aquele com carbono e ar comprimido (veja abaixo) é muito mais eficiente.

- **Eletrodo Revestido e Nu**

O arco elétrico com eletrodo nu praticamente não é mais utilizado. Um eletrodo revestido de alta penetração pode realizar cortes, de maneira não muito satisfatória, em todos os materiais.

- **Carbono/Grafita e Ar Comprimido (*)**

Neste processo, um eletrodo de carbono/grafita (geralmente revestido com cobre) forma um arco com a peça, sendo que o metal fundido é expulso por um jato de ar comprimido externo ao eletrodo e paralelo ao mesmo. Corta todos os metais eficientemente.

- **Eletrodo (Tubo) e Oxigênio (*)**

Um eletrodo revestido em forma de tubo forma arco elétrico com o metal base, sendo que pelo seu interior circula um jato de oxigênio. Corta todos os metais, tendo sido desenvolvido com vistas à utilização subaquática.

- **Plasma (*)**

De forma similar ao procedimento para soldagem, mas com diferenças estruturais significativas no bocal, o plasma funde qualquer tipo de material, com o gás injetado à uma maior pressão separando as superfícies. Várias combinações de gás de orifício/proteção tem sido utilizadas, sendo bastante popular o emprego de ar comprimido, devido ao menor custo, apesar da redução de qualidade do corte que esse procedimento provoca.

- **Lança (com Oxigênio) (*)**

O metal base é inicialmente pré-aquecido localmente até sua temperatura de ignição (ou aquela em que esse se oxida muito rapidamente, quando numa atmosfera rica em oxigênio).

Em seguida, um tubo conduzindo oxigênio sob pressão é dirigido contra a superfície aquecida. O metal se oxida catastrófica e furos podem ser realizados rapidamente.

- **Corte por Chama (*)**

A tocha possui (na sua geometria mais usual) um bico com um orifício central e vários pequenos orifícios dispostos circularmente em torno do mesmo. Esses orifícios laterais são para o

pré-aquecimento do ponto sobre a peça onde será iniciado o corte, com a chama geralmente produzida por mistura do oxigênio com um gás combustível. Quando a região aquecida alcança a temperatura de ignição do metal, é liberado um fluxo de oxigênio pelo orifício central e o corte é iniciando com a tocha se deslocando. Como esse é um processo de corte basicamente por oxidação, geralmente não pode ser empregado sobre metais que formam óxidos refratários (tais como aços inoxidáveis). Entretanto, é possível cortar esses metais através do uso de certos artifícios, tais como adição no jato de oxigênio de óxido de ferro, ou óxido de ferro e alumínio.

PULVERIZAÇÃO TÉRMICA

Através desse método, podem ser revestidas superfícies com uma relativamente fina camada de materiais metálicos ou cerâmicos. Os mesmos podem se encontrar na forma original de pó, ou arame, aquecidos até o estado pastoso (semi-fundido) e lançados sobre a peça.

- **Chama (*)**

Este processo utiliza o calor gerado por uma chama oxigás, normalmente oxiacetileno. O pó que será pulverizado é introduzido numa tocha especialmente projetada, podendo ser utilizado, também, um arame com outra configuração de tocha.

- **Detonação (*)**

Detona-se uma mistura de gás combustível com oxigênio num longo cano, no qual é introduzido o pó que será pulverizado. A alta velocidade e o calor gerado produzem um revestimento de muito boa qualidade. A operação é intermitente, sendo que entre cada detonação um gás (nitrogênio) purga o interior do cano.

- **Arco Elétrico (*)**

Geralmente emprega-se dois arames continuamente alimentados, os quais formam um arco elétrico entre si.

Desta forma, conforme o metal funde, o mesmo é lançado contra a superfície desejada por um jato de gás, usualmente ar, sendo produzido um revestimento de média qualidade.

É importante a familiarização com alguns aspectos da terminologia e conceitos fundamentais da soldagem. Portanto, a seguir são apresentados tópicos gerais, os quais serão constantemente mencionados nos Capítulos subseqüentes.

❑ Plasma (*)

Apesar de também empregar um arco elétrico, esse processo apresenta características únicas. A tocha tem uma configuração diferente daquela empregada em solda, ou corte, já que pó, ou

arame, é continuamente introduzido na câmara à frente do eletrodo.

Devido à muito alta temperatura desenvolvida, é possível depositar qualquer tipo de material, notavelmente cerâmicos.

CONCEITOS GERAIS

JUNTAS

Denominam-se “juntas” às partes da peça sobre as quais a soldagem, ou a brasagem, será realizada. Devido, primariamente, aos requisitos de projeto; espessura das peças; processo de soldagem utilizado e distorção admissível, as juntas devem apresentar nas bordas diferentes configurações, para serem unidas de forma econômica e tecnicamente aceitável, existindo 5 tipos básicos, os quais estão mostrados na Fig. 1.10.

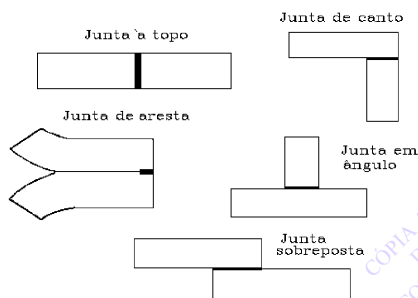


Figura 1.10 - Seções Transversais dos Tipos Básicos de Juntas.

Após ter sido preenchida por um processo com metal de adição, a seção transversal da “junta soldada” pode tomar o aspecto apresentado na Fig. 1.11, a qual possui 6 “passes” (ou “cordões”), cada um depositado individualmente, com 3 “camadas”, ou níveis dos passes.

Nem sempre é possível fundir a espessura total das peças, quando as faces da junta estão paralelas entre si. Nesse caso, estas faces são “biseladas” em diferentes geometrias, as quais foram estabelecidas empiricamente e após anos de experiências. Estas configurações são os “chanfros”, com a Fig. 1.12 (página seguinte) mostrando os casos possíveis, sendo qualquer outro tipo um variante dos mesmos.

Por sua vez, a geometria e terminologia característica dos chanfros é apresentada na Fig. 1.13, exitindo direta relação entre a espessura da peça; tipo de chanfro e o volume do metal de solda de-

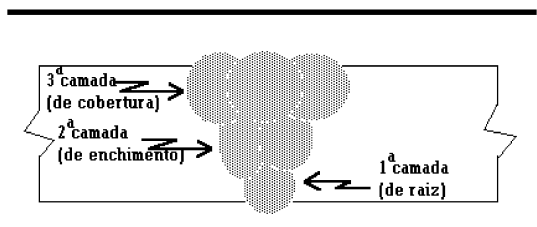


Figura 1.11 - Seção Transversal de uma Junta Soldada, mostrando 6 “passes” em 3 camadas.

positado. Note-se que acima de 20 mm de espessura, a escolha do chanfro se torna um importante critério econômico, como será visto oportunamente (Capítulo 20).

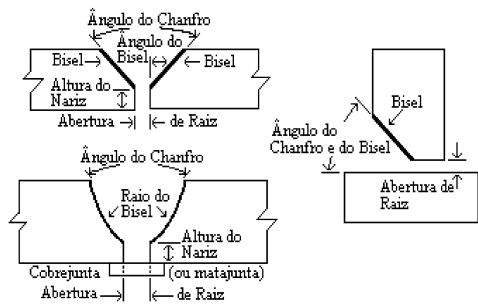


Figura 1.13 - Dimensões Características das Juntas e Terminologia Usual.

GEOMETRIA, DILUIÇÃO E ZONAS DE UMA JUNTA SOLDADA

A junta soldada possui importantes características geométricas e uma terminologia própria.

Na seção transversal de uma junta a tope, tal como aquela apresentada na Fig. 1.14(a), a resistência mecânica do cordão de solda é dada pela penetração vezes o comprimento do cordão. Por sua vez, a composição química final do metal de solda é função: (a) Do metal base; (b) Do metal de adição (eletrodo/arame); (c) Das perdas por sublimação, ou passagem para a escória de certos ele-

Tipo da junta	Tipo do chanfro			
Juntas à topo	<p>Reto</p>	<p>V - simples</p>	<p>V-com nariz</p>	<p>V - duplo ou - X</p>
	<p>Meio - V</p>	<p>K</p>	<p>U</p>	<p>Duplo - U</p>
	<p>J</p>	<p>Duplo - J</p>	<p>Cara</p>	<p>Brasagem</p>
Juntas de canto	Idem juntas à topo, como exemplo:			
Juntas em ângulo	Idem juntas à topo, como exemplo:			
Juntas sobrepostas				
Juntas de aresta				

Figura 1.12 - Configurações dos Chanfros para Soldagem e Brasagem.

mentos químicos; (d) Da diluição.

Com exceção da diluição, em geral os outros itens são fixados. Portanto, esse fator é determinante, sendo definido como a relação entre os volumes do metal base fundido e de todo o metal de solda, ou seja, metal base mais metal de adição. Numa seção transversal do cordão, a diluição (em %) pode ser calculada através da razão entre a área hachurada (metal base fundido) e toda a área do cordão (metal base mais de adição), conforme mostrado na Fig. 1.14(a).

Considerando a junta soldada apresentada na Fig. 1.14(a), composta por dois metais base diferentes (A e B), e conhecendo a diluição, é possível se estimar a porcentagem de um elemento químico genérico (X) no metal de solda, através da seguinte equação:

$$X = K.E + D_A.(A-K.E) + D_B.(B-K.E) \quad [1.2]$$

onde:

E = % do elemento X no metal de adição;

K = Proporção do elemento X que se transfere do eletrodo para a poça de fusão (decimal);
 D_A, D_B = Frações de diluição dos metais base A e B, respectivamente (decimal);
 A, B = % do elemento X nos metais base A e B, respectivamente.

Por exemplo: Suponha-se que o metal base A possua 12%; o B 1,5%; e o metal de adição 90% do elemento níquel. Considerando que a junta é simétrica e que a diluição total é de 30%, qual é a porcentagem estimada de níquel no metal de solda, sabendo que o rendimento desse elemento é 100% (praticamente não há perda)?

Essa estimativa deve basear-se no fato de que, se a junta é simétrica e a diluição total é de 30%, cada metal base participou com 15%, ou seja; $D_A = 0,15$ e $D_B = 0,15$. Portanto, aplicando-se a equação 1.1, têm-se que $X \cong 65\%$, ou seja, o metal de solda deverá conter cerca de 65% de níquel.

Para juntas de filete, importantes aspectos es-

tão ilustrados na **Fig. 1.14(b)**. A face do metal de solda pode ser plana, ou como mostrado nesta figura, também côncava, ou convexa, sendo que isto depende essencialmente do processo utilizado; tipo do consumível e da técnica e dos parâmetros de soldagem, ou seja, tensão; corrente e velocidade.

Para estas soldas de filete, a seção resistente também resulta do produto da “garganta” (menor distância entre a raiz da junta e a face da solda) vezes o comprimento da junta. Entretanto, nesse caso são adotadas pelo menos duas definições, as quais influirão sobre a determinação da “garganta”. Na primeira definição, esta face é a hipotenusa do “maior triângulo retângulo” e na segunda a do “maior triângulo retângulo isósceles” (mais usual), que pode ser inscrito na seção transversal do cordão de solda. Para as demais condições iguais, duas juntas com idênticas “gargantas” possuem mesma resistência mecânica.

Como pode ser visto na **Fig. 1.14(b)**, numa junta de filete são estabelecidas, ainda, as seguintes dimensões: (a) “Pernas”, dadas pelo metal de solda que funde as laterais da junta, podendo ser iguais; (b) “Tamanhos”, ou os catetos do triângulo retângulo (isósceles ou não), existindo, portanto, a relação “garganta = 0,707 x tamanho” quando este triângulo for isósceles.

As seções transversais das juntas mostradas nessa **Fig. 1.14(b)** apresentam dois cordões com diferentes “pernas”, mas idênticos “tamanhos” e, conseqüentemente, iguais “gargantas”. Entretanto, um dos cordões possui muito maior massa de metal de solda. Portanto, sendo adotada a definição que determina a “garganta” como a menor distância entre a hipotenusa do maior triângulo retângulo isósceles que pode ser inscrito e a raiz da junta, deve-se sempre procurar produzir soldas com “pernas” iguais, sob pena de se adicionar metal de solda que não será considerado quando do cálculo da resistência da junta.

Na maioria dos processos de soldagem e especialmente naqueles por fusão, as juntas soldadas apresentam várias zonas distintas, conforme exemplificado na **Fig. 1.15**. É importante ficar claro, que cada uma dessas zonas possui uma série de particularidades, as quais serão devidamente analisadas num outro livro dessa série dedicado à Metalurgia da Soldagem. Para o propósito deste volume, basta saber que as mesmas são as seguintes:

❑ Zona do Metal de Solda

Formada pela mistura homogênea (sob o

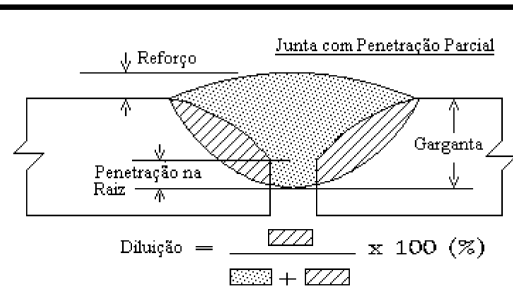


Figura 1.14(a) - Geometria e Diluição numa Junta a Topo com Penetração Parcial.

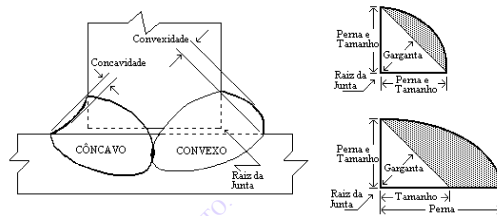


Figura 1.14(b) - Geometria do Cordão de Solda de Junta em Ângulo (Filete).

ponto de vista macroscópico) do metal base fundido com, em geral, o metal de adição e normalmente empregada no estado bruto de fusão.

❑ Zona Não Misturada Fundida

De espessura muito fina e composta unicamente pelo metal base fundido, o qual solidifica antes de ocorrer qualquer mistura com o metal de adição.

❑ Interface da Solda

Esta superfície indica a fronteira entre o metal fundido na solda e o metal base, podendo ser de difícil identificação em metais puros.

❑ Zona Parcialmente Fundida

Produzida pela liquação de inclusões, impurezas, ou segregações nos contornos dos grãos com baixo ponto de fusão. Ocorre no metal base e imediatamente após a Interface da Solda.

❑ Zona Afetada pelo Calor (ZAC)

Como conseqüência da máxima temperatura alcançada; do tempo de permanência do metal base na mesma, e das taxas de aquecimento e resfriamento, há toda uma zona onde não ocorre nenhum tipo de fusão, mas são produzidas alterações alotrópicas no estado sólido relevantes, incluindo crescimento de grão e transformações de

fase. Geralmente essa zona apresenta diversas regiões, com características que dependem de cada metal base.

❑ Zona do Metal Base Inalterado

Constituída pelo restante da peça que não sofreu nenhuma transformação metalúrgica. Entretanto, essa zona pode estar num estado de alta tensão residual, o que poderá trazer importantes consequências para a utilização da peça em questão.

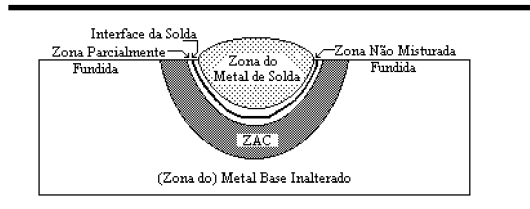


Figura 1.15 - Zonas de uma Junta Soldada.

POSIÇÕES E OUTRAS CONDIÇÕES DE SOLDAGEM

É possível realizar a soldagem em várias posições, o que pode influir, no mínimo, sobre os seguintes itens: (a) Escolha do processo, dos consumíveis (eletrodo/arame; gás; fluxo) e dos parâmetros; (b) Custos; (c) Qualidade da junta soldada.

Nas **Figs. 1.16 e 1.17** (próxima página) são apresentadas as terminologias para as posições de soldagem de chapas e tubos, respectivamente, da “The American Society of Mechanical Engineers-ASME”, Código que deve ser consultado para detalhes adicionais. Note-se que nas figuras referidas, os sufixos “G” e “F” indicam juntas a topo e em ângulo (filete), respectivamente.

Por sua vez, o procedimento de soldagem deve conter diversas e detalhadas informações sobre todas as operações que serão realizadas. Entre as mesmas, ressalta-se as seguintes:

❑ Pré-Aquecimento

O aquecimento da junta imediatamente antes da soldagem se realizar, depende de considerações sobre: (a) A composição química dos metais de adição e base; (b) Da taxa de resfriamento; (c) Do conteúdo de hidrogênio difusível no metal de solda; (d) Do constrangimento (nível de tensões) imposto à junta.

Essa operação é fundamentalmente realizada, ou para reduzir a taxa de resfriamento, de forma a que não se desenvolvam trincas na junta soldada (“Trincas Induzidas pelo Hidrogênio”); ou para compensar a excessiva taxa com que o calor gerado pelo arco é dissipado, impedindo a formação de uma conveniente poça de fusão; ou, ainda, para diminuir as deformações geradas pela soldagem.

❑ Temperatura de Inter-Passe

O controle da temperatura entre cada passe, pode ser de fundamental importância para manter as propriedades mecânico/metalúrgicas desejadas para a junta, além de exercer efeitos similares ao do pré-aquecimento em certas situações.

❑ Pós-Aquecimento

Após a soldagem ter sido realizada, é possível que seja necessário aquecer novamente a junta e manter a temperatura especificada por um certo tempo. Essa operação pode, principalmente, melhorar as propriedades mecânico/metalúrgicas das juntas; e/ou prevenir a ocorrência de defeitos, auxiliando na difusão do hidrogênio; e/ou aliviar as tensões geradas pela soldagem.

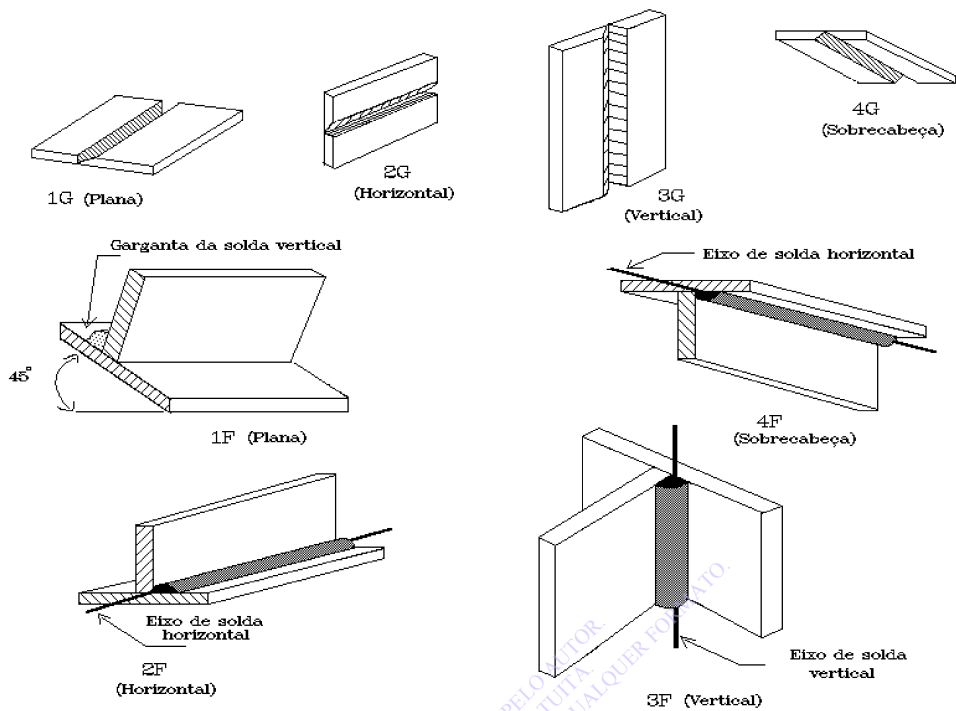


Figura 1.16 - Posições de Soldagem Convencionadas pela ASME para Chapas.

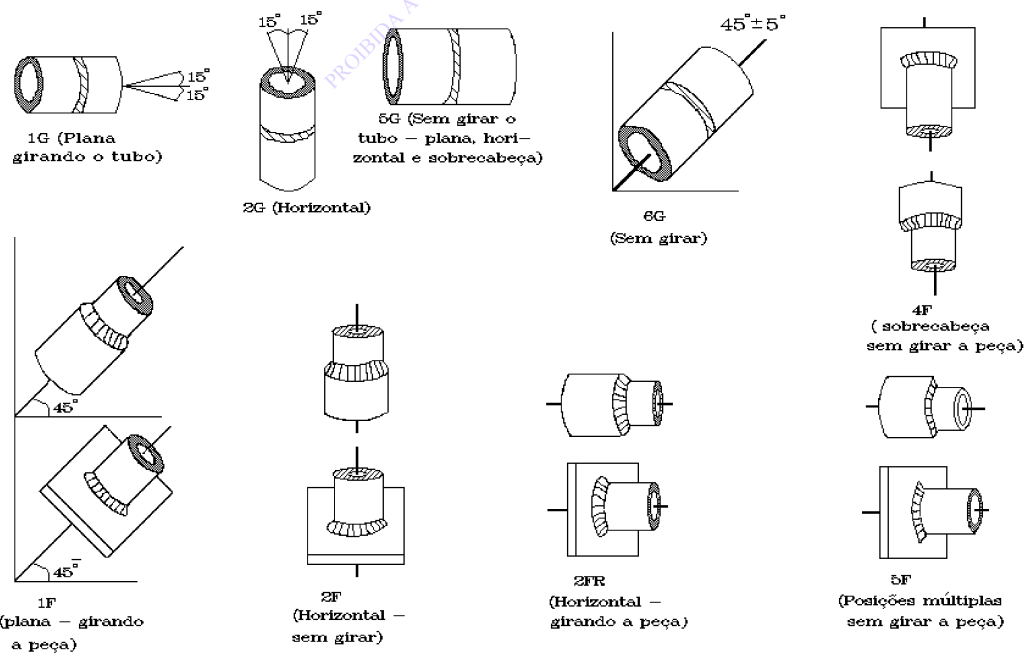


Figura 1.17 - Posições de Soldagem para Tubos Convencionadas pela ASME.

**C
A
P
Í
T
U
L
O

02**

**INTRODUÇÃO À
FÍSICA DA SOLDAGEM**

O ARCO ELÉTRICO NA SOLDAGEM	24
Jato de Plasma	26
Deflexão Magnética	27
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO ARCO	29
Dissociação e Ionização	30
Condutividades Elétrica e Térmica. Temperatura	32
Entalpia	33
Viscosidade Dinâmica	33
Propriedades Físicas Gerais	34
ESTABILIDADE DO ARCO	35
TRANSFERÊNCIA DE MASSA	37
Introdução	37
Mecanismos	38
Modos de Transferência	40
Energia de Soldagem e Massa Fundida	41

O ARCO ELÉTRICO NA SOLDAGEM

O arco elétrico é caracterizado por uma descarga entre dois eletrodos em um gás, ou vapor metálico, com queda de potencial no cátodo (eletrodo negativo) em torno de 9 V e corrente mínima de 0,1 A. Pode ocorrer, também, descarga incandescente com correntes menores do que 0,1 A e queda de tensão no cátodo entre 100 e 500 V.

No arco elétrico são geradas temperaturas que oscilam entre 5000 e 30.000 K, excepcionalmente alcançado até 50.000 K, dependendo do processo utilizado; condições de soldagem e outros fatores. Como consequência, a matéria passa a existir no seu quarto estado, denominado plasma, composta por gás altamente ionizado e eletricamente neutro.

A soldagem apresenta uma série de particularidades, iniciando pelo fato de que, por razões de segurança, a tensão máxima admissível de trabalho é aproximadamente 100 V, enquanto que para iniciar uma descarga elétrica no ar são necessários cerca de 5000 V por cada milímetro de distância entre os eletrodos (frequência da rede). Além disso, em geral, um “eletrodo” é formado por um arame (recoberto por um fluxo, ou protegido por gás) ou um metal não consumível, enquanto o outro “eletrodo” é a peça que será soldada, formando-se um jato de plasma que flui na direção dessa última (e nunca ao contrário).

Depreende-se, portanto, que é importante estudar o comportamento do arco elétrico na soldagem porque, entre outros motivos: (a) O arco é a fonte de calor, forma a poça de fusão e, em geral, funde o eletrodo; (b) A alta temperatura e as forças eletro-magnéticas associadas ao arco, além da grande velocidade do fluxo de plasma, levam à intensas reações químicas e provocam homogeneização da poça de fusão; (c) As forças geradas no arco são as principais responsáveis pela transferência do metal desde o eletrodo para a peça; (d) Em grande parte, o projeto da fonte de potência é determinado pela necessidade de estabilizar o arco.

O arco apresenta três regiões bem definidas, como mostrado na Fig. 2.1, as quais possuem as seguintes principais características:

□ Região da Queda de Tensão Catódica (U_c)

Essa é a região mais problemática, sendo responsável por complicados mecanismos que mantém o arco, nem todos completamente entendidos e para a qual é devotada a maior parte das

pesquisas.

Isso se deve, principalmente, ao fato de que íons do plasma podem passar facilmente para o cátodo, enquanto que os elétrons devem vencer uma grande barreira de potencial para sair do eletrodo em direção ao gás. Como resultado, há carga espacial envolvente positiva no cátodo (da ordem de 10^{-3} mm, “c” na Fig. 2.1), causando um gradiente de tensão que pode exceder 10^6 V/mm.

Por sua vez, o cátodo é dito termo-iônico, quando aquecido à uma suficientemente alta temperatura emite elétrons sem fundir, com densidade de corrente (j) dada pela seguinte equação (de Richardson-Dushman):

$$j = A \cdot T^2 \cdot \exp(-\Phi \cdot e \cdot k^{-1} \cdot T^{-1}) \quad [2.1]$$

onde:

A = Constante (sendo 6×10^5 A.m⁻².K⁻² para a maioria dos metais);

T = Temperatura da superfície do cátodo (K);

e = Carga do elétron (Coulomb);

F = Função (termoiônica) trabalho da superfície do cátodo (V);

k = Constante de Boltzmann (J/K).

Então, a densidade de corrente depende criticamente da temperatura da superfície do cátodo, a qual somente é alcançada, sem fundir o mesmo, quando são utilizados materiais refratários (com ponto de ebulição maior do que 4000 K), tais como carbono, ou tungstênio (puro; ou com tório; ou zircônio; ou cério, por exemplo). Nesse caso, tais cátodos trabalham com densidades de corrente entre 1 e 100 A/mm², sendo caracteristicamente estáticos e estáveis.

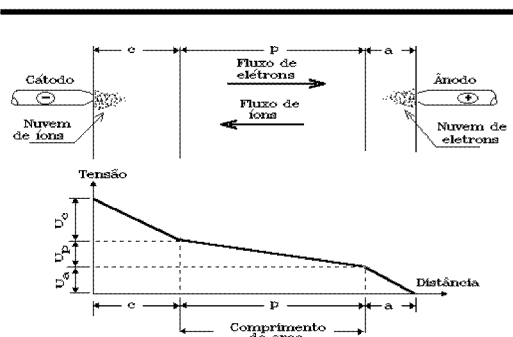


Figura 2.1 - Regiões do Arco Elétrico de Interesse para a Soldagem e Correspondentes Quedas de Potencial.

A queda de tensão no cátodo pode ser calculada por:

$$U_c = (\Phi + 3/2.k.T/e) + Q_e.e/I - I.R \quad [2.2]$$

onde:

Φ = Função (termoiônica) trabalho da superfície do cátodo (V);

k = Constante de Boltzmann (J/K);

T = Temperatura do gás (K);

e = Carga do elétron (Coulomb);

Q_e = Perda de energia para o cátodo;

I = Corrente no arco (A);

R = Resistência elétrica do eletrodo (Ω);

Nessa equação, o termo $3/2(KT/e)$ representa a energia térmica dos elétrons, enquanto IR é o efeito Joule no eletrodo (considerável somente em altas densidades de corrente).

Alguns materiais, entretanto, vaporizam em temperaturas bem menores do que as requeridas para a emissão termoiônica, ou, no caso dos refratários, quando operam em baixa corrente e/ou pressão. Esses cátodos são denominados não-termoiônicos, sendo caracteristicamente móveis, com vários pontos catódicos se formando de forma errática e de curta existência sobre o eletrodo.

Existem pelo menos três tipos de cátodos não-termoiônicos (também chamados “frios”), os quais são: (a) Vapor, se formando sobre metais sem filme de óxidos sobre a superfície; (b) Túnel, sobre camadas finas de óxidos (menor do que 10 mm); (c) Interruptor, sobre camadas mais espessas de óxidos.

Na solda a arco, o primeiro tipo é praticamente inexistente, enquanto que em processos nos quais a poça fundida fica recoberta com uma camada de escória líquida, os metais alcalinos emitem ânions em alta temperatura.

Naqueles tipos em que há formação das camadas de óxidos, os pontos catódicos se movem e removem as mesmas pelo fenômeno denominado bombardeamento de íons. Este fato sugere o uso de eletrodo positivo na soldagem TIG sobre alumínio e magnésio, os quais formam uma camada de óxido sobre a poça de fusão (ânodo).

A mobilidade do cátodo pode causar excessiva instabilidade do arco, como na soldagem com eletrodo consumível (polaridade positiva) e proteção com gás inerte puro em aço. A solução é adicionar um gás oxidante (CO_2 , ou O_2 , por exemplo), criando uma situação similar à anterior. Isso

evidencia a importância da existência dessa camada de óxidos para a estabilidade do cátodo.

□ Região da Queda de Tensão Anódica (U_a)

No ânodo (eletrodo positivo) os elétrons podem penetrar no eletrodo livremente, pois facilmente vencem a barreira de potencial existente. Já os íons positivos, como regra geral, devem vencer uma grande barreira de potencial para emergir desde o eletrodo para o plasma. Como resultado, há acumulação de elétrons no ânodo, ou seja, se forma uma região (“a” na Fig. 2.1) com carga espacial envolvente negativa com aproximadamente 10^{-1} mm.

O ânodo possui menor influência sobre a manutenção do arco que o cátodo, pois o mesmo não emite íons positivos (exceção feita ao ânodo de aços com impurezas superficiais).

A principal energia gerada no ânodo é devida aos elétrons, através do componente de potencial (IU_a); da pequena participação de energia térmica dos elétrons ($3/2 KT/e$) e da energia potencial ($\Phi.e$) para cada elétron.

□ Região da Coluna do Arco (U_p)

Essa região se encontra entre as caídas catódica e anódica; possui um gradiente de potencial muito pequeno (cerca de 1 V/mm); é composta por partículas neutras (átomos-moléculas) e carregadas (elétrons-íons), sendo importante sua neutralidade elétrica, ou seja, em cada unidade de volume o número de cargas positivas e negativas é praticamente igual.

A coluna apresenta uma situação de quase equilíbrio térmico, com a temperatura dos elétrons sendo sempre superior àquela do gás, devido à energia extra ganha por aqueles nas colisões. O fenômeno é muito pronunciado em baixas pressões, com uma diferença de temperatura maior do que 1250 K à 10^{-2} N/m², enquanto é menor do que 100 K à 10 N/m².

A alta temperatura existente na coluna mantém o gás suficientemente ionizado para que seja condutor, existindo um fluxo de alta velocidade sempre do eletrodo para a peça.

Arcos de “alta temperatura” (TIG a 400 A, por exemplo) perdem calor principalmente por radiação, enquanto que nos de “baixa temperatura” (eletrodo revestido, por exemplo) a perda é por condução, podendo ser aferida pelo número de Peclet (P_e) dado a seguir:

$$P_e = \frac{\rho VLC_p}{K} \quad [2.3]$$

onde:

ρ = Massa específica do gás (kg/m^3);

V = Velocidade do gás (m/s);

C_p = Calor específico à pressão constante ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$);

K = Condutividade térmica ($\text{J.s}^{-1}.\text{K}^{-1}.\text{m}^{-1}$);

L = Comprimento típico (~ 2 mm).

Portanto, se $P_e=10$ há predominância de convecção, enquanto que $P_e=1$ ou menos implica em perda de calor por condução, o que é típico para arcos operando em pressão menor do que a atmosférica.

Por outro lado, o calor de radiação produzido por um arco elétrico é dado por:

$$P_{ra} = 0,057 \cdot \varepsilon \cdot A \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad [2.4]$$

onde:

ε = Emissividade do arco;

A = Área da superfície lateral do arco;

T = Temperatura do arco.

Entretanto, o valor correto da emissividade é de difícil determinação e os dados são geralmente apresentados como a densidade de potência do arco (P_{ra}/A), ou perda por radiação, em função da temperatura para diversos valores de ε .

Por sua vez, a perda por convecção pode ser calculada por:

$$P_{cv} = A \cdot k \cdot B \cdot Re^m \cdot P_r^n \cdot \frac{\Delta H}{d \cdot C_p} \quad [2.5]$$

onde:

A = Área sobre a qual o arco atua;

k = Condutividade térmica do gás;

B, m, n = Constantes a serem determinadas para a geometria particular;

Re = Número de Reynolds (VD/m);

r = Densidade do gás;

v = Velocidade do fluxo de gás;

d = Dimensão característica do fluxo;

h = Viscosidade do gás;

P_r = Número de Prandtl ($C_p \cdot h / K$);

C_p = Calor específico do gás;

ΔH = Diferença de entalpia entre o gás na temperatura ambiente e aquela do plasma.

Valores para “m” e “n” e “B” acima foram estimados como 0,5; 0,33 e 0,76, respectivamente, para o caso de soldas em chapas planas, apesar de que “B” pode variar em até 40%.

JATO DE PLASMA

Na soldagem há um fluxo de partículas se dirigindo, sempre, do eletrodo para a peça. Esse jato pode, ou não, conter vapor do material que compõe o eletrodo; ocorre em qualquer pressão e possui quatro prováveis fontes, as quais são:

- Explosão de gás (microporosidades) no interior do eletrodo, com a ejeção de partes do mesmo, muitas vezes não fundidas. Também pode ocorrer ebulição do material do eletrodo;
- Vaporização nos pontos catódicos de metal; óxidos, ou outras impurezas sobre o eletrodo, devido à interação de partículas carregadas com a superfície;
- Reações que geram gases, particularmente oxidação do carbono no aço produzindo CO e CO_2 ;
- Fluxo de gás no sentido da peça, devido à constrição no eletrodo;

Os três primeiros casos se originam na superfície do eletrodo e são chamados jatos anódicos. O último é denominado jato de plasma e ocorre na coluna do arco, resultando na “rigidez” e “força” do arco.

A rigidez deve ser entendida como a dificuldade em deslocar o arco, quando uma força transversal é aplicada sobre o mesmo. Em soldagem, o deslocamento lateral pode ser provocado por: (a) Movimento da raiz do arco sobre a superfície do eletrodo; (b) Movimento relativo do arco e atmosfera em que o mesmo está imerso (vento, etc.); (c) Campos magnéticos transversais. É fácil compreender, que é tanto menor a possibilidade do arco ser deslocado, quanto maior for a velocidade axial (V) do mesmo, a qual é dada por:

$$V = \frac{3}{8} \frac{F}{\pi r \eta} \quad [2.6]$$

onde:

F = Força axial do arco = $\mu_o \cdot I^2 / 8\pi$;

μ_o = Permeabilidade (espaço livre);

I = Corrente do arco;

r = Distância desde a ponta do eletrodo;

η = Viscosidade do gás.

Típicamente, uma corrente de 150 A provoca um plasma com velocidade axial superior a 100 m/s (ou 360 km/h). Outrossim não é difícil se verificar pela equação 2.6, que existe um diferencial de pressão entre a ponta do eletrodo e a peça.

DEFLEXÃO MAGNÉTICA

Um condutor, quando percorrido por uma corrente elétrica, gera um campo magnético, conforme mostrado na **Fig. 2.2**, resultando numa possível deflexão do arco ("sopro magnético"), provocada pelo produto (vetorial) da densidade do fluxo magnético (B) pela densidade de corrente (j).

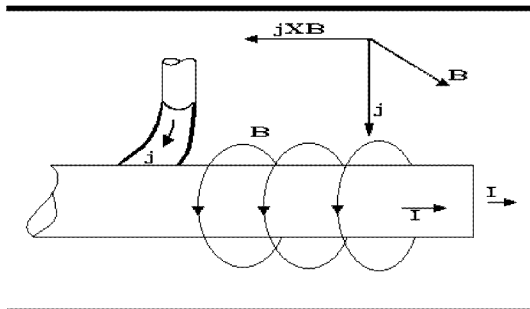


Figura 2.2 - Deflexão do Arco Elétrico, quando o Eletrodo está Próximo ao Cabo Terra (Cabo Retorno).

Na soldagem, os campos magnéticos gerados podem ser paralelo; transversal; ou longitudinal em relação ao eixo do arco, sendo que as principais causas da deflexão magnética são:

- Magnetismo residual da peça, originado por trabalho mecânico; corte térmico; solda ou mesmo ensaio não destrutivo por partículas magnéticas;
- Distorção do campo magnético provocado pela corrente do arco, conforme ilustrado na **Fig. 2.3(a-c)**.

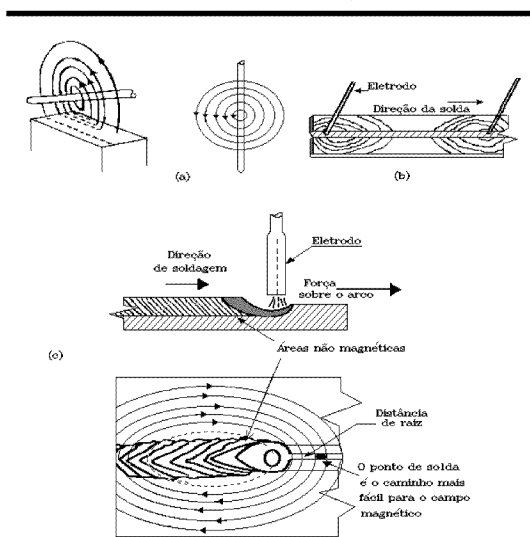


Figura 2.3 - Campo Magnético num Condutor Retilíneo e Distorção do mesmo por um Material Magnético.

Isso ocorre devido: (a) Assimetria existente no início ou fim da peça que está sendo soldada; (b) Em material ferromagnético, presença de regiões aquecidas acima da temperatura Curie, tornando-o paramagnético; (c) Abertura de raiz da junta à frente do arco, com a existência de um muito próximo "ponto" de solda (utilizado para posicionar a junta a minimizar distorção);

- Posição do cabo terra (ou cabo "retorno" da corrente) é um efeito bastante conhecido e de certa forma já ilustrado na **Fig. 2.2**, o qual é provocado pela interação dos campos magnéticos de "saída" e "entrada" da corrente. É interessante observar, que a magnitude da força de deflexão depende criticamente da largura da peça. Quando uma peça suficientemente larga é utilizada, a corrente flui em todas as direções desde o eletrodo, enquanto que para peças estreitas, a corrente flui quase diretamente para a posição onde se encontra conectado o cabo terra, provocando marcantes alterações na geometria do cordão.

Outrossim, é importante o fato de ser indiferente a polaridade do eletrodo em corrente contínua, sobre a direção da deflexão do arco, sendo o mesmo sempre impulsionado contrariamente à posição do cabo terra, ou borda da peça;

- Com corrente alternada (CA) a deflexão é reduzida, mas o efeito não é provocado diretamente pela alteração cíclica da polaridade. Na realidade, a CA induz correntes parasitas na peça as quais, por sua vez, geram um campo magnético oposto ao do arco.

Em peças relativamente estreitas, é possível ocorrer deflexão magnética em CA, devido à posição do cabo terra e insuficiente formação de correntes parasitas. Além disso, como consequência do fenômeno de "retificação inerente" em CA - veja item sobre "Estabilidade do Arco" mais adiante - há a formação de um componente de corrente contínua, resultando em possível deflexão do arco, bastante pronunciada em altas correntes de trabalho;

- Emprego de mais de um eletrodo (arame), soldando continuamente e relativamente próximos um do outro, conforme exemplificado o efeito nas **Figs. 2.4(a-c)**. Esse é um procedimento bastante utilizado no processo ao arco submerso, por exemplo. Como pode ser visto na citada figura, existem três casos possíveis: (a) Em eletrodos com diferentes polaridades, os campos magnéticos são aditivos e há deflexão no sentido oposto ao centro;

(b) Para os dois eletrodos com mesma polaridade (+ ou -), a deflexão ocorre no sentido do centro;
 (c) Quando um eletrodo é CC (+ ou -) e o outro CA, é esperada que muito pouca deflexão ocorra, mas deve ser considerado o explanado no item anterior.

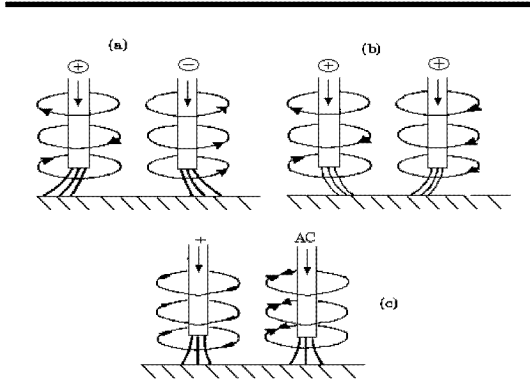


Figura 2.4 - Interação entre os Campos Magnéticos produzidos por Eletrodos Soldando Simultaneamente.

Uma análise quantitativa do problema foi realizada para o caso do uso de múltiplos eletrodos em arco submerso. Conforme mostrado na Fig. 2.5, são considerados os eletrodos “i” e “j” soldando conjuntamente, supondo que a corrente (alternada) se desloque linearmente desde o arco até o ponto de conexão do cabo terra, seguindo a linha do cordão sobre a superfície da chapa.

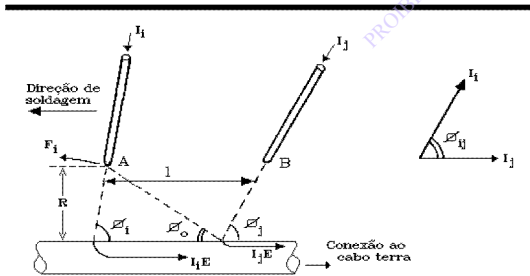


Figura 2.5 - Emprego de Múltiplos Eletrodos em Arco Submerso e Forças Magnéticas Resultantes.

A força eletromagnética por unidade de comprimento agindo sobre o eletrodo “i” no ponto “A” (F_i), é a soma da força entre os dois arcos (F_{iw}) e as forças devidas à interação com as correntes para o cabo terra (F_{iE} e F_{iE_j}), ou seja:

$$F_i = F_{iw} + (F_{iE} + F_{iE_j}) \quad [2.7]$$

onde F_{iw} é provocada por I_j , enquanto F_{iE} por I_i

(corrente do eletrodo “i”) e F_{iE_j} por I_j (corrente do eletrodo “j”).

As equações para forças agindo sobre condutores adjacentes são:

$$F_{iw} = (-\mu_0/4\pi) \cdot I_i \cdot I_j \cdot \cos \phi_{ij} \cdot [1 - \cos(\phi_i - \phi_j)] / (L \cdot \sin \phi_j) \quad [2.8]$$

$$F_{iE} = (\mu_0/4\pi) \cdot I_i^2 \cdot (1 + \cos \phi_i) / R \quad [2.9]$$

$$F_{iE_j} = (\mu_0/4\pi) \cdot I_i \cdot I_j \cdot \cos \Theta_{ij} \cdot (1 - \cos \phi_j) / R \quad [2.10]$$

onde:

μ_0 = Permeabilidade em espaço livre;

L = Distância entre os eletrodos;

R = Distância entre o ponto “A” e a superfície da peça;

ϕ_i e ϕ_j = Ângulos de inclinação dos eletrodos “i” e “j”, respectivamente;

Θ_{ij} = Ângulo de fase entre as correntes I_i e I_j em corrente alternada.

Dessa forma, quando os eletrodos estão muito próximos (ou seja, L/R é pequeno) é possível prever que a força entre os dois arcos (F_{iw}) domina e o arco sofre deflexão no sentido da posição do cabo terra. Entretanto, quando o valor de L/R é grande (os eletrodos estão afastados) o arco tenderá a sofrer deflexão no sentido da soldagem.

Caso ocorra o problema de deflexão magnética do arco dispõe-se, essencialmente, de duas opções, as quais são:

□ Eliminar a deflexão, ou reduzi-la a níveis aceitáveis.

Neste caso, algumas atitudes a serem tomadas, dependendo da origem do problema, podem ser:

- Remoção do magnetismo residual através de desmagnetização, o que pode ser conseguido colocando a peça no interior de uma bobina (ou cabos de máquina de soldar enrolados em espiras). Inicia-se aplicando uma relativamente alta corrente CA, a qual é posteriormente diminuída;

- Correção da distorção do arco provocada pelo seu campo magnético. Nesse caso, normalmente e quando possível, altera-se a corrente de CC para CA. Não se resolvendo o problema, ou não sendo essa uma solução viável, a solda pode ser realizada numa dada seqüência, ou ser adicionada uma chapa sob a junta (denominada “mata-junta”, ou “cobre-junta”), conforme mostrado nas

Figs. 2.6(a,b), respectivamente. Outra solução, é soldar em direção de pontos de solda relativamente grandes colocados no chanfro.

- Distribuição de vários pontos de conexão do cabo terra, ou alterando o sentido da soldagem, de forma a alterar o campo eletromagnético gerado pela peça.

□ Aumentar a rigidez do arco

Esse efeito pode ser obtido, através do aumento da corrente; diminuição da tensão; ou uso de eletrodo de menor diâmetro. Entretanto, o tipo de gás de proteção; do revestimento e outros fatores, influem decisivamente sobre o problema.

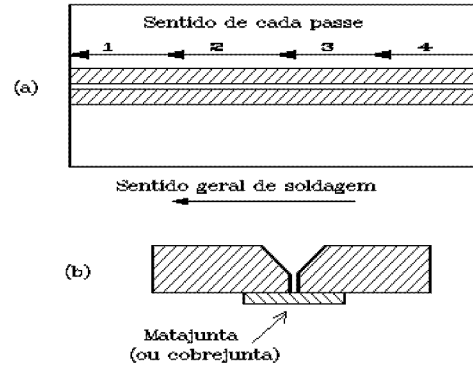


Figura 2.6 - Técnicas de Soldagem para Minimizar a Deflexão Magnética do Arco.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO ARCO

O arco elétrico na soldagem apresenta algumas peculiaridades, tais como:

- O arco comporta-se como uma resistência elétrica não ôhmica, com curvas Corrente x Tensão similares àquelas apresentadas na **Fig. 2.7**. Nessa figura, o processo com proteção gasosa eletrodo não consumível (TIG) é exemplificado. Note que são mostrados dois comprimentos de arco distintos (l_1 e l_2).

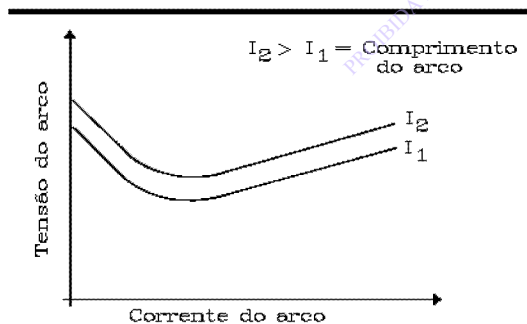


Figura 2.7 - Relação entre a Corrente e a Tensão do Arco Elétrico, para dois Comprimentos Distintos.

- A mesma figura mostra, que a tensão do arco aumenta com a distância entre o eletrodo e a peça, sendo $l_2 > l_1$. A tensão do arco, então, varia de acordo com a seguinte equação:

$$U = X + YI + \left(\frac{Z}{I}\right)L \quad [2.11]$$

onde:

$X = U_c + U_a =$ Constante (independente do comprimento do arco);

$U_c =$ Queda de tensão catódica;

$U_a =$ Queda de tensão anódica;

$Y =$ Constante (depende principalmente do material do eletrodo e da pressão ambiente);

$I =$ Corrente;

$Z/I =$ Gradiente de potencial na coluna do arco;

$L =$ Distância eletrodo/peça (comprimento do arco).

- Por questão de segurança, não deve ser utilizada alta tensão durante a soldagem. Para iniciar o arco, emprega-se pelo menos as seguintes três técnicas: (a) Corrente alternada de alta frequência, a qual rompe o dielétrico e ioniza o gás (esse método é usual, pelo menos, nos processos TIG e Plasma, mas pode afetar o funcionamento de aparelhos eletrônicos próximos); (b) Rápido curto-circuito entre a peça e o eletrodo, com separação dos mesmos antes que soldem, sendo o aquecimento suficiente para produzir partículas ionizadas (caso típico do processo com eletrodo revestido); (c) Contato entre o eletrodo e a peça, seguido de separação dos mesmos, sendo nesse instante aplicado um pulso de alta tensão, o qual inicia o arco (também utilizado no TIG).

- A pressão ambiente produz profundos efeitos sobre o arco elétrico na soldagem. O aumento da mesma provoca, de maneira geral, os seguintes efeitos: (a) Maior densidade de corrente na coluna

do arco; (b) Aumento da penetração; (c) Aumento da tensão; (d) Redução no diâmetro do arco; (e) Constrição da raiz do arco; (f) Corrente de transição mais alta (na alteração do modo de transferência de gota para aerossol - veja mais adiante).

A redução da pressão, por sua vez, produz efeitos inversos aos acima citados. Além disso, em pressões muito baixas (menores do que $2,5 \times 10^{-3}$ N/mm²) observa-se a formação de uma região esférica no cátodo, apresentando sinais de ionização dupla do argônio em TIG. Essa região é denominada zona do plasma do cátodo. Outro fenômeno que também ocorre, é o aumento do aquecimento do ânodo, atribuído à maior área de contato do mesmo com gás altamente ionizado.

▪ A existência do arco e sua estabilidade está intimamente relacionada com a condutividade elétrica; a baixa energia de ionização dos átomos envolvidos e a alta temperatura do mesmo. Portanto, nos processos que empregam fluxos (como o eletrodo revestido e arco submerso) são utilizados certos elementos químicos para estabilizar o arco, tais como sódio e potássio. Para a manutenção do arco em processos como o TIG, o gás de proteção deve ser de fácil ionização e é essencial que seja alta a emissão termoiônica do eletrodo não consumível. A mesma é influenciada pela adição ao tungstênio desses cátodos, de elementos tais como tório; cério; lantânio, ou zircônio.

DISSOCIAÇÃO E IONIZAÇÃO

Para o arco elétrico se manter durante a soldagem, é preciso que estejam disponíveis partículas carregadas eletricamente. Existindo moléculas de qualquer gás no dielétrico, essas deverão ser dissociadas e, devido a alta energia de vibração obtida pelo aquecimento dos elétrons, as mesmas são levadas ao estado monoatômico. Esse é o caso de gases tais como oxigênio, anidrido carbônico (CO₂) e outros, cuja dissociação da molécula é realizada segundo a seguinte equação:

$$\frac{4X^2}{(1-X^2)} = \frac{P_o}{P} \text{EXP}\left(\frac{-\Delta G}{RT}\right) \quad [2.12]$$

onde:

X = Fração dissociada do gás (decimal, adimensional);

P, P_o = Pressão em que o gás se encontra e pressão atmosférica, respectivamente (atm);

ΔG = Energia livre de formação;

R = Constante universal dos gases;

T = Temperatura absoluta (K).

Após a dissociação e a mais altas temperaturas, ocorre ionização dos átomos, conforme descrito pela seguinte equação (de Saha):

$$\frac{A^2}{1-A^2} = \frac{P_o}{P} \cdot C \cdot T^{\frac{5}{2}} \cdot \text{EXP}\left(\frac{-E_i}{RT}\right) \quad [2.13]$$

onde:

A = Grau de ionização (fração ionizada);

C = Constante de proporcionalidade;

E_i = Energia de ionização.

Dependendo da temperatura do arco, ou da região do mesmo, existem composições de equilíbrio para o gás que o forma. Um exemplo está na **Fig. 2.8**, a qual apresenta a densidade dessas partículas, em função da temperatura, para o nitrogênio (onde n_{N₂}=moléculas; n_N=átomos; n_{N⁺}=íons; n_e=elétrons).

Por sua vez, a **Tab. 2.1(a)** relaciona os potenciais de ionização de alguns gases que apresentam interesse para a soldagem, enquanto a **Tab. 2.1(b)** mostra os potenciais de ionização dos vapores metálicos.

Note-se que esse valores são menores do que os dos gases. Isso pode significar que os metais vaporizados tem grande influência na condutividade elétrica do arco.

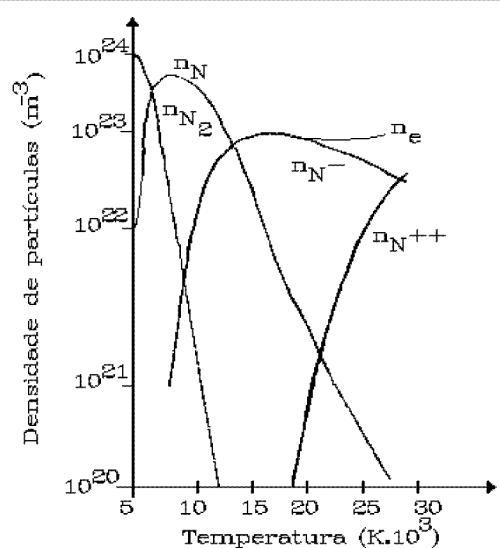


Figura 2.8 - Composição de Equilíbrio para o Plasma de Nitrogênio (Pressão Atmosférica).

Tabela 2.1(a) Potencial de Ionização de Alguns Gases

Gás	Potencial (eV)
Argônio	15,760 (11,548)
Dióxido de Carbono	13,77
Hidrogênio	15,43
Hidrogênio Atômico	13,598
Hélio	24,5876 (20,9643)
Monóxido de Carbono	14,1
Nitrogênio	15,58
Nitrogênio Atômico	14,534
Oxigênio	12,07
Oxigênio Atômico	13,618

Tabela 2.1(b) Potencial de Ionização de Alguns Vapores Metálicos

Elemento	Potencial (eV)	Elemento	Potencial (eV)
Alumínio (Al)	5,986	Lítio (Li)	5,392
Bário (Ba)	5,212	Magnésio (Mg)	7,646
Boro (B)	8,298	Molibdênio (Mo)	7,099
Cálcio (Ca)	6,113	Níquel (Ni)	7,635
Carbono (C)	11,260	Potássio (K)	4,341
Césio (Ce)	3,894	Silício (Si)	8,151
Cobalto (Co)	7,86	Sódio (Na)	5,139
Cobre (Cu)	7,726	Titânio (Ti)	6,82
Cromo (Cr)	6,766	Tungstênio (W)	7,98
Ferro (Fe)	7,870		

CONDUTIVIDADES ELÉTRICA E TÉRMICA. TEMPERATURA

O arco encontra-se num estado de quase equilíbrio térmico. A coluna do mesmo é simétrica e está em rotação, com a temperatura diminuindo desde seu centro (máxima) até a periferia e, também, do cátodo para o ânodo.

No estado estacionário, a energia (σE^2) gerada no arco é igual àquela perdida (por condução e radiação), sendo dada pela seguinte equação:

$$\sigma E^2 = \text{diver}(k\nabla T) + P_{ra}(T) \quad [2.14]$$

Considerando o arco com uma geometria cilíndrica, a equação acima se transforma em:

$$\sigma E^2 = -\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (kr \frac{dT}{dr}) + R(T) \quad [2.15]$$

onde:

σ = Condutividade elétrica;

E = Intensidade do campo elétrico;

r = Distância desde o eixo do arco;

T = Temperatura;

$R(T)$ = Taxa da perda de energia por radiação por unidade de volume.

Note-se que essa equação é de muito difícil solução, pois tanto k , quanto R , são funções complexas da temperatura. Adicionalmente, essa última variável depende das condições escolhidas e, simplificadamente, muitas vezes é omitida nos modelamentos desse fenômeno.

A distribuição da temperatura é importante, pois inferindo-a e assumindo conhecimento do campo elétrico (E), é possível calcular a densidade de corrente (j) por:

$$j = \sigma(T).E \quad [2.16]$$

Por sua vez, a intensidade dessa corrente é obtida por:

$$I = \int_0^{\infty} r \cdot j(r) dr \quad [2.17]$$

Entretanto, a distribuição real da densidade de corrente sobre a superfície da peça soldada não é dada pela equação 2.17, pois existem complicadas interações eletromagnéticas e convecção no interior do arco. Apesar disso, essas equações permitem um melhor entendimento dos mecanismos envolvidos.

Por outro lado, quanto maior k , mais elevada a dissociação e a ionização do gás envolvido, sendo a condutividade térmica total dada por:

$$k = k_c + k_e + k_d + k_i \quad [2.18]$$

onde cada fator é fruto de:

k_c = átomos + íons + moléculas;

k_e = elétrons;

k_d = dissociação;

k_i = ionização.

Portanto, gases moleculares possuem um componente de dissociação não existente nos monoatômicos e, conseqüentemente, tem maior condutividade térmica.

A **Fig. 2.9** ilustra as isothermas de um arco elétrico, nesse caso provocado pelo processo TIG, com comprimento de 5 mm, operando à 200 A e 12 V. Observe-se que a temperatura do arco tanto decresce desde seu eixo para a periferia, quanto do cátodo para o ânodo.

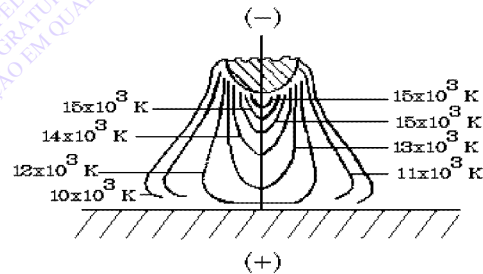


Figura 2.9 - Distribuição das Isothermas em um Arco Elétrico (TIG sem Fusão do Metal Base).

Outro fato importante, é que quanto maior a condutividade elétrica, mais aumenta a estabilidade do arco. Entretanto, o decréscimo dessa propriedade física é acompanhado pela diminuição da densidade de corrente no mesmo. A **Fig. 2.10** apresenta a relação entre temperatura e condutividade térmica para o argônio, hélio e ar, enquanto a **Fig. 2.11** ilustra a temperatura e condutividade elétrica para esses gases. Portanto, a **Fig. 2.9** e as duas últimas, permitem entender porque o hélio produz um arco “mais quente” do que o argônio, para mesmas condições de soldagem. Como resultado, quando estiver sendo empregado argônio, a corrente deve aumentar em aproximadamente 50%, quando comparada com aquela que se utilizaria com o hélio, para obter a mesma potência elétrica.

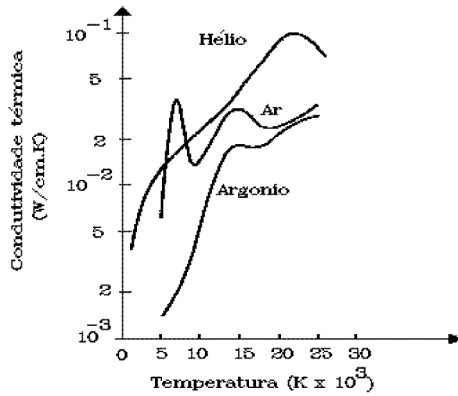


Figura 2.10 - Condutividade Térmica em Função da Temperatura, para os Gases Argônio, Hélio e Ar.

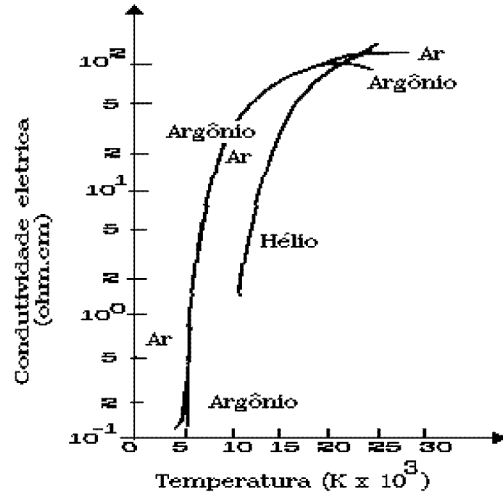


Figura 2.11 - Condutividade Elétrica em Função da Temperatura, para os Gases Argônio, Hélio e Ar.

ENTALPIA

A quantidade de calor (H) contida numa unidade de volume (ou massa) de um gás é dada por:

$$H = C \times T \quad [2.19]$$

onde “C” é o calor específico do gás à temperatura “T”. A Fig. 2.12 apresenta a relação entre temperatura e entalpia para diversos gases. Note-se que a eficiência térmica dos gases monoatômicos, é similar à dos moleculares numa relativamente baixa temperatura (menor do que 8000 K). Entretanto, acima dessa temperatura os gases moleculares são mais rentáveis energeticamente, fato que pode ter importância em processos de corte a arco (Plasma).

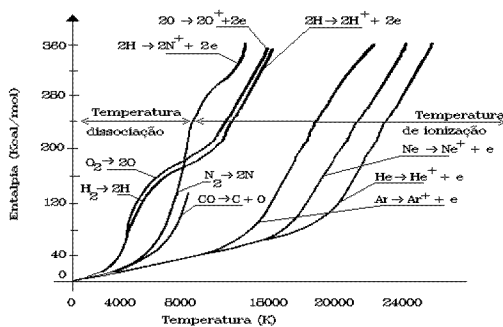


Figura 2.12 - Entalpia em Função da Temperatura no Arco Elétrico, para os Gases Oxigênio (O); Hidrogênio (H); Nitrogênio (N); Argônio (Ar) e Hélio (He).

VISCOSIDADE DINÂMICA

Num processo com proteção gasosa, a viscosidade do gás é importante para o dimensionamento do bocal e definição da vazão a ser utilizada. Quanto maior essa propriedade física, menor a possibilidade do fluxo de gás ser turbulento, conforme a seguinte equação mostra:

$$R_e = \frac{DV\rho}{\eta} \quad [2.20]$$

onde:

- R_e = Número de Reynolds;
- V = Velocidade média do gás;
- r = Densidade do gás;
- h = Viscosidade dinâmica do gás;
- D = Diâmetro do bocal.

Para que não ocorra turbulência, o número de Reynolds deve ser menor que 2300.

Por sua vez, a Fig. 2.13 apresenta o comportamento da viscosidade com a temperatura para os gases argônio e hélio. Como pode ser observado, até cerca de 13.000 K a viscosidade do argônio é maior do que a do hélio, se invertendo a dita tendência acima dessa temperatura, devido à maior ionização do argônio.

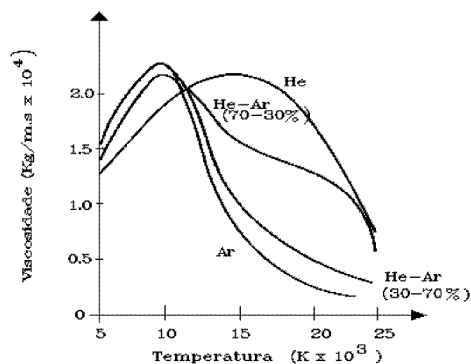


Figura 2.13 - Viscosidade em Função da Temperatura do Arco Elétrico, para os Gases Argônio e Hélio.

PROPRIEDADES FÍSICAS GERAIS

A **Tab. 2.2** apresenta algumas propriedades físicas dos gases mais importantes para a soldagem. Por sua vez, encontra-se na **Tab. 2.3** a composição do ar atmosférico e são relacionadas características e modos de obtenção de alguns dos gases que o compõe.

Tabela 2.2 Algumas Propriedades Físicas de Importantes Gases de Proteção

Propriedade	Gás				
	H ₂	CO ₂	N ₂	Ar	He
Peso Específico à 21 °C (kg/m ³)	0,084	1,833	1,161	1,656	0,167
Volume Específico à 21 °C (m ³ /kg)	11,89	0,545	0,861	0,604	5,999
Ponto de Ebulição Normal (°C)	-252,89	-78,51	-195,81	-185,88	-268,94
Calor Específico (Pressão Constante) à 21 °C e 1 atm (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1490	846,9	1041	521,3	5192
Calor Específico (Volume Constante) à 21 °C e 1 atm (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1077	653,4	742,2	312,1	3861

Tabela 2.3 - Composição do Ar Atmosférico; Características e Modos de Obtenção de Alguns Gases

Composição (% Volume) do Ar Atmosférico	
Nitrogênio: 78,1	Oxigênio: 20,9
Argônio: 0,93	Neônio: 0,0018
Kriptônio: 0,0014	Xenônio: 0,0000086
Hélio: 0,00052	Dióxido de Carbono: 0,03
Hidrogênio: 0,00005	Ozônio: 0,00004
Metano: 0,00015	Óxido Nitroso: 0,00005

Características e Obtenção de Alguns Gases

- Nitrogênio: Incolor; inodoro; insípido; não combustível; diatômico (peso atômico=14). Pode formar monóxido e dióxido de nitrogênio (ambos tóxicos). Obtenção: Liquefação do ar.

- Hélio: Incolor; inodoro; insípido; incombustível; monoatômico (p. atm.=4). Obtenção: Desde minas (E.U.A e Canadá) principalmente.

- Argônio: Quimicamente inerte; insípido; inodoro; incolor; não tóxico; incombustível; monoatômico (p. atm.=18). Obtenção: Destilação fracionada do ar líquido, ou como sub-produto da fabricação de amônia.

- Dióxido de Carbono: Incolor (líquido); incombustível; levemente adocicado; estável; peso molecular=44,01. Obtenção: Produto secundário do nitrogênio e do hidrogênio na síntese da amônia, ou do processo de fermentação, quando o fermento age sobre o açúcar na produção do álcool; ou como gás resultante da queima de óleo, coque, ou carvão em caldeiras.

ESTABILIDADE DO ARCO

Uma das formas de iniciar o arco, é através do aquecimento por curto-circuito e posterior afastamento do eletrodo da peça. Entretanto, se a corrente sofrer interrupção por algum motivo (mesmo num curto intervalo de tempo) e após for aplicada a mesma tensão inicial, o arco geralmente se extinguirá. Porém, o arco sofrerá re-ignição, se nesse instante o cátodo ainda não tiver esfriado abaixo da mínima temperatura necessária para que emita elétrons, ou existir uma tensão convenientemente alta.

Esta re-ignição poderá ocorrer em corrente contínua, mas com corrente alternada há alteração na polaridade dos eletrodos e conseqüente interrupção da corrente, tornando o problema da estabilidade do arco ainda mais complexo, principalmente no caso em que o eletrodo não é consumível (como TIG, por exemplo).

A Fig. 2.14 mostra que a re-ignição pode ser facilitada, defasando a corrente em relação à tensão. Esse efeito pode ser obtido pela inserção de suficiente indutância no circuito.

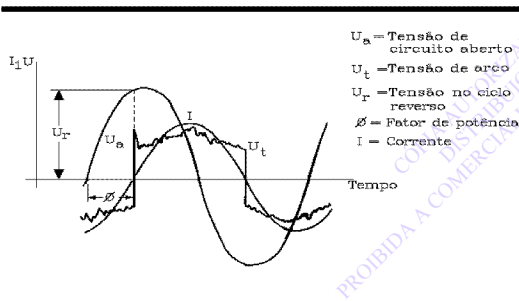


Figura 2.14 - Defasagem da Corrente em Relação à Tensão, para um Arco Elétrico em CA.

Denomina-se oscilograma à forma gráfica da variação com o tempo da corrente e tensão instantâneas. Partindo-se desses oscilogramas, é possível obter curvas que representam a variação da tensão em função da corrente, num dado intervalo de tempo. Na Fig. 2.15 é ilustrada essa relação, tanto para a fase positiva, quanto negativa do ciclo. Com o aumento da corrente, há um correspondente crescimento da tensão (em ambas as fases) até um máximo “P” (ou P’), quando esta começa a decrescer. Quanto maior esse valor de pico, mais instável é o arco, com essa instabilidade tendendo a diminuir se ocorrer um, ou vários dos seguintes fatos: (a) Aumento da freqüência da tensão; (b) Inserção de indutância no circuito; (c) Existência de elementos químicos de baixo poten-

cial de ionização no arco; (d) Eletrodos de alta emissividade eletrônica.

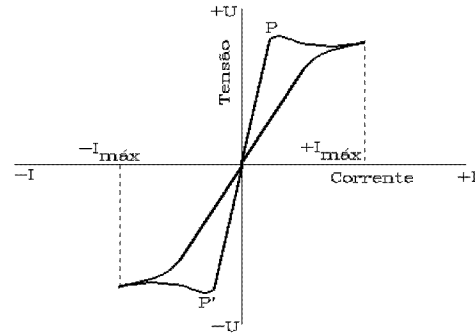


Figura 2.15 - Variação da Tensão em Função da Corrente (CA), num dado Intervalo de Tempo.

Por sua vez, a Fig. 2.16 apresenta oscilogramas relativos à variação instantânea da tensão e corrente no processo eletrodo revestido (neste caso, em soldagem subaquática molhada). Esses oscilogramas auxiliam na avaliação da estabilidade do arco e sobre qual o modo de transferência do metal para a peça que está ocorrendo, como posteriormente será visto.

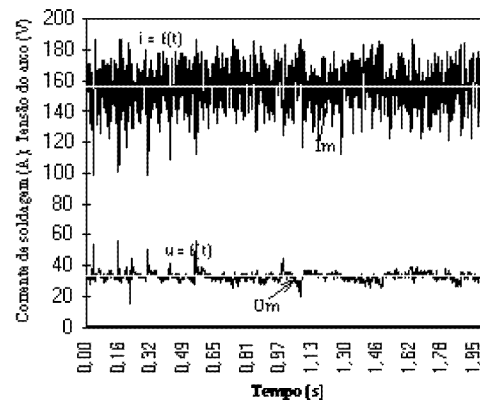


Figura 2.16 - Oscilograma do Processo com Eletrodo Revestido (Soldagem Subaquática “Molhada”).

Praticamente, há várias maneiras de se obter satisfatória re-ignição do arco em processos no qual o eletrodo não é consumível, tais como:

- Utilizar um bem projetado transformador, que possua baixa inércia elétrica, em conjunto com uma fonte geradora de alta frequência (350 kHz a 3 MHz) e tensão (até 4000 V), a qual deve ser desligada quando a solda inicia.

Existem desvantagens nesta configuração, pois é necessária uma tensão de circuito aberto (ou seja, aquela imediatamente antes do início da soldagem, quando ainda não há arco aberto) muito alta ($\cong 100$ V) e fator de potência baixo, porque deve ser disponível alta tensão com corrente zero. A demora no re-início do arco leva à uma descontinuidade na forma da onda da corrente, ocorrendo uma retificação parcial. Em casos extremos, a tensão de circuito aberto pode ser muito pequena e o arco não re-iniciará no mesmo ciclo positivo. Essa é uma condição insatisfatória para a soldagem, porque: (a) Na soldagem de materiais que formam óxidos refratários, tal como o alumínio, não será exercida a ação mecânica de quebra desta camada, a qual impede a realização da solda; (b) O transformador será sobrecarregado pela saturação com corrente contínua.

- Com a unidade de alta frequência funcionando durante a realização da solda. Neste caso, a alta frequência deve ser gerada quando a corrente passa de zero.

- Uso de um injetor de sobretensão, obtida pela descarga de um capacitor, automaticamente acionado pela fonte, quando a corrente é zero. A re-ignição é instantânea, eliminando o problema de retificação parcial, além de ser baixa a tensão de circuito aberto ($\cong 50$ V), com conseqüente melhora do fator de potência. Entretanto, o injetor de sobretensão não inicia o arco e deve ser utilizada uma unidade de alta frequência, a qual é desligada após o início da solda.

Outro fenômeno importante a ser considerado na soldagem com corrente alternada, é aquele relativo ao desequilíbrio existente entre os meio ciclos positivo e negativo. No caso (de raro interesse na soldagem) em que o eletrodo não consumível é de material similar ao

metal base, nota-se que tanto o período de tempo para abrir o arco, quanto aquele no qual o mesmo permanece desligado, é inversamente proporcional à tensão de circuito aberto. Para materiais diferentes, verifica-se o seguinte: (a) Quanto maior a tensão de circuito aberto, mais semelhantes são os períodos de tempo de atuação dos meio ciclos positivo e negativo, sendo necessário, entretanto, acima de 180 V (!) na soldagem TIG do alumínio, por exemplo, o que atenta contra as Normas de segurança; (b) O arco permanece mais tempo aberto no meio ciclo negativo do que no meio ciclo positivo; (c) A soma das quedas catódica e anódica é diferente quando o cátodo está no eletrodo ou na peça (geralmente o material com menor emissividade eletrônica na soldagem TIG, pois o eletrodo é de tungstênio) e isso resulta na tensão do arco ser maior e a corrente menor no meio ciclo positivo. O efeito é conhecido como retificação inerente e é independente da re-ignição.

Como resultado, há um componente de corrente contínua, o qual tende a saturar o transformador, fazendo com que somente possa ser utilizado cerca de 70% da sua potência total. Além disso, em altas correntes essa componente CC pode provocar deflexão magnética do arco e ser gerado mais calor na peça, enquanto que em corrente alternada “pura” a distribuição deveria ser igual. É possível corrigir este desequilíbrio, através da inserção de um grande capacitor no circuito.

A quantificação da estabilidade do arco arco é difícil. Existem algumas propostas, entre as mesmas, aquela que define esse fator como a taxa média do aumento da condutividade elétrica do arco durante sua re-ignição. Entretanto, nenhuma das soluções até o momento oferecidas é plenamente satisfatória. No LS&TC estão sendo desenvolvidos métodos originais, os quais permitem aquisição de corrente e tensão instantâneas em muito altas taxas, além de sofisticados tratamentos estatísticos dos dados. Entretanto, até esse momento (outono de 1996) não existe um volume suficiente de dados para se formular uma teoria conclusiva sobre o assunto.

TRANSFERÊNCIA DE MASSA

INTRODUÇÃO

O modo de transferência e a taxa com que o metal de adição se projeta do eletrodo consumível para a peça, são questões de muita importância na soldagem.

Esse fenômeno influi diretamente sobre itens, entre outros, tais como estabilidade do arco; perda por salpico (ou seja, metal fundido que é projetado para fora da poça de fusão); composição química e defeitos no metal de solda. O mesmo age parcialmente, ainda, sobre a taxa de transferência (e, conseqüentemente, sobre a taxa de deposição, como será visto) que é um dos principais fatores na análise dos custos da soldagem.

Por outro lado, é importante ficar claro que o fenômeno do modo de transferência na soldagem ainda não está completamente entendido, apesar do grande volume de pesquisas devotado ao mesmo.

Pela análise dos diversos processos de soldagem disponíveis, foi constatado que existem variados modos de transferência. Além disto, para um dado processo o modo de transferência depende das condições específicas de soldagem, ou seja, da combinação de alguns dos seguintes fatores: (a) Corrente e tensão; (b) Polaridade do eletrodo; (c) Densidade de corrente; (d) Material do eletrodo; (e) Diâmetro do eletrodo; (f) Extensão do eletrodo após o ponto do contato elétrico; (g) Tipo de gás de proteção; (h) Tipo de revestimento do eletrodo ou fluxo; (i) Características estáticas da máquina de solda; (j) Pressão do ambiente.

Os fatores acima citados não são, certamente, os únicos a influírem no fenômeno em questão, o que demonstra a grande complexidade do mesmo.

Outrossim, sempre haverá a tensão superficial, que atua tanto sobre a transferência (impedindo o desprendimento da gota), quanto na geometria e estabilidade da poça de fusão, bem como nos processos de Brasagem e Solda Branda, onde é o agente responsável pelo molhamento e preenchimento da junta - sem fusão do metal base. Para estudá-la, é útil se entender o conceito de energia livre associado com uma interface, o qual pode ser apreciado considerando a energia livre total de dois sistemas, como consistindo de duas fases com volumes V_1 e V_2 em contato. Portanto, a energia livre total (G -de Gibbs) é:

$$G = G_1V_1 + G_2V_2 + \gamma_{12}A_{12} \quad [2.21]$$

onde:

G_1, G_2 = Energia livre das fases "1" e "2", respectivamente;

A_{12} = Área da interface separando as fases;

γ_{12} = Energia livre (de Gibbs) por unidade de área da interface.

A energia livre interfacial por unidade de área (ou "energia livre de superfície") corresponde, então, ao trabalho necessário para criar uma unidade de área da interface (J/m^2). Entretanto, é a "tensão superficial" da interface que é usualmente medida. Entre dois fluidos, a tensão superficial é a força agindo ao longo da unidade de comprimento da interface (N/m), a qual é, numericamente, igual à energia de superfície. Isto não necessariamente ocorre, porém, se pelo menos uma das fases for sólida e nesse caso o valor considerado deve ser o da energia de superfície.

Sendo os ângulos de intersecção entre fases aqueles mostrados na **Fig. 2.17**, quando um sistema está em equilíbrio, é possível calcular os valores das tensões superficiais correspondentes por:

$$\frac{\gamma_{23}}{\sin a} = \frac{\gamma_{13}}{\sin b} = \frac{\gamma_{12}}{\sin c} \quad [2.22]$$

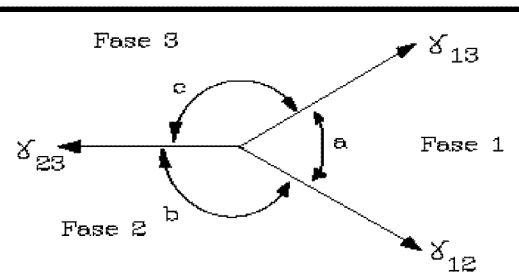


Figura 2.17 - Tensões Superficiais e Ângulos de Intersecção entre as Fases (sistema em equilíbrio).

Ainda que não usualmente aplicável à interface líquido-sólido, o equilíbrio de uma gota sésil sobre uma superfície sólida pode ser dada por (**Fig. 2.18**):

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta \quad [2.23]$$

Por sua vez, ocorrerá perfeito molhamento se:

$$\gamma_{sv} \geq \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \quad [2.24]$$

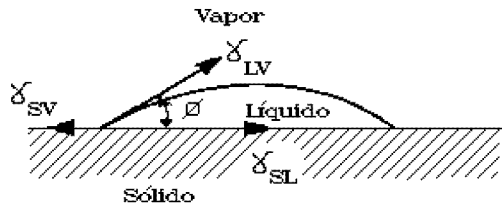


Figura 2.18 - Equilíbrio de uma Gota Sésil sobre uma Superfície Sólida.

Esta é uma situação desejável na união dos materiais, principalmente em brasagem e solda branda.

Na soldagem por fusão, pode-se considerar um “ângulo de solidificação- ϕ ”, além do “ângulo da fase líquida- θ ” (Fig. 2.19), dado por:

$$\gamma_{sv} \cdot \cos\phi = \gamma_{lv} \cdot \cos\theta + \gamma_{sl} \quad [2.25]$$

A equação acima aparentemente é útil para a previsão do perfil da poça de fusão, sendo que investigações nessa área poderão levar a uma melhor compreensão da influência das tensões superficiais na soldagem.

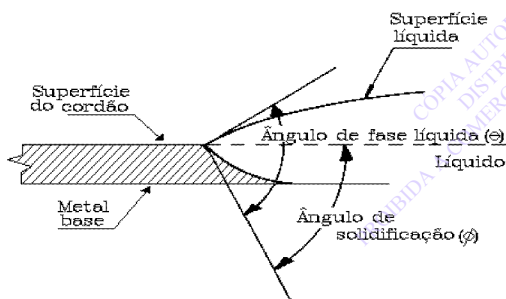


Figura 2.19 - Ângulos de Solidificação (ϕ) e da Fase Líquida (θ), na Poça de Fusão.

MECANISMOS

Existem duas principais teorias que tentam explicar porque ocorre a transferência de metal desde o eletrodo para a peça. Adicionalmente, a teoria da força do plasma e a da velocidade crítica procuram demonstrar como se processa a transição entre os modos de transferência.

As teorias atualmente mais aceitas são:

□ Teoria do Equilíbrio das Forças Estáticas

Diversas forças agem sobre o metal líquido na ponta do eletrodo, conforme ilustrado na Fig.

2.20, com o arco ocorrendo na área anódica da gota descrita por “Q”, com diâmetro “2a” e arame com diâmetro “2b” (Fig. 2.21). Portanto, a transferência depende do equilíbrio entre: (a) Força devido à aceleração da gravidade (F_g); (b) Força de arraste, como consequência do fluxo de plasma (F_a); (c) Força eletromagnética (F_e); (d) Força devido à tensão superficial (F_γ), a qual se opõe a todas as outras.

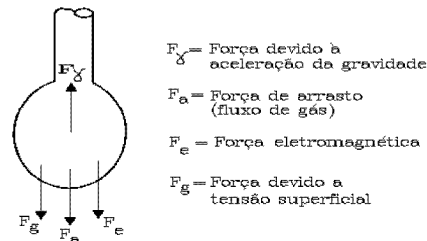


Figura 2.20 - Ação das Forças sobre o Metal Líquido na Ponta do Eletrodo.

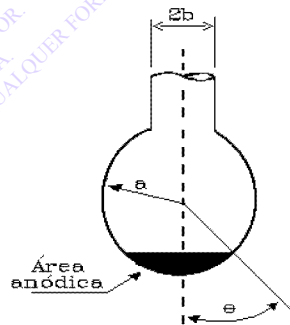


Figura 2.21 - Geometria de Uma Gota e Área Anódica Formada.

Então, a gota se separa quando:

$$F_\gamma < F_g + F_a + F_e \quad [2.26]$$

Os diversos componentes dessa equação são:

- Força Devido à Aceleração da Gravidade:

$$F_g = m_g \cdot g \quad [2.27]$$

sendo m_g a massa da gota e g a aceleração da gravidade.

- Força de Arraste

$$F_a = \frac{\pi}{2} \cdot V^2 \cdot \rho_g \cdot R_g^2 \cdot C_a \quad [2.28]$$

onde:

V = Velocidade do jato de plasma;

r = Densidade do plasma;

R_{ig} = Raio da gota imersa do plasma;

C_a = Coeficiente de arraste, o qual depende fortemente do número de Reynolds e, em menor escala, da densidade de corrente.

• Força Eletromagnética

$$F_e = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \left[\ln \frac{a \operatorname{sen} \theta}{b} - \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{1 - \cos \theta} \right) + \frac{2}{(1 - \cos \theta)^2} \ln \frac{2}{1 + \cos \theta} \right] \quad [2.29]$$

sendo que as dimensões “a”, “b” e “Q” já foram apresentadas na **Fig. 2.21**. Observe-se que “Q” é a metade do ângulo relativo à superfície da raiz do arco, ou seja, à área da qual a corrente é transferida do eletrodo para o arco.

▪ Força Devido à Tensão Superficial

$$F_\gamma = m_m \cdot g \quad [2.30]$$

onde m_m é a máxima massa da gota que pode ser suportada pela ponta do eletrodo, dependendo do raio deste e da constante de capilaridade a qual, por sua vez, é função da energia livre de superfície.

□ Teoria da Instabilidade devido à Constrição (“pinch”)

Essa teoria se baseia no modelo da instabilidade de uma coluna líquida cilíndrica, a qual se transforma em gotas - com menor energia livre - devido à um distúrbio do seu comprimento de onda característico.

Aplicada à transferência do metal líquido, a força eletromagnética auto-induzida aumenta a transformação da coluna em gotas e o comprimento crítico dessa onda (λ_c) é aproximadamente dado por:

$$\lambda_c = \frac{2\pi r}{\left[1 + \frac{\mu_0 I^2}{2\pi^2 R_c} \right]^{1/2}} \quad [2.31]$$

onde:

r = raio do eletrodo;

R_c = raio crítico da gota.

Portanto, essa equação mostra que o comprimento de onda crítico da coluna líquida diminui com o aumento da corrente de soldagem, sendo reduzido, assim, o diâmetro da gota transferida.

Apesar do conveniente modelo para alguns modos de transferência, ambas as teorias acima apresentadas não explicam satisfatoriamente o efeito da extensão do eletrodo, nem o caso de repulsão da gota. Adicionalmente, existem também as seguintes hipóteses sobre a transferência:

□ Pressão sobre os pontos catódicos

O metal líquido é comprimido no cátodo, resultando em deslocamento do mesmo para outro local. O arco se transfere para essa nova posição e, mais uma vez, a comprime. É criado um movimento oscilatório (vai e vem), o qual resulta eventualmente num curto-circuito da gota com a peça. O metal se transfere, então, para a poça de fusão, com separação final provocada pela força devido à instabilidade (efeito “pinch”).

É provável, também, que a depressão criada na gota líquida seja devida às reações dos vapores emitidos desde o recobrimento e/ou metal dos eletrodos. Neste caso, não seria necessário curto-circuito para ocorrer a separação da gota, pois somente as forças eletro-magnéticas envolvidas já seriam suficientemente para realizar a transferência.

□ Teoria da Evolução de gases

Outro mecanismo que pode provocar a transferência, é a formação de bolhas de gases no interior da gota líquida. Essas bolhas aumentam de volume e, eventualmente, a pressão interna se torna maior do que a energia livre de superfície do metal no qual as mesmas estão imersas, provocando a transferência de gotículas.

□ Efeito Motor

Nesse caso, há força resultante quando ocorre desvio no caminho percorrido pela corrente em transferência não-axial. As forças eletromagnéticas, que produzem rotação nos dois extremos de onde ocorre o desvio de corrente, provocam explosão de gota.

□ Jato de Plasma

Como visto, as forças eletro-magnéticas provocam no arco um fluxo de alta velocidade, sempre no sentido do eletrodo para a peça. Entretanto, provavelmente esse fluxo é responsável somente pela aceleração de gotículas já livres, não sendo suficientemente intenso para separar, por si só, gotas desde o eletrodo.

MODOS DE TRANSFERÊNCIA

Com bases nas informações disponíveis, é possível classificar os modos de transferência que ocorrem na soldagem. O International Institute of Welding (IIW) realizou tal tarefa, sendo ilustrado na Fig. 2.22 os principais casos. O modo de transferência para um dado processo pode ser alterado através das condições específicas de soldagem, discriminadas na Introdução desse Capítulo. Quando do estudo de cada processo em particular, serão analisados e indicados os mais influentes fatores que atuam sobre esse fenômeno. De uma maneira geral, entretanto, não são muitas as condições que podem ser livremente escolhidas.

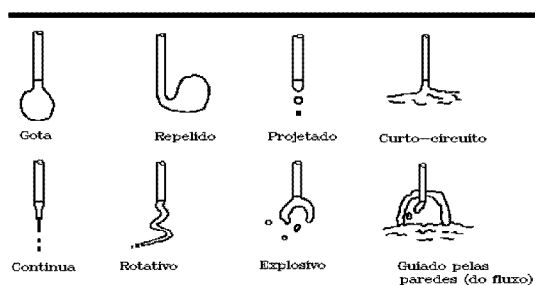


Figura 2.22 - Alguns Modos de Transferência do Metal desde o Eletrodo para a Peça (IIW).

Geralmente, os processos de soldagem a arco com eletrodo consumível utilizam polaridade positiva (CCEP), pois o ponto anódico se forma aproximadamente simétrico em torno da ponta do eletrodo, conduzindo à uma gota também simétrica em relação ao eixo do mesmo. Quando o eletrodo é negativo (CCEN), ocorre o mesmo tipo de transferência acima descrita, somente se o material do mesmo for refratário em processo de proteção gasosa, como o TIG, e quando é excedida a máxima densidade de corrente suportável. Entretanto, esse caso não apresenta interesse para a soldagem, pois um processo como o TIG é exatamente planejado para que o eletrodo não funda.

Com material do eletrodo não termoiônico, formam-se pontos catódicos móveis sobre sua superfície, sendo gerada uma força de reação que repele a gota para a lateral do eletrodo. Consegue-se restringir e fixar o ponto catódico sobre a ponta do eletrodo, através do uso de óxidos alcalinos (no revestimento do arame de eletrodos revestidos, por exemplo). Por sua vez, o aumento da pressão ambiente atua benéficamente nesse caso, pois em torno de cinco atmosferas no processo MIG com corrente contínua e eletrodo negativo (CCEN), a mes-

ma reposiciona axialmente a gota, conforme exibido na Fig. 2.23.

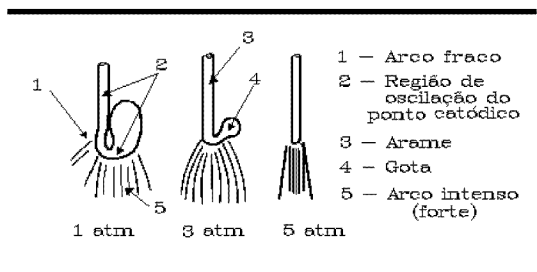


Figura 2.23-Efeito da pressão ambiente sobre o comportamento do ponto catódico (MIG - CCEN).

O efeito da corrente, tensão e diâmetro do arame são bastante pronunciados num processo como o MIG (eletrodo maciço consumível e proteção gasosa). Nesse caso, o metal pode ser transferido, pelo menos, por curto-circuito; globular; aerossol (“spray”); ou rotativo, ocorrendo transições em que mais de um modo existe simultaneamente. Com o aumento da corrente, há um ponto definido em que a transferência passa de globular para aerossol “puro” dependendo, principalmente, do material e diâmetro do eletrodo e tipo do gás de proteção. Por sua vez, a Fig. 2.24 apresenta esquematicamente a influência dos parâmetros de soldagem sobre os citados modos de transferência no processo MIG.

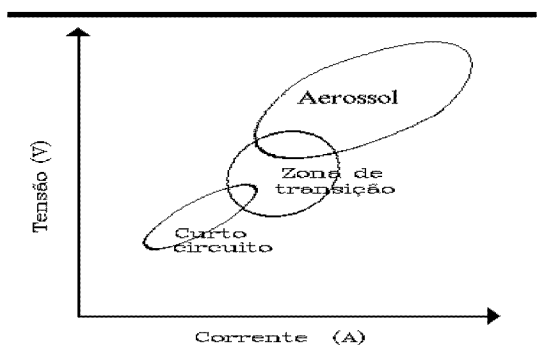


Figura 2.24-Principais modos de transferência no processo MIG.

Outrossim, a Tab. 2.4 apresenta a designação do modo de transferência, com exemplo do processo de soldagem que o mesmo ocorre e a força, ou mecanismo atuante.

É importante ser observado, que o processo de soldagem apresentado não é, em geral, o único que pode transferir o metal desde a ponta do eletrodo para a peça num dado modo.

Tabela 2.4 Classificação dos Modos de Transferência de Metal (Veja Fig.2.22)

Tipo de Transferência	Processo de Soldagem (exemplo)	Força ou Mecanismo Dominante
1. Vôo Livre		
1.1 Globular		
1.1.1 Gota	MIG (baixa corrente)	Gravidade e Constrição Eletromagnética
1.1.2 Repelido	MAG (CO ₂)	Reações Químicas Gerando Vapores
1.2 Aerossol ("spray")		
1.2.1 Projetado	MIG/MAG (corrente intermediária)	Instabilidade devido à Constrição Eletromagnética
1.2.2 Contínua	MIG/MAG (corrente média)	Eletromagnética
1.2.3 Rotativo	MIG/MAG (corrente alta)	Instabilidade devido à Deformação Eletromagnética
1.3 Explosivo	Eletrodo Revestido	Reações Químicas formando bolhas gasosas
2. Ponte		
2.1 Curto-Circuito	Eletrodo Revestido - MIG/MAG	Tensão Superficial + Forças Eletromagnéticas
2.2 Ponte sem Interrupção	TIG com vareta	Tensão Superficial + Forças Eletromagnéticas ("Arame Quente")
3. Protegido por Escória		
3.1 Guiado pelas Paredes (do Fluxo)	Arco Submerso	Química e Eletromagnética
3.2 Outros Modos	Arco Submerso - Arame Tubular - Eletroescória	

ENERGIA DE SOLDAGEM E MASSA FUNDIDA

Como será detalhado no volume dedicado à Metalurgia da Soldagem a ser publicado nessa série (especificamente no Capítulo sobre "Fluxo Térmico") é de grande importância o efeito da energia de soldagem sobre diversas características e propriedades da junta soldada.

No caso da soldagem a arco elétrico, foi mostrado (equação 1.1 do Capítulo 1) que a energia gerada pelo arco é dada por:

$$E_N = \frac{U \cdot I}{V} \quad (J / mm) \quad [2.32]$$

onde E_N é a energia "nominal" de soldagem. Nessa equação os parâmetros de soldagem são:

U = Tensão de soldagem (V);

I = Corrente de soldagem (A);

V = Velocidade de soldagem (mm/s).

Por sua vez, na soldagem com gás (oxiacetilênica) essa energia nominal de soldagem (E_{gN}) é ex-

pressa por:

$$E_{gN} = 13,33 * F_{C_2H_2} / V \quad (J / mm) \quad [2.33]$$

Onde $F_{C_2H_2}$ é a vazão do acetileno (l/h), considerando-se o calor de combustão desse gás como 48 kJ/l, e V a velocidade de soldagem (mm/s).

Entretanto, para cada processo e condição de soldagem há um dado rendimento térmico ("r"), resultante da razão entre as quantidades de calor realmente transferida para a peça e o total gerado pelo arco, ou chama.

Portanto, a energia líquida para a soldagem ao arco elétrico é dada por:

$$E = r \cdot E_N \quad (J / mm) \quad [2.34]$$

enquanto que para a soldagem oxiacetilênica têm-se:

$$E_g = r \cdot E_{gN} \quad (J / mm) \quad [2.35]$$

Na **Tab. 2.5** encontram-se indicativos dos rendimentos térmicos para a maioria dos processos de soldagem. Os mesmos devem ser utilizados com cautela e somente como guia geral, pois diversos fatores alteram estes valores.

Então, a energia (líquida) de soldagem é utilizada para fundir somente o material base, ou o mesmo e o consumível. Sendo as áreas da seção transversal do metal base fundido A_b e a do metal do consumível adicionado A_a , como mostrado na **Fig. 2.25**, a área do metal de solda é:

$$A_s = A_b + A_a \quad (\text{mm}^2) \quad [2.36]$$

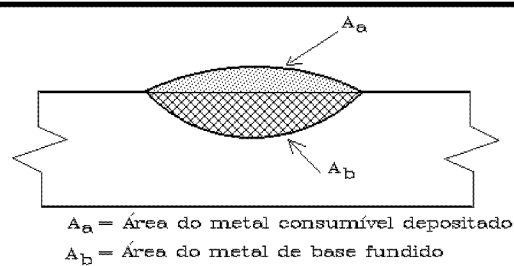


Figura 2.25 - Seção Transversal do Metal de Solda, composta pelos Metais de Adição e Base.

Por outro lado, a quantidade teórica de calor para fundir um dado volume de metal pode ser aproximadamente calculada por:

$$Q = \frac{(T + 273)^2}{300000} \quad (\text{J} / \text{mm}^3) \quad [2.37]$$

onde T é a temperatura (°C) de fusão do metal.

Por seu turno, a área do metal de solda é dada por:

$$A_s = f \cdot \frac{E}{Q} \quad (\text{mm}^2) \quad [2.38]$$

onde f é a eficiência de fusão, ou seja, a razão en-

tre a mínima quantidade de calor teoricamente gerada pelo arco necessária para a fusão e a energia líquida de soldagem. Este coeficiente depende: (a) Do processo de soldagem; (b) Do material soldado (base e consumível) sendo inversamente proporcional à sua condutividade térmica; (c) Da configuração da junta e espessura da peça.

Outro importante dado, é a taxa de fusão por unidade de corrente. Para obtê-la, é necessário calcular a massa de metal de adição fundido por unidade de tempo, ou seja:

$$M_a = m \cdot V \cdot A_a \quad (\text{g/s}) \quad [2.39]$$

e aquela do metal base:

$$M_b = m \cdot V \cdot A_b \quad (\text{g/s}) \quad [2.40]$$

onde:

m = Massa específica (g/mm³);

V = Velocidade de soldagem (mm/s).

Portanto, a massa de metal fundido por unidade de corrente elétrica é dada pelas equações 2.41 e 2.42, para os metais de adição e base, respectivamente:

$$F_a = 3600 \cdot \frac{M_a}{I} \quad (\text{g} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) \quad [2.41]$$

$$F_b = 3600 \cdot \frac{M_b}{I} \quad (\text{g} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) \quad [2.42]$$

Dessa forma, a massa total fundida por unidade de tempo é:

$$M_s = g \cdot V \cdot A_s \quad (\text{g/s}) \quad [2.43]$$

enquanto que a mesma, por unidade de tempo e corrente, é:

$$F_s = 3600 \cdot \frac{M_s}{I} \quad (\text{g} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) \quad [2.44]$$

Tabela 2.5 - Rendimento Térmico Médio da Fonte de Energia, em Função do Processo de Soldagem

Processo	Rendimento (r)	Processo	Rendimento (r)
Arco Submerso	0,90 ± 0,9	TIG (CCEN)	0,65 ± 0,15
Eletrodo Revestido	0,75 ± 0,10	TIG (CA)	0,35 ± 0,15
Eletroescória	0,68 ± 0,13	LASER	0,005 à 0,70
MIG/MAG	0,75 ± 0,10	Feixe de Elétrons	0,87 ± 0,08
Gás	0,52 ± 0,27		

**C
A
P
Í
T
U
L
O

03**

**FONTES DE POTÊNCIA
PARA A SOLDAGEM
AO ARCO ELÉTRICO**

INTRODUÇÃO	44
CURVAS CARACTERÍSTICAS	45
Corrente Constante	45
Tensão Constante	46
ASPECTOS DINÂMICOS DO ARCO	47
Características	47
Pulsos de Corrente e Sistemas Sinérgicos	48
FONTES CONVENCIONAIS PARA SOLDAGEM	51
Características e Ciclo de Trabalho	51
Transformador	52
Retificadores	55
Geradores	56
DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS ESSENCIAIS	56
MODERNAS FONTES PARA SOLDAGEM	60
Controles por Tiristores ou Transistores	60
Sistema Inversor	61
SELEÇÃO DA FONTE DE POTÊNCIA	64
Introdução	64
Resumo das Características	65
FATOR DE POTÊNCIA E CONEXÕES	66

INTRODUÇÃO

Uma fonte de potência para a soldagem ao arco elétrico, deve ser projetada para satisfazer à demanda requerida pelos parâmetros estabelecidos; possuir conveniente velocidade de resposta aos transientes e atender particularidades específicas de cada processo, mantendo o arco estável.

Portanto, é de extrema importância a relação que a fonte fornece entre a tensão e a corrente de soldagem, ou seja, sua “curva característica”. Além disso, a estabilidade do arco e outros fatores, dependem da interação desta curva, com aquela produzida pelo arco elétrico (a qual não é ôhmica).

A **Fig. 3.1** mostra duas curvas hipotéticas relacionando tensão e corrente, sendo F_f a fornecida pela fonte de potência e F_a aquela do arco. A tensão existente entre os terminais da máquina, quando a mesma está energizada, mas não há arco, é denominada “tensão de circuito aberto (U_o)”. Ainda que seja desejável uma alta U_o para facilitar a abertura e manutenção do arco, a mesma é limitada em cerca de 100 V, por razões de segurança. Quando a tensão é zero (ou há contato do eletrodo com a peça) circula uma “corrente de curto-circuito (I_o)”. Ambas (U_o e I_o) são características da fonte; influenciam seu projeto e exercem profundo efeito sobre as condições de soldagem.

O ponto de operação, ou seja, a combinação da tensão e corrente com as quais a solda será realizada, depende da solução de duas equações, uma relativa ao solicitado pelo arco e a outra derivada das características estáticas da fonte. Conseqüentemente, esse ponto é determinado pela intersecção das duas curvas F_a e F_f , ou ponto “P” da **Fig. 3.1**.

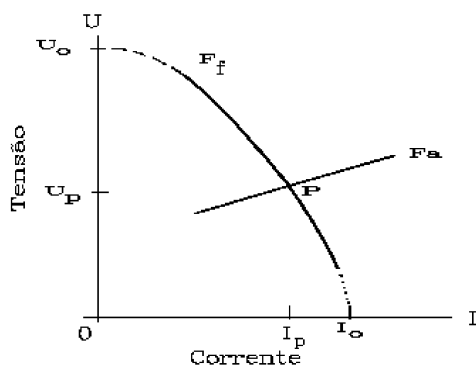


Figura 3.1 - Intersecção (P) entre a Curva Característica da Fonte (F_f) e do Arco (F_a).

Para o arco, a tensão é função da corrente (I) e do comprimento (L) do mesmo, ou seja:

$$U = F_a(I, L) \quad [3.1]$$

Por sua vez, a tensão que a fonte de potência fornece depende da corrente e outras características do equipamento, principalmente resistência (R) e reatância (X) do mesmo:

$$U = F_f(I, X, R) \quad [3.2]$$

A **Fig. 3.2** apresenta esquematicamente um circuito elétrico simplificado de uma fonte de potência para soldagem, onde “T” é o transformador. Estão presentes ainda reatância indutiva (X) e resistência (R), sendo a impedância (Z) dada por $R + j(X_L - X_C)$, onde X_L é a reatância indutiva e X_C é a reatância capacitiva. Portanto, com essa configuração, têm-se (os símbolos em **negrito** significam vetores):

$$U_o = U + Z \mathbf{I} \quad [3.3]$$

Estando \mathbf{I} e \mathbf{U} em fase:

$$U_o^2 = U^2 + Z^2 \times I^2 \quad [3.4]$$

Dividindo esta equação por U_o^2 e considerando que $U_o/Z = I_o$, resulta:

$$\left(\frac{U}{U_o}\right)^2 + \left(\frac{I}{I_o}\right)^2 = 1 \quad [3.5]$$

Essa é a equação de uma elipse, cujos eixos são $0U_o$ e $0I_o$.

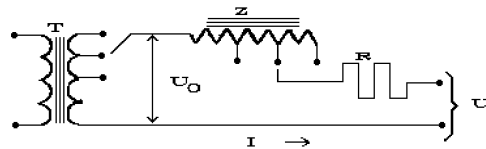


Figura 3.2 - Circuito Elétrico Esquemático de uma Fonte de Potência para Soldagem.

Variando U_o (por simples conexão em diferentes pontos na bobina secundária do transformador) por exemplo, obtém-se uma família de elipses, como mostrado na **Fig. 3.3 (a)**. Por outro lado, lembrando que a reatância resultante (X) do circuito é igual à diferença entre as reatâncias induti-

va e capacitiva do mesmo e que o módulo da impedância é dado por $Z = (R^2 + X^2)^{1/2}$, a I_0 pode ser modificada pela alteração da indutância na máqui-

na, ou por (limitada) variação da extensão do eletrodo após o contato elétrico, conforme apresentado na Fig. 3.3(b).

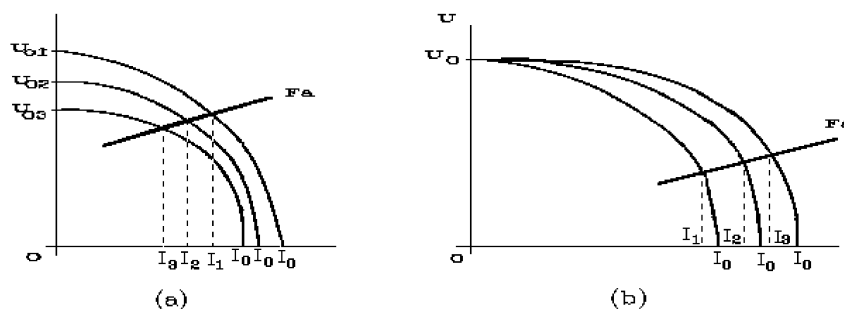


Figura 3.3 - Alterações de: (a) Tensão de Circuito Aberto (U_0); (b) Corrente de Curto-Circuito (I_0).

CURVAS CARACTERÍSTICAS

Existem três diferentes regiões em que o ponto de operação pode estar situado, dependendo de F_a e F_f e que são os seguintes, conforme ilustrado na Fig. 3.4: (a) Região próxima ao curto-circuito, onde a variação do comprimento do arco provoca pequena alteração da corrente (e grande modificação na tensão), sendo a curva característica da fonte denominada “corrente constante” (ou “tombante”) e mostrada como “CC”; (b) Região próxima à tensão de circuito aberto, com a variação do comprimento do arco provocando pequena alteração na tensão (e grande modificação na corrente) sendo denominada essa curva característica de “tensão constante” (ou “plana”) e apresentada como “TC”; (c) Região intermediária, com a tensão e a corrente variando inversamente e seu produto permanecendo praticamente constante. Nesse caso a curva característica é chamada de “potência cons-

tante” e apontada como “PC” na figura em referência.

Portanto, podem ser distinguidas fontes que possuam essencialmente curvas características tensão constante e corrente constante, as quais serão analisadas a seguir.

CORRENTE CONSTANTE

Quando a soldagem é realizada manualmente, em processos tais como TIG e eletrodo revestido, é impossível para o soldador manter um preciso controle sobre o comprimento do arco. Portanto, para que não ocorra excessiva alteração na corrente de soldagem, a curva estática da fonte deve ser do tipo “corrente constante” (ou “tombante”), tal como mostrado na Fig. 3.5 (curvas I a IV), sobre as quais foram superpostas curvas para três diferentes comprimentos do arco (l_0 , l_1 ; l_2). Nessa figura estão exemplificados dois casos distintos. O primeiro se refere às curvas I e II, que com a U_{01} (máxima) possui os limites de corrente de curto-circuito I_{01} e I_{02} , existindo entre estas curvas uma “família” gerada pela alteração da corrente e com declividade variável. O segundo caso se aplica a equipamentos que permitem variação na tensão de abertura do arco e é descrito pelas curvas III e IV. Com a U_{02} (mínima) existe, também, outra família de curvas entre as correntes I_{03} e I_{04} , sendo que com a diminuição da U_0 é possível a obtenção de curvas com muito menor declividade, cuja aplicação será descrita mais abaixo.

Então, considerando três curvas características do arco na figura anterior, pode ser demonstrado

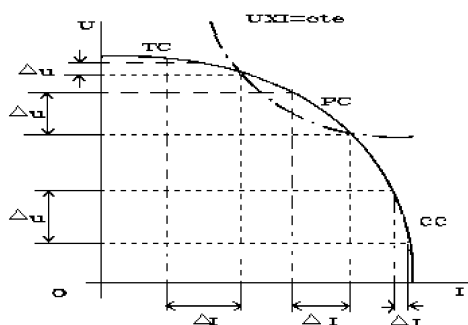


Figura 3.4 - Regiões de Operação em Função da Curva Característica da Fonte e do Arco (vide texto).

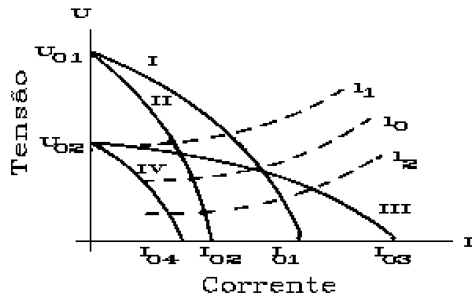


Figura 3.5 - Diversas Curvas Características de Fontes do Tipo Corrente Constante ("Tombante").

o efeito do aumento (\$I_1\$), ou diminuição (\$I_2\$) do comprimento inicial (\$I_0\$) do mesmo. Observe-se que operando com a curva I, a alteração da tensão provoca uma relativamente pequena mudança na corrente. Normalmente, uma variação de 25% na tensão resulta em menos de 6% de desajuste da corrente. Dessa forma, é praticamente constante a geometria do cordão de solda e a massa do metal fundido por unidade de tempo (taxa de fusão).

Há casos, entretanto, que se deseja um certo controle sobre a corrente através da variação do comprimento do arco (tensão), principalmente quando o soldador se encontra longe dos ajustes da fonte. Para isso são utilizadas curvas do tipo III.

Deve-se notar, ainda, que a declividade é maior para menores correntes de curto-circuito, numa dada \$U_0\$.

Outrossim, a determinação da declividade ótima para mínima alteração na taxa da energia fornecida, com a flutuação do comprimento do arco, pode ser obtida através da consideração de que a parte relevante da curva característica estática da máquina é uma linha reta, dada por:

$$U = U_0 + aI \quad [3.6]$$

conseqüentemente:

$$\frac{dI}{dU} = \frac{1}{a} \quad [3.7]$$

onde "a" é a declividade da reta. Dessa forma, a potência do arco se altera com a tensão através da seguinte equação:

$$\frac{d}{dU}(UI) = I + U \frac{dI}{dU} = I + U \cdot \frac{1}{a} \quad [3.8]$$

Para que a alteração na taxa da energia fornecida seja zero, é necessário que:

$$a = -U/I \quad [3.9]$$

Considerando que o ponto de operação é \$U_p\$ e \$I_p\$ e que a declividade ótima é \$-dU_p/dI_p\$, a equação 3.6 torna-se:

$$U = U_0 - \frac{dU_p}{dI_p} \cdot I \quad [3.10]$$

TENSÃO CONSTANTE

Por outro lado, também deve existir (por razões que logo abaixo serão descritas) fontes que possuam a característica de pequenas alterações na tensão provocar grandes flutuações na corrente, cuja curvas são denominadas "tensão constante" ("ou plana"). Conforme ilustrado na Fig. 3.6 (quadrante superior), considerando o comprimento inicial do arco (curva \$I_0\$), é grande o efeito sobre a corrente (I), quando esse comprimento aumenta (\$I_1\$), ou diminui (\$I_2\$), pois altera a tensão (U).

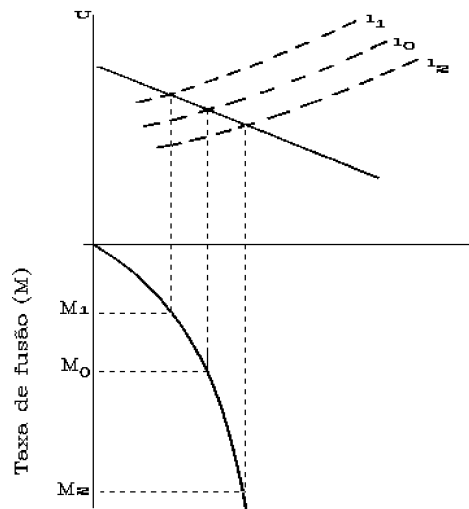


Figura 3.6 - Curva Característica Tensão Constante ("Plana") e Alteração da Taxa de Fusão provocada por Flutuação do Comprimento do Arco.

Na realidade, para fontes convencionais, sempre há uma pequena declividade nessas curvas (típicamente 2 V por cada 100 A) causada pela impedância interna do circuito e conexões. Como pode ser visto nessa última figura, um aumento ou redução em 25% na tensão pode provocar alteração de 50% na corrente.

Entretanto, a declividade é um importante fator a ser considerado para melhor estabilidade do arco, sendo recomendado as seguintes relações para os diferentes processos e/ou situações:

- Declividade de 1,5 a 2 V por cada 100 A:
Para MIG com gás inerte na soldagem de não-ferrosos; ou arco submerso; ou eletrodo tubular com grande diâmetro de arame;
- Declividade de 2 a 3 V por cada 100 A:
Para MAG (CO₂); ou eletrodo tubular com pequeno diâmetro de arame;
- Declividade de 3 a 4 V por cada 100 A:
Para MIG/MAG em curto-circuito.

Esse tipo de curva característica é geralmente utilizado em processos nos quais o eletrodo (arame) é continuamente alimentado (tais como em MIG; arco submerso e arame tubular) porque mantém o comprimento do arco constante, apesar das possíveis flutuações que o mesmo possa sofrer.

Como o arame é alimentado a uma velocidade constante (W_a) e o comprimento do arco (l) deve ser o mais estável possível, a taxa de variação do mesmo com o tempo (t) é:

$$dl/dt = -(W_a - Ml) \quad [3.11]$$

onde M é a taxa de fusão linear do arame por

Ampère, não computando-se o efeito Joule, ou seja, o aquecimento que ocorre na parte do arame, o qual encontra-se após o bico de contato e comporta-se como uma resistência elétrica.

Por outro lado, considerando que dl/dt deve ser igual a zero para condição estável de operação; que a corrente é dada pela equação 3.6 e que a tensão é proporcional ao comprimento do arco segundo a seguinte equação:

$$U = U_p + bl \quad [3.12]$$

onde " b " é constante. Então, a taxa com que o arco retorna ao seu comprimento original após um distúrbio é descrita por:

$$\frac{d}{dl} \left(\frac{dl}{dt} \right) = M \frac{dI}{dl} = M \frac{b}{a} \quad [3.13]$$

Portanto, para uma dada declividade da curva característica da fonte, ou " a " na equação anterior, este fenômeno resulta da alteração na taxa de fusão (" M ") do arame, conforme também ilustrado na **Fig. 3.6** (quadrante inferior), sendo o mesmo denominado "auto-ajustagem" do arco. Nesta figura, a relação entre corrente e taxa de fusão é apresentada para uma velocidade de alimentação do arame constante, sendo que ao comprimento do arco original " l_0 " corresponde uma taxa de fusão " M_0 ". Caso ocorra uma perturbação qualquer (aumentando o comprimento do arco para " l_1 ", por exemplo), haverá imediata redução da corrente; entretanto, se o arco diminuir (para " l_2 ", por exemplo) a taxa de fusão aumentará (" M_2 ") e o arco tenderá a se estabilizar em torno de " l_0 ".

ASPECTOS DINÂMICOS DO ARCO

CARACTERÍSTICAS

A característica estática da fonte fornece a relação tensão versus corrente, para condições de arco estável. Entretanto, existem situações em que o arco apresenta transientes, tais como o que ocorre na abertura do mesmo com eletrodo revestido, em que há curto-circuito e somente após se forma o plasma. Para isso acontecer, é necessário que o aumento da corrente ocorra à uma taxa pré-determinada, até alcançar o nível desejado de operação. Se a corrente aumentar muito rapidamente, o curto-circuito provocará uma pequena explosão, desfazendo o arco. Caso a corrente cresça muito va-

garosamente, o eletrodo tenderá a ficar preso na peça (soldado).

Por outro lado, existem diferentes modos de transferência do metal desde o eletrodo para a peça, como já visto. Um deles é denominado de curto-circuito, sendo que o metal se transfere quando o mesmo ocorre. A **Fig. 3.7** ilustra o transiente existente, sendo que nesta situação a corrente deve crescer em incrementos de tempo bem definidos, e a fonte responder à este transiente numa frequência apropriada, a qual é dada por:

$$f = \frac{1}{T_c + T_A} \quad (\text{Hz}) \quad [3.14]$$

onde:

T_c = Período de curto-circuito;

T_a = Período de arco.

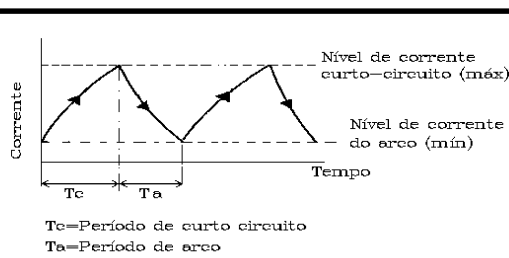


Figura 3.7 - Transiente da Corrente no Modo de Transferência por Curto-Circuito em MAG (CO_2).

Há, portanto, uma taxa ótima de crescimento da corrente a ser determinada.

A maioria das fontes de potência são altamente indutivas e resistivas por natureza. Como pode ser visto na figura anterior, a corrente instantânea num circuito desse tipo é dada por:

$$i = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) = I_f (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad [3.15]$$

onde:

t = Tempo para alcançar “ i ” Amperes (s);

I_f = Valor final da corrente (A);

R = Resistência do circuito (Ω);

L = Indutância (H).

Deve-se notar, ainda, que existe uma medida da eficiência da resposta do circuito para enfrentar a situação transiente. Pode ser demonstrado, que esse é o tempo (“ t ”)necessário para a corrente alcançar 63,2% de seu valor final, sendo $t=L/R$ e chamado de “constante de tempo” do circuito.

PULSOS DE CORRENTE E SISTEMAS SINÉRGICOS

Uma técnica de muito interesse é aquela de pulsos da corrente, ou seja, a variação controlada da corrente no tempo, a qual é utilizada atualmente principalmente em TIG e MIG, mas com seguro emprego em outros processos, entre os mesmos eletrodo tubular.

Esse sistema, como mostrado na Fig. 3.8, é definido pela corrente base (I_b) e seu tempo de atuação (t_b); pela corrente de pico (I_p) e tempo que é empregada (t_p), além da velocidade de alimentação do arame e tensão que forneça um arco estável.

Na discussão que a seguir será realizada, o processo mais enfocado será o MIG. No mesmo, a transferência do metal deve ocorrer com uma gota por pulso de corrente e algumas das vantagens deste procedimento, quando comparado com o convencional, são:

- Possibilidade de soldar em qualquer posição e com taxa de fusão maior do que aquela obtida em curto-circuito;

- A corrente média é bem menor do que a utilizada com uma fonte convencional, para um mesmo resultado;

- A produção de salpico é quase nula; há ótima estabilidade do arco e a velocidade de soldagem pode ser bastante elevada;

- A geometria do cordão se mantém praticamente constante;

- O sistema pode ser controlado por um comando único (“one knob control”), quando sinérgico, facilitando o estabelecimento das condições operacionais ótimas;

- Um mesmo diâmetro de arame pode ser utilizado num amplo intervalo de corrente. Por exemplo, o diâmetro de 1,2 mm (aço) permite valores de corrente média desde 80 a 350 A, com taxa de deposição equivalente àquela de eletrodos revestidos de diâmetro 3,2 mm à 5,0 mm.

Como será visto logo em seguida, é muito complexo o correto estabelecimento de todos os fatores envolvidos na soldagem por corrente pulsada. Portanto, no passado essa técnica não encontrou ampla aceitação, pois os equipamentos existentes eram inadequados para operações de produção, sendo necessário simplificá-los.

Isto foi alcançado, através do desenvolvimento do controle sinérgico (adjetivo relativo a sinergia; do grego “synergía”, significando cooperação; aqui aplicada no sentido de vários fatores coorde-

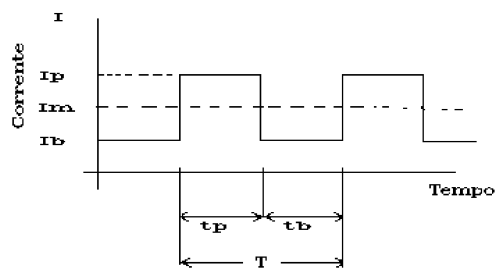


Figura 3.8 - Pulsos de Corrente Idealizados (onda retangular) e Parâmetros Básicos Associados.

nados contribuindo para um resultado comum). Dessa forma, a partir do tipo e diâmetro do arame e do gás de proteção que será utilizado, um micro-computador (possuindo um programa próprio, ou programado pelo usuário) estabelece ótimos períodos e intensidade da corrente de pico, em perfeita sintonia com a corrente base. É possível, inclusive, programar no computador todos os parâmetros, sendo que o soldador necessita somente pressionar um botão, indicando que tipo de junta irá produzir, para que as condições ótimas sejam estabelecidas. Para eventuais alterações devidas às condições específicas do trabalho, através de uma única chave o soldador pode variar a corrente média, com as condições ótimas de pulso sendo mantidas para cada caso. Por outro lado, a forma do controle, neste caso, depende, fundamentalmente, da curva característica da fonte, ou seja:

❑ Fonte com Curva Característica Tensão Constante (“Plana”)

Qualquer alteração no comprimento do arco estabelecido, é compensada por variação na intensidade da corrente base; ou tempo da corrente de pico (t_p); ou frequência do pulso, como mostrado nas **Figs. 3.9(a-c)**, respectivamente. A intensidade da corrente de pico não se modifica, mas os

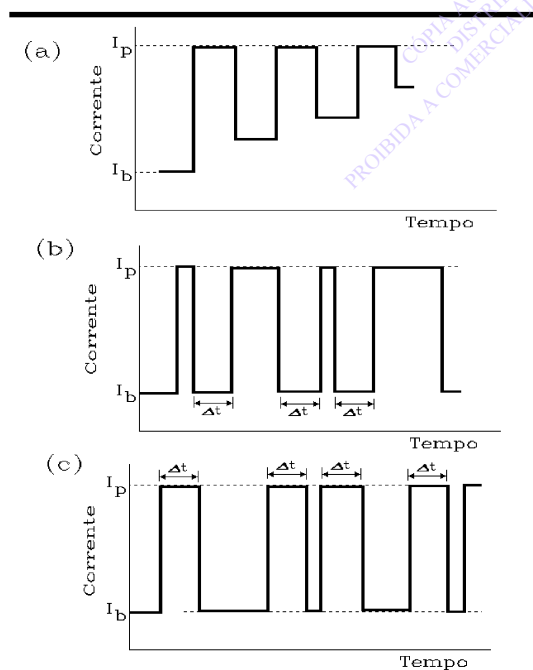


Figura 3.9 - Compensação à Flutuação do Comprimento do Arco por: (a) Ajuste da Corrente Base; (b) Período do Pulso; (c) Frequência do Pulso.

outros parâmetros são re-ajustados mantendo-se sempre, entretanto, a condição ótima de soldagem para cada caso.

❑ Fonte com Curva Característica Corrente Constante (“Tombante”)

A alteração no comprimento do arco é detectada por um sistema “tensão-sensitivo”, o qual atua sobre a velocidade de alimentação do arame, sem modificar os parâmetros de pulso, preservando a ótima combinação em cada situação.

Para a discussão seguinte, sobre os aspectos físicos e matemáticos da transferência com corrente pulsada, a seguinte simbologia será empregada:

A = Área da seção transversal do arame (mm^2);

E = Campo elétrico no arco (4000 V/m);

F = Frequência do pulso (s^{-1});

I_b = Corrente base (A);

I_m = Corrente média (A);

I_p = Corrente de pico (A);

$K_1 = (F_a + U_a + U_c) / (A \cdot H_m)$ que é constante e igual a $0,35 \text{ mm} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;

$K_2 = r / (A^2 \cdot H_m)$ que é constante e igual a $6,75 \times 10^{-5} \text{ A}^2/\text{s}$;

l = Comprimento do arco (mm);

M_o = Fator de fusão do arame ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{A}^{-1}$);

s = Comprimento do eletrodo após o bico de contato (mm);

R_o = Resistência elétrica da fonte de potência ($0,03 \text{ W}$);

t = intervalo de tempo, ou F^{-1} período do pulso (s);

t_b = Tempo da corrente base (s);

t_p = Tempo da corrente de pico (s);

V = Volume da gota destacada (mm^3);

U_a = Caída de potencial anódica ($2,5 \text{ V}$);

U_c = Caída de potencial catódica (5 V);

U = Tensão de arco (V);

U_o = Tensão de circuito aberto (V);

W = Velocidade de alimentação do arame (mm/s);

W_b = Velocidade de alimentação do arame durante a corrente base (mm/s);

W_p = Velocidade de alimentação do arame durante a corrente de pico (mm/s);

r = Resistividade do arame ($1,5 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}$ para o aço);

F_a = Função trabalho anódica, ou a energia potencial convertida pelos elétrons quando penetram no ânodo ($4,0 \text{ eV}$).

Assim, a velocidade de alimentação do arame é dada por:

$$W = \int_0^t W(t). dt = (W_p \cdot t_p + W_b \cdot t_b) \cdot T^{-1} \quad [3.16]$$

onde:

$$W_p = K_1 I_p + s \cdot K_2 I_p^2 \quad [3.17]$$

$$W_b = K_1 I_b + s \cdot K_2 I_b^2 \quad [3.18]$$

Substituindo as equações [3.17] e [3.18] na equação [3.16], obtém-se:

$$W = K_1 \cdot I_m + s K_2 \cdot (I_p^2 t_p + I_b^2 t_b) \cdot T^{-1} \quad [3.19]$$

O termo relativo ao efeito joule nesta equação, deve ser utilizado quando se emprega grandes correntes e arames de alta resistividade. Entretanto, a equação 3.19 pode ser linearizada, se o termo em questão for proporcional à corrente média. Para tanto, pode-se empregar a relação entre a velocidade de alimentação do arame e o volume do mesmo fundido por unidade de tempo (t), a qual é dada por:

$$\frac{V}{t} = W \cdot A \quad [3.20]$$

e, portanto:

$$t = \frac{V}{W \cdot A} \quad [3.21]$$

Desta forma, considerando a equação 3.19, têm-se:

$$W = K_1 \cdot I_m + s K_2 (I_p^2 \cdot t_p + I_b^2 \cdot t_b) W \cdot A \cdot V^{-1} \quad [3.22]$$

então:

$$W = \frac{K_1}{1 - \frac{s K_2 A (I_p^2 \cdot t_p + I_b^2 \cdot t_b)}{V}} \cdot I_m \quad [3.23]$$

Se $I_p^2 \cdot t_p$ é muito maior do que $I_b^2 \cdot t_b$, resulta:

$$W = \frac{K_1}{1 - \frac{s \cdot K_2 \cdot A \cdot I_p^2 \cdot t_p}{V}} \cdot I_m \quad [3.24]$$

Mantendo constante V, s, I_p^2 e t_p obtém-se:

$$W = M \cdot I_m \quad [3.25]$$

onde:

$$M = \frac{K_1}{1 - \frac{s \cdot K_2 \cdot A \cdot I_p^2 \cdot t_p}{V}} \quad [3.26]$$

Similarmente, a tensão de circuito aberto pode ser escrita em termos de I_m :

$$U_o = \int_0^t U(t). dt = (U_c + U_a) \cdot E \cdot I + (R_o + \frac{r \cdot s}{A}) \cdot I_m \quad [3.27]$$

Logo, o comprimento do arco é dado por:

$$l = \frac{U_o - (R_o + \frac{r \cdot s}{A}) \cdot I_m}{E \cdot (U_c + U_a)} \quad [3.28]$$

Portanto, esta última equação mostra que o comprimento do arco pode ser mantido constante, utilizando uma fonte de potência com curva característica tombante e tensão de circuito aberto invariável. Note-se, ainda, que as equações 3.23 e 3.27 são de muita importância, pois com as mesmas podem ser determinadas diversas combinações de parâmetros de soldagem, produzindo soldas com ótimas características.

Por outro lado, observou-se que as melhores condições de transferência ocorrem, quando uma gota é associada com cada pulso de corrente. O estabelecimento desta condição depende de I_p e t_p , sendo a curva do tipo hiperbólica e com $I_p^2 \cdot t_p = \text{constante}$, conforme ilustrado esquematicamente na Fig. 3.10.

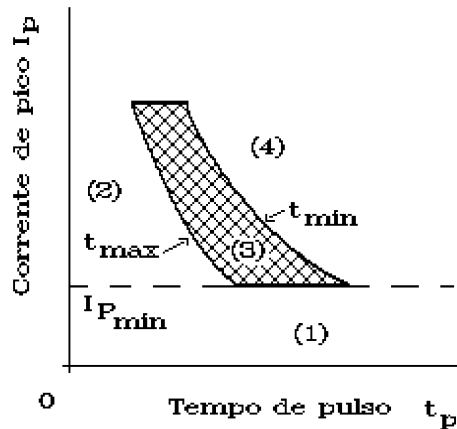


Figura 3.10 - Região (3) Ideal do Tempo do Pulso e Corrente de Pico para Transferência de Uma Gota por Pulso (MIG).

A regiões mencionadas nesta figura são as seguintes:

- **Região 1:** onde I_p é menor do que $I_p \text{ min}$, que é a corrente de pico crítica - para essas condições. Forma-se uma larga gota independente da duração do pulso e o arco se torna instável, acompanhado por muito salpico;

▪ **Região 2:** nesse caso, I_p é maior do que I_p mínimo, mas a duração do pulso é menor do que a mínima exigida, sendo a energia muito pequena para provocar a transferência em um pulso. É gerada, assim, uma grande gota que se mantém por vários pulsos, até se separar sem controle algum;

▪ **Região 3:** essa é a região ideal de transferência, com I_p maior do que I_p mínimo e o tempo de pulso entre os limites máximos (t_{max}) e mínimo (t_{min}). Uma gota com diâmetro próximo ao do eletrodo é transferida regularmente e em cada pulso, com arco extremamente estável;

▪ **Região 4:** com I_p maior do que I_p mínimo e tempo de pulso maior do que o máximo. O modo de transferência é, aparentemente, do tipo aerosol (“spray”). Entretanto, a ponta fundida do eletrodo se prolonga e toca (na realidade “mergulha”) a poça de fusão, causando excessivo salpico. Além do mais, com o aumento de t_p nesta região, a frequência do pulso decresce (com velocidade de alimentação constante do eletrodo) resultando numa flutuação incessante do comprimento do arco.

De maneira idealizada numa onda retangular, por exemplo, o tempo para alcançar a corrente de pico deve aumentar com frequência infinita. Praticamente, entretanto, a impedância característica do sistema impõe um certo tempo para que ocorra esses pulsos.

A Fig. 3.11 exemplifica os problemas mais comuns para uma onda que idealmente deveria ser retangular. O caso (a) mostra a influência dos tempos para alcançar a corrente de pico e sua queda, ilustrando o critério de 90% utilizado em eletrôni-

ca. Nesse caso, tanto a taxa de aumento, quanto a de decrescimento são excessivas. O aumento da corrente é normalmente mais rápido do que sua queda, porque a saída ocorre durante todo o intervalo, sendo o tempo dessa queda uma caracterização primária do comportamento do circuito de soldagem. Em (b) é ilustrado o fenômeno da corrente de pico ser excedida, além da corrente base reduzida, como consequência de uma muito rápida resposta na elevação da corrente. Por outro lado, em (c) é mostrada a superimposição de ondulação sobre a onda de saída. Isto é provocado porque os equipamentos de retificação de CA tem um componente de ondulação indicativo da frequência da linha.

No caso trifásico, a ondulação possui geralmente a frequência de 360 Hz. , No entanto, é possível a quase eliminação desta ondulação, através do emprego de modernas fontes transistorizadas.

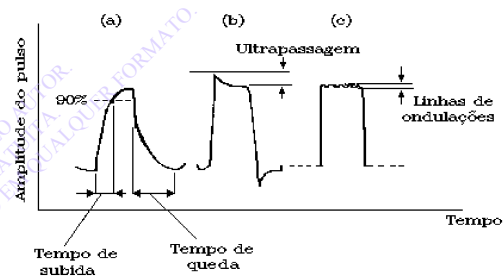


Figura 3.11 - Distorção da Geometria de uma Onda, cuja Forma deveria Idealmente ser Retangular (vide texto).

FONTES CONVENCIONAIS PARA SOLDAGEM

CARACTERÍSTICAS E CICLO DE TRABALHO

As fontes de potência para a soldagem podem ser classificadas de diversas formas, sendo que somente o tipo não caracteriza completamente uma máquina. Em qualquer caso, entretanto, o controle da potência é realizado através da alteração da resistência dos campos magnéticos.

Os seguintes dois grandes grupos são geralmente aceitos:

□ Máquinas Rotativas

Nesses equipamentos, a potência é gerada pelo próprio sistema, com seu ajuste realizado através de chaves, as quais reconectam diferentes bobinas. Os

tipos usuais, com suas principais características, são:

▪ Gerador movido por motor elétrico: É produzida corrente contínua, com curvas características plana, ou tombante.

▪ Gerador movido por motor de explosão interna: Com corrente contínua, as curvas características podem ser plana, tombante, ou dos dois tipos. Naquele que produz corrente alternada, a curva característica é somente tombante.

□ Máquinas Estáticas

Nesse caso, a potência é convertida, com o seu ajuste obtido por variação da indutância, através de meios mecânicos, elétricos, eletrônicos, ou alternando o acoplamento das bobinas. Os dois principais tipos e suas características são:

- Transformador: Produz corrente alternada e a curva característica é tombante.
- Transformador/Retificador: Quando produz corrente contínua, a curva característica pode ser tombante, plana, ou ambas. Resultando corrente alternada, a curva característica é somente tombante.

Uma máquina de solda pode ainda ser classificada segundo o Ciclo de Trabalho, no qual a mesma, operando com corrente e tensão especificadas, não sofre excessivo aquecimento interno. Essa classificação geralmente atende alguma Especificação, sendo aquela da “National Electrical Manufacturers' Association” (NEMA) dos EUA uma das mais utilizadas.

O ciclo de trabalho (C) é um dado muito importante que o fabricante deve fornecer com seu equipamento. Segundo a NEMA, o mesmo expressa a “porcentagem de tempo que uma fonte pode prover uma dada corrente (arco aberto), em intervalos de 10 minutos, sem exceder um limite pré-determinado de temperatura”, ou seja:

$$C = TAA / TTS \times 100 (\%) \quad [3.29]$$

onde:

TAA = Tempo de Arco Aberto, ou no qual a soldagem esta efetivamente sendo realizada;

TTS = Tempo Total de Soldagem, incluindo todas as operações acessórias e paradas.

Entretanto, para soldagem por resistência elétrica (Capítulo 11), essa definição é alterada para “a porcentagem de tempo que uma fonte pode prover uma dada potência (em kVA), em intervalos de 1 minuto, sem exceder um limite pré-determinado de temperatura”.

Sendo seguida a Norma ISO, o intervalo de tempo considerado é de 5 minutos.

Portanto, conhecendo o ciclo de trabalho à uma dada corrente - ambos fornecidos pelo fabricante - pode-se calcular um novo “C” para outra corrente (ou vice-versa) pela seguinte equação:

$$C = (I_f / I)^2 \cdot C_f \quad [3.30]$$

onde C_f e I_f são valores fornecidos pelo fabricante, enquanto C (ou I) o novo valor desejado. Logicamente, a corrente não pode ultrapassar aquela estabelecida como máxima para o equipamento.

Por exemplo, se para uma máquina é especi-

cada a corrente de 300 A à 60% de ciclo de trabalho, o novo “C”, para operá-la à 400 A, será 33,7%. Desta forma, à 400 A essa fonte não deverá manter o arco aberto por mais do que aproximadamente 3,4 minutos - em cada dez minutos - sendo esta operação contínua ou intermitente.

Então, dependendo do ciclo de trabalho, a NEMA classifica as fontes de potência nas seguintes classes:

- **Classe I:** Com 60, 80, ou 100% do ciclo de trabalho;
- **Classe II:** Com 30, 40, ou 50% do ciclo de trabalho;
- **Classe III:** Com 20% do ciclo de trabalho.

Diversos métodos e dispositivos são utilizados, para que a fonte produza uma dada curva característica (tensão ou corrente constante). A **Fig. 3.2** apresentou esquematicamente um circuito simples, típico de várias fontes e controles. Para corrente constante de saída, a queda de tensão na impedância aumenta muito conforme a corrente cresce, causando grande redução na tensão de trabalho. Ajustes nesta série de impedâncias fornecem uma curva características com as propriedades desejadas. Para o tipo plana, a queda de tensão na impedância aumenta muito pouco com o crescimento da corrente e há, conseqüentemente, pequena queda da tensão de trabalho, sendo que geralmente se utiliza um reator como dispositivo para a impedância, apesar de que pode ser empregado uma resistência elétrica.

Por outro lado, reatância indutiva variável pode ser utilizada para controlar a curva característica dos equipamentos de solda. Uma vantagem sobre a resistência elétrica, é que a defasagem de fases produzida em CA pelo reator melhora a estabilidade do arco para uma dada tensão de circuito aberto. Existem diversas maneiras de se variar a reatância de um reator, tais como alterando a derivação elétrica numa bobina, ou ajustando a indutância mútua entre as bobinas do primário e secundário, através de bobinas, ou derivações móveis num transformador.

TRANSFORMADOR

Desde cerca de 1919 o transformador é utilizado na soldagem, sendo provavelmente um dos equipamentos mais simples disponíveis, necessitando mínima manutenção, já que é essencialmente estático. Essa máquina transforma a alta tensão e baixa corrente da rede de fornecimento, para a

baixa tensão e alta corrente necessária na soldagem em CA.

A Fig. 3.12 ilustra os elementos básicos de um transformador, com o caminho médio do fluxo magnético na região do núcleo indicado por “C”. Nesse caso, a seguinte relação é importante:

$$U_p / U_s = I_s / I_p = N_p / N_s \quad [3.31]$$

sendo que os índices “p” e “s” se referem à bobina primária e secundária, ou entrada e saída, respectivamente, enquanto:

U = Tensão (V);

I = Corrente (A);

N = Número de espiras na bobina.

Portanto, a tensão e a corrente do arco (U_s e I_s) dependem da relação de espiras entre as bobinas do primário e secundário, sendo que quedas da tensão ocorrem por efeitos de reatância e resistência.

Por sua vez, a conexão do equipamento em uma fase desequilibra a rede, enquanto que em três fases o balanço é muito melhor, mesmo quando somente uma máquina está operando. A Fig. 3.13(a) mostra esquematicamente uma ligação trifásica em delta, enquanto na Fig. 3.13(b) se observa que as fases estão defasadas de 120° entre si, podendo ser consideradas individualmente.

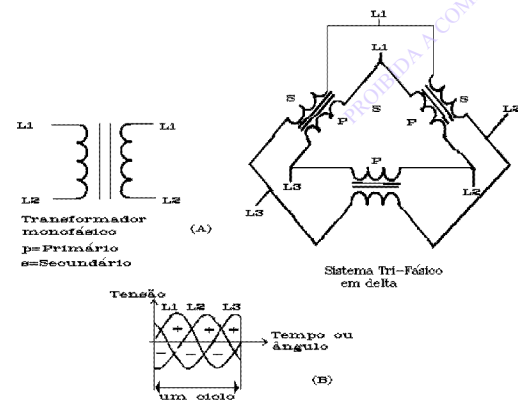


Figura 3.13 - (a) Conexão Trifásica em Delta; (b) Defasagem entre as Fases de 120°.

Os métodos usuais de controle da tensão e corrente de saída no transformador são:

▪ **Bobina Móvel**

Consiste essencialmente num núcleo alongado sobre o qual geralmente se desloca a bobina primária (Fig. 3.14). Quanto mais afastadas estão as bobinas, menor a corrente de curto-circuito e

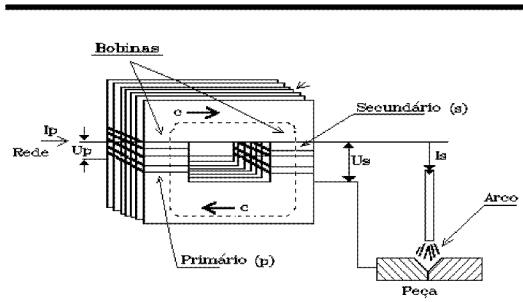


Figura 3.12 - Elementos Básicos de um Transformador para Soldagem.

maior a declividade da curva tensão versus corrente. Inversamente, quando mais próximas as bobinas, maior a corrente de curto-circuito e menor a declividade da curva, conforme mostrado nas Figs. 3.15(a,b), respectivamente.

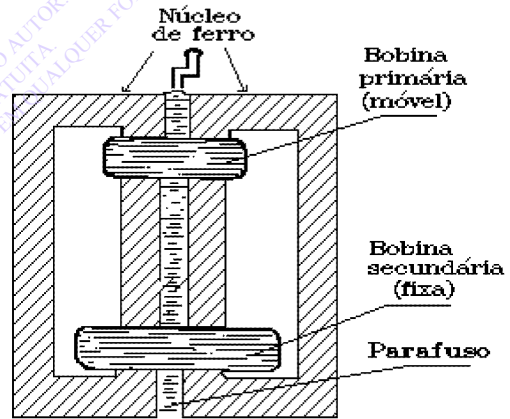


Figura 3.14 - Bobina Móvel Posicionada para a Menor Corrente de Curto-Circuito Máxima.

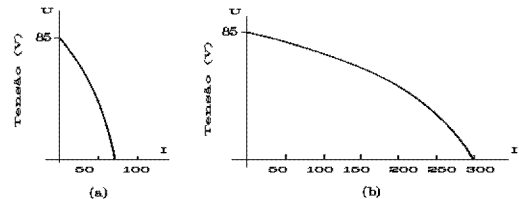


Figura 3.15 - Bobina Móvel: (a) Bobinas mais Afastadas; (b) Bobinas mais Próximas.

▪ **Derivação Móvel**

Nesse caso as bobinas primárias e secundárias são fixas, enquanto um núcleo (derivação) composto por laminados de aço se move entre as mesmas. Quando a derivação não se encontra no interior das bobinas, o fluxo magnético flui normalmente no núcleo do transformador e a curva característica possui a menor de-

clividade, com máxima corrente de curto-circuito, conforme mostrado na **Fig. 3.16(a)**. Com a introdução da derivação, há desvio das linhas magnéticas de força e quando o mesmo se encontra no interior da bobina, a corrente de curto-circuito é mínima, com a curva característica apresentando sua maior declividade, tal como ilustrado na **Fig. 3.16(b)**.

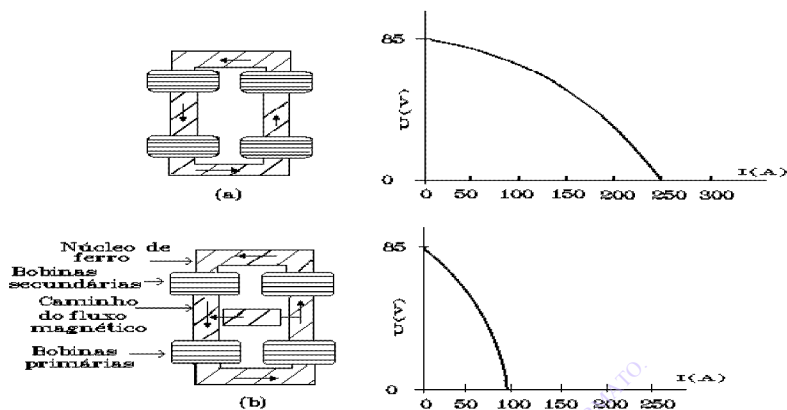


Figura 3.16 - Derivação Móvel no Interior das Bobinas: (a) Ausente; (b) Presente.

▪ **Reator de Núcleo Móvel**

É composto por um transformador de tensão constante e um reator, cuja indutância é variada pelo movimento do núcleo de ferro, como se pode ver na **Fig. 3.17**. Quando o núcleo está ausente, a corrente que circula é alta, devido à baixa permeabilidade, ocorrendo o contrário quando o mesmo é introduzido.

▪ **Reator Saturável**

Esse dispositivo emprega um circuito de baixa tensão e corrente em CC, para alterar as características magnéticas efetivas do núcleo do reator. Dessa forma, é possível o ajuste de mínimo e máximo nas curvas tensão x corrente. Um reator

saturável de auto-saturação é denominado amplificador magnético. Na **Fig. 3.18**, quando não flui corrente em A, a bobina B terá reatância máxima e mínima corrente de soldagem. Com o aumento da corrente em A, através da resistência variável Y, a saturação magnética é alcançada, com mínima reatância e máximas corrente e tensão de soldagem. Nesse caso há um acurado controle da corrente.

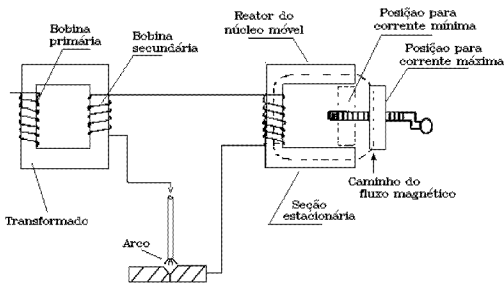


Figura 3.17 - Reator de Núcleo Móvel.

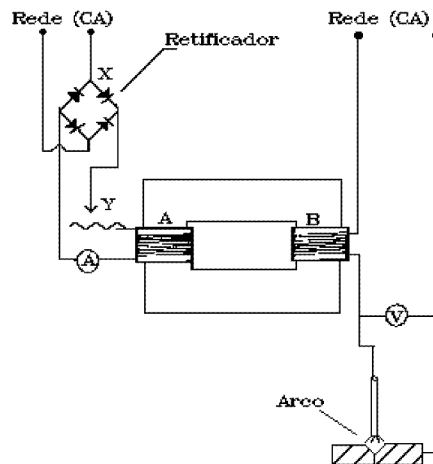


Figura 3.18 - Reator Saturável.

▪ **Resistência Variável**

Na saída do transformador são posicionados resistores com diferentes capacidades. Através de chave é selecionado aquele de interesse. Essa solução é hoje raramente empregada, pois há grande perda de energia.

Para a soldagem manual, além dos sistemas acima descritos simplificados, essas fontes de potência possuem um certo grau de impedância no secundário, fazendo com que a curva característica resultante seja tombante.

RETIFICADORES

A corrente contínua é utilizada em grande escala na soldagem.

Com inúmeras vantagens sobre outros métodos, a CC é obtida desde a CA através de dispositivos eletrônicos de estado sólido, denominados diodos. A principal característica dos mesmos é serem semi-condutores, ou seja, apresentar muito grande resistência à passagem da corrente elétrica num sentido e quase nula quando ela flui ao contrário - veja no item “Dispositivos Eletrônicos Essenciais” uma maior discussão sobre dispositivos no estado sólido.

Uma aplicação dos diodos é mostrada na Fig. 3.19(a), onde os mesmos (D1 a D4) estão numa configuração denominada “ponte” em tensão monofásica. A Fig. 3.19(b) ilustra a CA (monofásica) fornecida pelo transformador, a qual é retificada, conforme a Fig. 3.19(c). Sendo a mesma trifásica, os diodos D1 a D6 apresentados na Fig. 3.20(a) retificam a CA da Fig. 3.20(b) para aquela apresentada na Fig. 3.20(c).

Uma figura de mérito, geralmente empregada para aferir a eficiência da retificação é o “fator de ondulação (r)” definido pela equação [3.32]:

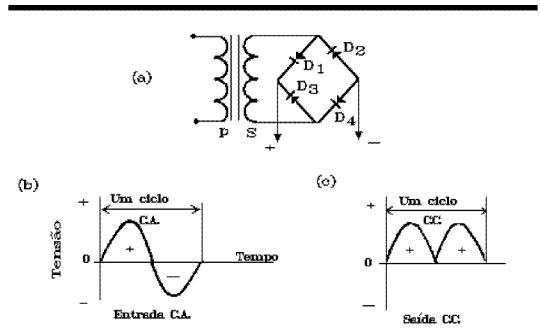


Figura 3.19 - Efeito de Retificação Monofásica dos Diodos (D1 a D4) em Ponte.

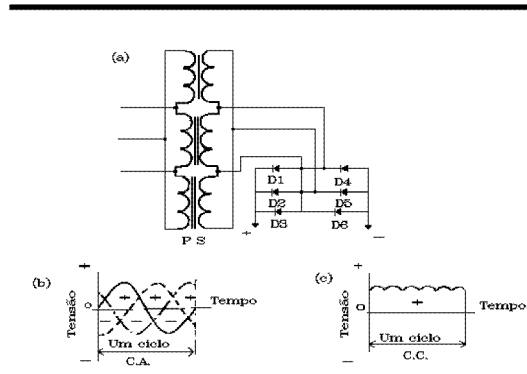


Figura 3.20 - Efeito de Retificação Trifásica com Diodos (D1 a D6).

$$r = \frac{\text{Componente da Tensão CA}}{\text{Componente da Tensão CC}} \quad [3.32]$$

ou

$$r = \frac{U_{rms}}{U_{cc}} \quad [3.33]$$

onde:

- U_{rms} = Tensão eficaz (CA), ou $(U_t^2 - U_{cc}^2)^{1/2}$;
- U_t = Amplitude total da tensão do sinal retificado;
- U_{cc} = Tensão (CC) retificada.

Portanto:

$$r = \left(\left(\frac{U_t}{U_{cc}} \right)^2 - 1 \right)^{1/2} \quad [3.34]$$

Sendo U_p a tensão de pico, $U_{cc} = 0,637U_p$ e $r = 0,483$, para a retificação em ponte apresentada na Fig. 3.20.

Na Fig. 3.21 está ilustrado um sistema transformador/retificador semelhante àqueles utilizados em fontes de potência para soldagem.

Observe-se que o mesmo (apesar de incompleto) é (bem) mais complexo do que um simples circuito de retificação.

Por outro lado, é digno de nota que o emprego da corrente contínua para soldagem tem aumentado sensivelmente em todo o mundo, principalmente através da introdução de MIG/MAG em substituição das fontes CA para Eletrodo Revestido.

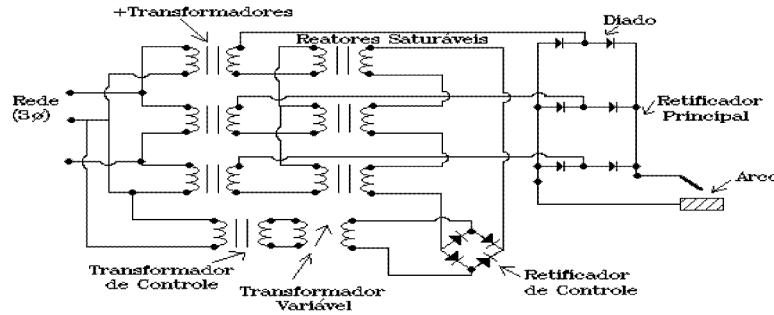


Figura 3.21 - Fonte de Potência para Soldagem do Tipo Transformador/Retificador.

GERADORES

Existem diversos tipos de geradores, máquinas as quais formam a família mais antiga das fontes de potência para soldagem.

O tipo de campo rotativo, ou alternador, originalmente fornece CA, contendo a bobina geradora do campo magnético ("bobina de campo") no rotor, com a Fig. 3.22 exemplificando seu princípio de funcionamento.

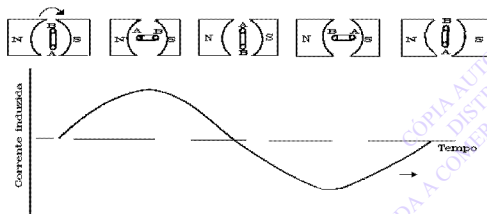


Figura 3.22 - Alternador, com a Bobina Geradora de Corrente Alternada Induzida no Rotor.

Por sua vez, geradores possuem a bobina geradora do campo magnético na armadura, com a tensão de saída controlada por um reostato, sendo que comutadores podem transformar a CA em CC. Quanto maior o número de espiras em cada bobina, maior a tensão de saída, além da corrente aumentar com o número de bobinas utilizadas em paralelo, melhorando a "retificação" da corrente alternada, conforme ilustrado na Fig. 3.23.

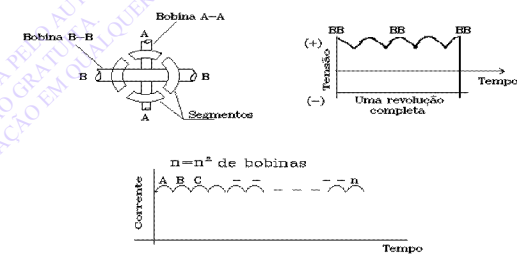


Figura 3.23 - Gerador de Corrente Contínua, com as Bobinas Geradoras do Campo Magnético na Armadura.

DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS ESSENCIAIS

Muitos dos fenômenos de interesse para os cientistas e engenheiros não são inerentemente elétricos, ainda que geralmente os sejam aqueles instrumentos e equipamento utilizados pelos mesmos. Uma das razões para isto, é a relativamente grande facilidade com que os sinais elétricos podem ser produzidos, registrados e analisados.

Há uma tendência inexorável da moderna tecnologia da soldagem, de utilizar fontes de potência e comandos baseados em cada vez mais avançados (e sofisticados) sistemas eletrônicos. Este fato exige que os interessados no desenvolvimento e emprego da soldagem entendam, pelo menos, os princípios básicos da microeletrônica, pois os antigos equipamentos (válvulas, etc.) são, hoje, de

limitada utilidade.

A microeletrônica é uma das áreas mais dinâmicas do conhecimento e novos dispositivos de estado sólido são desenvolvidos e lançados no mercado com muita frequência. Entretanto, existem alguns conceitos fundamentais que se mantêm válidos ante as modificações introduzidas. Portanto, para o leitor melhor entender e saber maximizar o uso das modernas fontes de energia que adiante serão apresentadas, é interessante que possua, como mínimo pré-requisito, as seguintes noções:

□ Semi-Condutores/Retificação

Os materiais mais utilizados atualmente para a fabricação dos diodos, são monocristais de

silício (Si) ou germânio (Ge), os quais possuem relativamente baixa condutividade elétrica e valência 4 (número de elétrons na última camada). Se a esses cristais for adicionado elementos químicos com valência diferente, em pequena proporção (ou seja, se forem “dopados”) os mesmos sofrem alteração na condutividade elétrica. Portanto, dopando-se um cristal com fósforo (P) ou arsênio (As), por exemplo, ele se torna do “tipo-n”, porque o transportador da corrente é negativo, pois esses elementos tem valência 5. Esse elétron adicional tem muito maior mobilidade do que os outros e se movimenta livremente, sendo seu local de origem denominado “vacância”. Outros elétrons podem e preenchem a vacância mas, nesse processo, criam outras. De fato, somente os elétrons se movem no cristal, ainda que as vacâncias pareçam se “mover” num sentido oposto, quando uma tensão é aplicada.

Por outro lado, se um cristal de Si ou Ge é “dopado” com elementos tais como boro ou alumínio, os quais possuem somente três elétrons de valência, é formado um cristal do “tipo-p”. Nesta situação uma vacância, em vez de um elétron, é incorporada na rede cristalina, sendo esse último um transportador “minoritário” de corrente.

Uma junção p-n pode ser criada, na qual o metal tipo-n é “rico” em elétrons e o tipo-p é deficiente. Uma vez formada esta combinação, os elétrons se difundiriam através da mesma e poderia existir uma uniforme distribuição destes e de vacâncias através dos materiais. Entretanto, se uma pequena tensão (aproximadamente 0,7 V e 0,4 V para Si e Ge, respectivamente) for aplicada na junção, é criada uma barreira que impede esta difusão. Isto é decorrência do fato dos elétrons e vacâncias em excesso nos cristais n e p, respectivamente, não poderem permanecer na fina camada que é a junção, tornando-a de polaridade diferente daquela dos cristais em questão.

Outrossim, adicionando-se contatos metálicos em cada lado da junção pn (agora um único cristal) e aplicando uma tensão, a característica unidirecional da mesma é claramente entendida. Se a polaridade for igual à da junção em cada lado, a barreira aumenta muito e essencialmente não há fluxo de corrente - na realidade, alguns microampères circulam, devido aos transportadores minoritários em cada caso. Aplicando-se polaridade contrária nos terminais, a barreira é reduzida e a corrente flui.

Portanto, o diodo é composto por ânodo (“p”) e cátodo (“n”), com o fluxo positivo de corrente ocorrendo do primeiro para o segundo.

Existem muitas variantes do circuito de retificação, como o duplicador de tensão e a filtragem (utilizando capacitores ou indutores). É digno de nota o diodo Zener, o qual regula com relativamente alta precisão a energia fornecida por uma fonte instável. Outrossim, é grande o número de circuitos conhecidos e que fornecem formas de onda as mais variadas possíveis.

□ Tiristor

Em torno de 1970, um dispositivo eletrônico denominado tiristor começou a ser empregado nas fontes de potência CC. O mesmo permite retificar, controlar, ou ligar/desligar circuitos que trabalham com potência relativamente alta.

A família dos tiristores pode ter os seguintes tipos:

▪ Retificador Controlado de Silício (“Silicon-Controlled Rectifier-SCR”)

Esse é um semi-condutor de quatro camadas (pnpn), portanto, com o ânodo e o cátodo da ligação externa conectados em “p” e “n”, respectivamente. Na camada interna “p” é conectado um terminal (“gate”), ao qual é aplicado pulsos de corrente, fazendo com que inicie a condução na “metade” npn. Isto desencadeia a condução na outra “metade” pnp. A condução é, então, auto-sustentada independentemente do potencial do terminal, enquanto um potencial positivo for mantido no ânodo. Esse dispositivo é capaz de conduzir altas correntes e o SCR desliga quando o pulso no terminal é interrompido. O ângulo de fase aplicado no terminal determina o “ângulo de disparo” do dispositivo.

Para melhor compreender o funcionamento do acima exposto, deve ser analisada a **Fig. 3.24(a)**, a qual apresenta um circuito simples. A **Fig. 3.24(b)** mostra a tensão (alternada) aplicada no ânodo, enquanto a **Fig. 3.24(c)** ilustra a corrente que passa no elemento resistivo (R), conforme os pulsos são disparados no terminal.

A desvantagem do SCR, é que ele não pode ser desligado após a condução ter começado, a menos que a tensão no ânodo seja de mesma polaridade.

▪ Triac

O funcionamento desse dispositivo pode ser analisado como dois SCR operando em paralelo e com direções opostas. O triac é um dispositivo bidirecional, ou seja, a condução pode ocorrer em qualquer direção. Quando em operação, a passagem de desligado para ligado é iniciada por um pulso de polaridade apropriada no terminal de excitação.

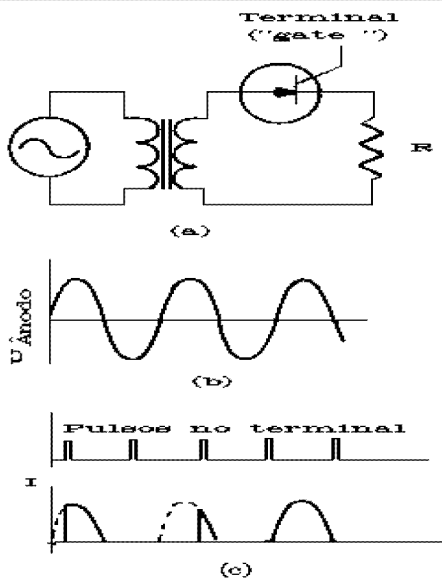


Figura 3.24 - Retificador Controlado de Silício ("SCR").

Na Fig. 3.25(a) é representada a tensão aplicada, enquanto a Fig. 3.25(b) mostra os pulsos no terminal e a conseqüente tensão no elemento resistivo.

Deve-se notar, ainda, que tanto tensão positiva, quanto negativa, ativarão o circuito dobrando, portanto, o controle de potência, em relação ao SCR.

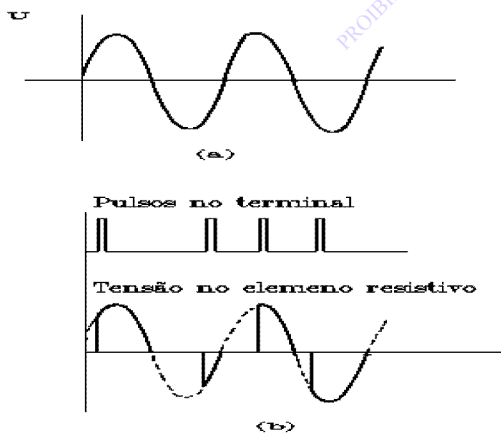


Figura 3.25 - Operação de um Triac.

▪ Interruptor Controlado de Silício ("Silicon Controlled Switch-SCS")

O SCS é uma evolução natural do SCR, mas tendo sido sanada a desvantagem desse último (a

de não poder ser desligado após a condução ter começado), através da adição de um segundo elemento de controle. Desta forma, foi obtido um dispositivo com melhor desempenho e mais ampla aplicação.

A Fig. 3.26(a) apresenta a morfologia do SCS (quatro camadas-pnpn), enquanto a Fig. 3.26(b) mostra seu símbolo em eletrônica e conexões. Portanto, o terminal do cátodo liga o dispositivo enquanto o terminal do ânodo desliga-o pela aplicação de um segundo pulso positivo.

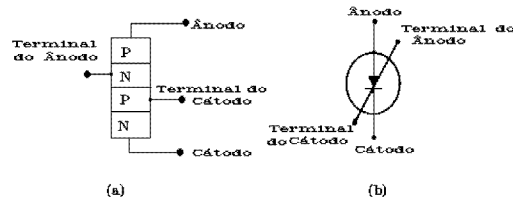


Figura 3.26 - (a) Esquema do Interruptor Controlado de Silício ("SCS"); (b) Simbologia Eletrônica e Conexões.

□ Transistor

Em 1947 a válvula tornara-se uma barreira intolerável ao progresso dos equipamentos eletrônicos, devido principalmente ao seu excessivo volume; grande dissipação de calor e alto custo. Como resposta, nesse ano o primeiro transistor foi produzido nos EUA.

Os transistores representam uma grande classe dos semi-condutores, baseados na junção pn anteriormente descrita e são, inerentemente, dispositivos amplificadores de corrente. Graças aos transistores e à miniaturização de outros dispositivos eletrônicos, foi possível o desenvolvimento dos circuitos integrados, os quais são grupos que podem ser formados por diodos; transistores; resistores e capacitores conectados entre si por um único substrato (formando um "chip").

Uma das formas em que o transistor frequentemente é utilizado, se denomina BJT ("Bipolar Junction Transistor", ou transistor de junção bipolar), o qual pode ser do tipo pnp ou npn, mostrado nas Figs. 3.27(a,b). A carga elétrica é transportada pelas vacâncias no tipo pnp e pelos elétrons no npn (majoritariamente). Como pode ser visto nas referidas figuras, o terminal central é denominado "base" sendo, em geral, o "emissor" conectado à mesma polaridade e o "coletor" em polaridade contrária.

Para a efetiva operação do transistor, mais do que 95% dos transportadores majoritários de corrente devem passar desde o emissor para o coletor sem recombinação. A razão I_C/I_E , onde I_C é a corrente do coletor e I_E do emissor, varia normalmente entre 0,95 e 0,99. O “ganho de corrente” é definido como I_C/I_B , onde I_B é a corrente da base.

O transistor de junção pode ser utilizado num equipamento em três configurações possíveis, as quais se referem à ligação, que é tanto a entrada, quanto a saída. Portanto, na configuração base comum, o sinal de entrada é aplicado aos fios do emissor e da base, enquanto a saída é tomada entre coletor e base. Essa configuração, juntamente com coletor comum e emissor comum, se encontra nas **Figs. 3.28(a-c)**, respectivamente.

Note-se que numa operação emissor co-

mun, pequenas alterações na corrente da base produzem grandes variações na corrente do coletor.

O transistor BJT é utilizado nos equipamentos, devido à sua capacidade e alta frequência de comutação. Entretanto, o mesmo necessita grande potência para controlar o sistema, pois é comandado pela corrente. Oferecendo maior frequência de comutação do que qualquer outro dispositivo, o MOSFET (“Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor”, ou transistor de efeito de campo com semi-condutor de óxido metálico) opera com pequena potência, pois é comandado pela tensão. Porém, o mesmo transporta baixa corrente.

Recentemente foi desenvolvido o IGBT (“Insulated Gate Bipolar Transistor”, ou transistor bipolar com terminal isolado), o qual possui combinadas as vantagens do BJT e do MOSFET.

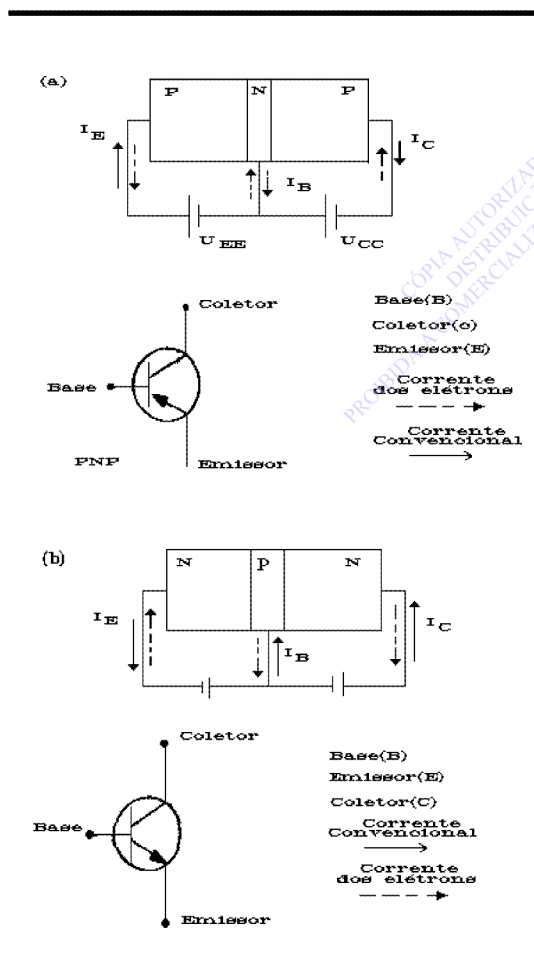


Figura 3.27 - Representações Simbólicas e Configurações do Transistor de Junção Bipolar, Tipos: (a) pnp; (b) npn.

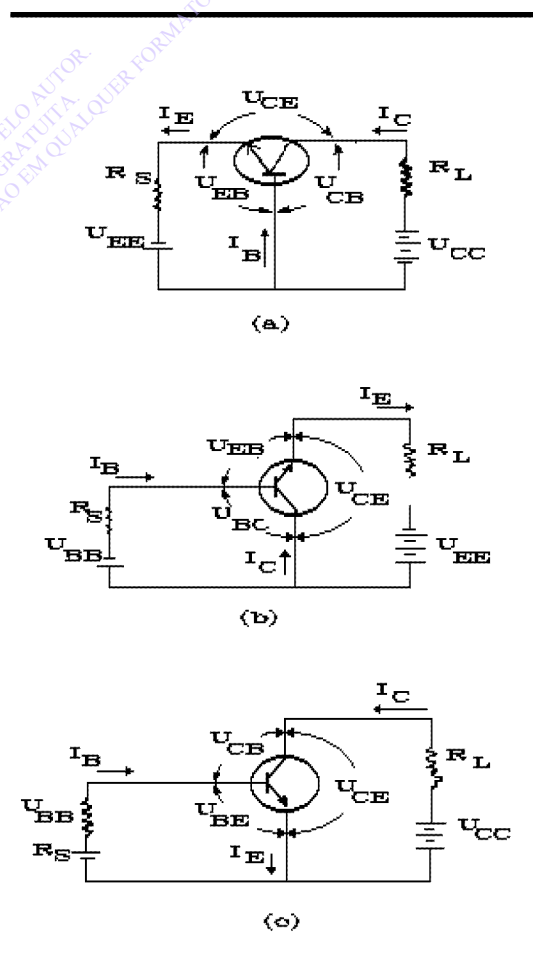


Figura 3.28 - Configurações do Transistor de Junção: (a) Base Comum; (b) Coletor Comum; (c) Emissor Comum.

MODERNAS FONTES PARA SOLDAGEM

Em torno de 1970 os transdutores começaram a ceder lugar aos tiristores nos sistemas de soldagem e, poucos anos após, os transistores passaram a substituí-los. Essa transição seguiu aproximadamente as seguintes etapas:

- Em 1970 os circuitos integrados passaram a ser utilizados na auto-ajustagem dos parâmetros de soldagem e desde 1980 as fontes podem ser controladas por microcomputadores, os quais permitem que as condições sejam programadas e executadas.

- No Japão, pouco antes de 1970 já estava sendo empregado tiristor como dispositivo de controle de saída em MIG com corrente contínua, substituindo o amplificador magnético. Em torno de 1970, o tiristor começou a substituir o amplificador magnético e o núcleo móvel nas fontes para TIG.

- Em 1975 foram introduzidas pelo The Welding Institute (Inglaterra), fontes de corrente contínua controladas analógicamente e baseadas em transistores de baixa potência. Apesar de apresentarem uma ainda melhor estabilidade dos parâmetros escolhidos; taxa superior de resposta e controle da forma da onda em corrente pulsada, estas fontes custavam cerca de dez vezes mais do que as convencionais, devido ao muito grande número de transistores necessários para operá-las, inviabilizando, assim, a comercialização em maior escala das mesmas.

- Os equipamentos para soldagem TIG com corrente contínua transistorizados começaram a ser produzidos em torno de 1976, reduzindo-se o número daqueles tiristorizados. Os do tipo amplificador magnético não são mais produzidos no Japão desde cerca de 1978.

- A produção dos equipamentos TIG transistorizados com corrente alternada iniciou em torno de 1978, já tendo ultrapassado o transformador de bobina móvel. Aproximadamente desde 1979 não é mais produzido no Japão o do tipo amplificador magnético.

- Praticamente não são mais produzidos desde 1980 no Japão equipamentos MIG/MAG de corrente contínua do tipo amplificador magnético, ocorrendo diminuição acentuada no número daqueles tiristorizados e grande aumento dos transistorizados.

- Desde 1982 é disponível o sistema inversor transistorizado (veja mais abaixo). O mesmo foi utilizado para MIG (“convencional”) pela primeira vez em 1983 no Japão, sendo em seguida

essa tecnologia também aplicada para MIG pulsado. Atualmente, naquele país essa tecnologia está presente em cerca de 80% e 40% dos equipamentos para TIG e MIG, respectivamente.

A análise da tendência mundial aponta claramente para o domínio das fontes transistorizadas com sistema inversor. Entretanto, ainda deverão se passar alguns anos, antes que o mercado seja completamente tomado pelas mesmas. Portanto, permanece o interesse em se compreender o funcionamento básico das fontes tiristorizadas e transistorizadas simples, previamente ao sistema inversor.

CONTROLES POR TIRISTORES OU TRANSISTORES

A Fig. 3.29 apresenta uma das possíveis configurações de fonte controlada por tiristor SCR no circuito secundário do transformador (6 fases), empregada para MIG/MAG e TIG, dos tipos convencional, ou com corrente pulsada. Como já visto, o sinal de saída desse tipo de tiristor depende do ângulo de fase da tensão alternada com que o mesmo é disparado. Com o efeito de reduzir a amplitude de ondulação da onda, coloca-se uma indutância em série com os tiristores, os quais fornecem onda em frequências que dependem do tipo da retificação realizada. Se for monofásico, a frequência é o dobro daquela da rede, podendo ser três ou seis vezes se os retificadores forem trifásicos.

Por sua vez, controlando uma bateria de transformadores, por chaveamento do primário dos mesmos, obtém-se uma onda retangular, a qual pode ser útil na soldagem por arco submerso. Nas fontes controladas por transistores, normalmente são utilizados vários desses dispositivos conectados entre si em paralelo, os quais regulam a corrente contínua pro-

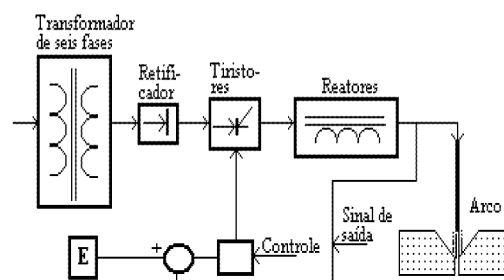


Figura 3.29 - Fonte Controlada por Tiristores (“E” simboliza o estabelecimento do sinal de saída).

veniente de um transformador-retificador.

Um exemplo é o controle analógico mostrado na **Fig. 3.30(a)**, com os transistores operando de forma linear. Há uma grande perda de energia no sistema regulador, porque a queda de tensão no transistor representa a diferença entre o fornecido e o dissipado no arco, enquanto a corrente é aquela solicitada pelo mesmo. A corrente fornecida é bastante suave e facilmente modulável, em variadas formas de onda, com frequência de até 20 kHz, ou taxa de 10^6 A/s.

O circuito anterior apresenta um problema de dissipação de energia no estágio do regulador. Utilizando o transistor no modo de chave rápida, mostrado na **Fig. 3.30(b)**, isso é reduzido, mas ainda é necessário prover o sistema com um circuito adicional para suavizar a onda. A chave funciona com frequências de 30 a 40 kHz.

SISTEMA INVERSOR

As perdas elétricas e o volume (e massa) dos transformadores (e alguns outros componentes das fontes) são inversamente proporcionais à frequência da corrente de entrada, que geralmente é aquela da rede (no Brasil 60 Hz). Um circuito inversor utiliza componentes de estado sólido, configurados de tal forma que convertem a corrente recebida e fornecem ao transformador CA de alta frequência, permitindo, assim, que as dimensões do mesmo sejam muito menores, **Fig. 3.30(c)**. Por exemplo, enquanto uma fonte convencional para 300 A pode pesar até 140 kg, aquela com sistema inversor pesaria somente cerca de 35 kg. Além disso, diversas outras características da soldagem são melhoradas, conforme será mais adiante visto.

No sistema inversor controlado por tiristor, a

tensão de entrada é inicialmente reduzida para a tensão conveniente de soldagem, através de um transformador diretamente conectado à frequência da rede. A saída é regulada, controlando o ângulo de fase de disparo do tiristor, em sincronização com a frequência da rede, antes de ser suprida ao arco através de um reator CC (para suavização da onda).

Entretanto, de maior interesse é o sistema inversor transistorizado, entre outras, pelas razões apresentadas na **Tab. 3.1**.

Tabela 3.1-Dispositivos de Controle das Fontes Inversoras

	Tiristor	BJT	MOSFET	IGBT
Capacidade de Corrente (A)	400 (Boa)	600 (Boa)	100 (Razoável)	600 (Boa)
Capacidade de Tensão (V)	2500 (Boa)	1200 (Boa)	500 (Razoável)	1200 (Boa)
Tempo de Comutação (ms)	20 (Razoável)	5 (Boa)	0,3 (Ótima)	1 (Ótima)
Comando do Controle	Comutação Forçada (Razoável)	Corrente (Boa)	Tensão (Ótima)	Tensão (Ótima)
Frequência de Operação (kHz)	1	10	100	50

Este sistema apresenta os seguintes dois circuitos principais:

- **Tipo PWM** (“Pulse Width Modulation”, ou modulação da largura do pulso), mostrado na **Fig. 3.31**, o qual é empregado nas fontes com grande intervalo de corrente e tensão de saída. O mesmo

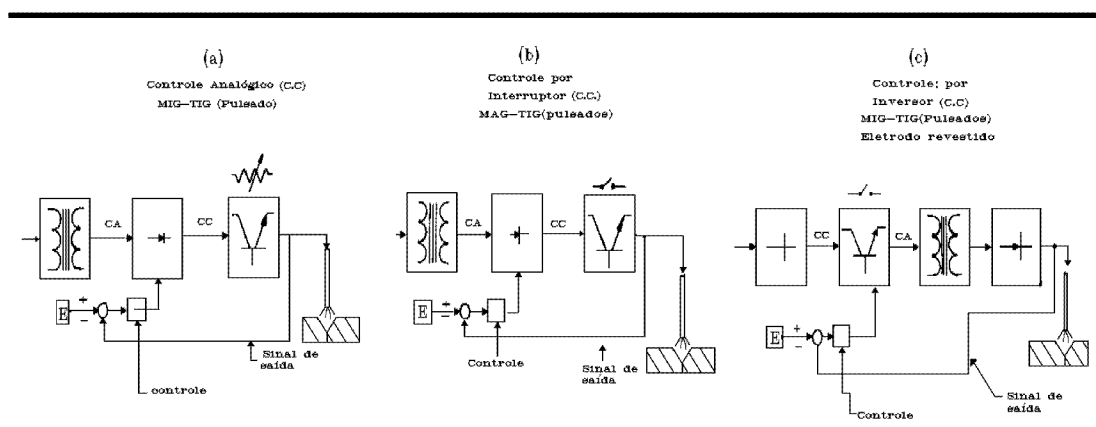


Figura 3.30 - Fontes de Potência Controladas por Transistores (“E” significa o estabelecimento do sinal de saída).

opera basicamente da seguinte forma: (a) A CA sofre retificação de onda completa e passa por um condensador; (b) Essa CC circula pelo circuito inversor, sendo transformada em CA de alta frequência (AF geralmente de 10 à 80 kHz); (c) Um transformador regula a tensão para aquela conveniente na soldagem; (d) A CA é novamente retificada e percorre um reator, resultando numa CC praticamente sem oscilação alguma.

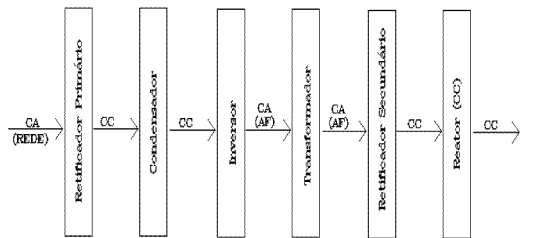


Figura 3.31-Circuito ressonante para soldagem.

- **Tipo Ressonante**, similar ao PWM, mas com um circuito ressonante posicionado após o inversor, o qual modula a (alta) frequência da CA recebida pelo transformador. Esse circuito provoca baixa interferência eletro-magnética e possui pequena perda por comutação.

Conforme suas necessidades específicas, os diversos processos de soldagem podem utilizar circuitos diferentes dos acima apresentados. Por exemplo, adicionando-se um segundo circuito inversor (secundário) exatamente após o Reator (CC) do sistema PWM, obtém-se saída em CA, ou CC, conveniente para TIG. Por sua vez, o MAG (CO₂)

em curto-circuito opera mais precisamente, se ao sistema anterior for acoplado um resistor em paralelo ao circuito inversor secundário.

Por outro lado, graças à estas inovações tecnológicas introduzidas nas fontes de potência, vários sistemas para soldagem foram lançados nos últimos anos, entre os mesmos se encontrando os seguintes:

□ Soldagem MIG/MAG com Alto Desempenho em Curto-Circuito

O estabelecimento da corrente requerida ocorre em microssegundos, com o sistema operando em alta frequência e não sendo do tipo tensão constante, nem corrente constante. Na realidade, a corrente fornecida para a soldagem por curto-circuito é estabelecida, a cada instante, em função da tensão do arco. Dessa forma, a soldagem ocorre praticamente sem salpico; o arco é estável em alta velocidade de soldagem; há total segurança na reabertura do arco e é constante a geometria do cordão de solda.

As Fig. 3.32(a,b) mostram as alterações da tensão e corrente e as diversas fases na transferência do metal desde o eletrodo para a peça, respectivamente, as quais ocorrem nas seguintes etapas:

- Intervalo 0 a T₁: manutenção da corrente base no instante imediatamente anterior ao curto-circuito, entre 50 e 100 A;
- Intervalo T₁ a T₂: através de um sistema “tensão sensível” é sinalizada o curto-circuito. Então, por cerca de 0,75 milissegundos a corrente base é reduzida para em torno de 10 A;
- Intervalo T₂ a T₃: a corrente é aumentada gradativamente ainda durante o curto-circuito, ace-

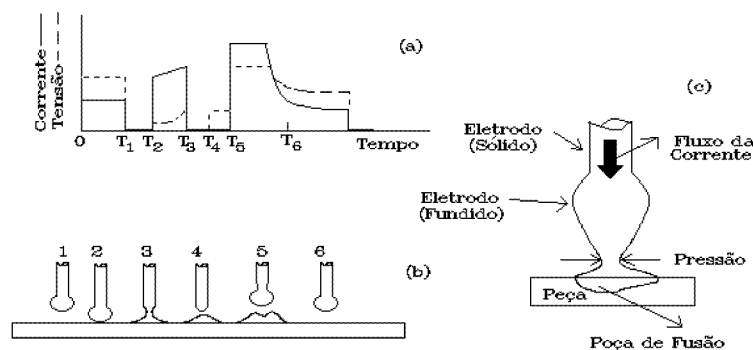


Figura 3.32 - Modo de Transferência Controlado pela Tensão Superficial: (a) Corrente e Tensão; (b) Transferência do Metal; (c) Formação da Constrição (“pescoço”).

lerando a transferência do metal através da redução da sua seção (efeito “pinch”). A tensão não é nula devido à alta resistividade do ferro no seu ponto de fusão, sendo nesse intervalo constantemente monitorada a variação da mesma no tempo. Quando a tensão atinge um dado valor, indicando que a separação está prestes a ocorrer, a corrente é reduzida para cerca de 50 A em microssegundos (de fato, a redução da seção provoca um aumento na resistência elétrica, que é o fator conhecido e indicador de que a separação ocorrerá). Isso se dá ainda antes da separação, sendo que T4 indica ter a mesma sido efetuada numa baixa corrente.

Conforme ilustrado na **Fig. 3.32(c)**, a redução da seção no metal líquido (ou “pescoço”) é devido à pressão no sentido do eixo produzida pelo fluxo de corrente. Essa pressão é: (a) Diretamente proporcional à corrente que circula elevada ao quadrado e à diferença entre o raio do “pescoço” elevado ao quadrado e a distância à partir do centro do condutor elevada ao quadrado; (b) Inversamente proporcional à quarta potência do raio do “pescoço”.

- Intervalo T5 a T6: ocorre logo após a separação do eletrodo da poça de fusão, sendo alta a intensidade da corrente;
- Após T6: a corrente é reduzida à intensidade de base, há arco e o ciclo é reiniciado.

□ MIG Pulsado de Baixa Frequência com Alimentação Constante do Arame

A velocidade variável de alimentação do arame na soldagem com MIG pulsado de baixa frequência, seguidamente produz soldas de qualidade inaceitável. Isso é devido ao relativamente grande tempo de resposta do sistema mecânico à alteração da corrente, provocada pela flutuação da tensão do arco. Especialmente na soldagem do alumínio e suas ligas, esse procedimento pode provocar defeitos no metal de solda, notavelmente porosidade.

Um novo método, com velocidade constante de alimentação do arame, é mostrado na **Fig. 3.33**.

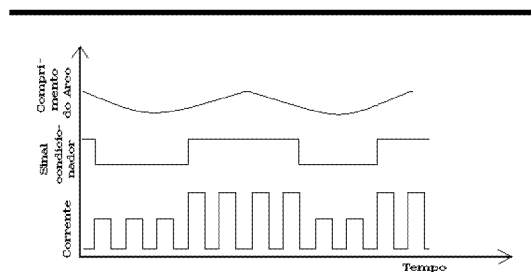


Figura 3.33—MIG pulsado de baixa frequência, com alimentação constante do arame.

O mesmo utiliza duas condições de pulso, nas quais são pré-fixadas a corrente de pico e a frequência. Com a menor frequência de pulso em torno de 15 Hz, é possível aumentar a tolerância da distância de raiz; minimizar a ocorrência de trincas de solidificação e reduzir significativamente a formação de porosidade no metal de solda.

□ TIG com Pulsos Mistos de Corrente

Através do emprego de pulsos alternados de correntes de diferentes tipos, na soldagem TIG do alumínio e suas ligas, é possível reduzir o desgaste do eletrodo não consumível; aumentar a velocidade de soldagem e melhorar a geometria do cordão de solda. Para tanto, pulsos de corrente contínua eletrodo negativo (CCEN), os quais provocam maior penetração, podem ser combinados com a ação de ruptura dos óxidos refratários realizada pela corrente alternada.

□ Retro-Alimentação “Inteligente”

A conexão das modernas fontes de potência com computadores, permitiu que as condições sejam alteradas inteligentemente durante o desenrolar da soldagem, conforme se apresentam novas situações. Dessa forma, são modificadas as condições pré-estabelecidas, em tempo real durante a monitorização dos parâmetros de soldagem, principalmente através de sinais até agora somente percebidos por operador humano, tal como o ruído provocado pelo arco.

Em suma, a introdução das fontes com sistema inversor proporcionou as seguintes principais vantagens imediatas:

□ Melhor Desempenho

Alta taxa de resposta, com melhoria na confiabilidade e estabilidade dos parâmetros escolhidos. Até o advento do sistema inversor transistorizado, os fenômenos relacionados com o arco elétrico e a poça de fusão eram considerados impossíveis de serem controlados através da fonte de potência para soldagem. Com a possibilidade de utilizar nessas fontes dispositivos que operam em frequências tão altas quanto 100 kHz (MOSFET), essa tecnologia permite uma ação muito rápida sobre a forma da onda; da intensidade da corrente e tensão de soldagem. Como a maior parte dos eventos na soldagem ocorrem numa frequência menor do que essa, atualmente é possível exercer preciso controle, no mínimo, sobre os seguintes:

- Estabilização do arco: muito rápida, atra-

vés do controle de saída de alta frequência da corrente e tensão;

- Características de abertura do arco: sensível melhoria, através de ação sobre a taxa de aumento da corrente;
- Características de término do arco: sensível melhoria, através da ação sobre a taxa de redução da corrente;
- Salpico no modo de transferência por curto-circuito: notável redução, através do preciso controle da forma da onda da corrente;
- Controle do modo de transferência; da geometria do cordão de solda; do refino do grão e da geração de porosidade: através do emprego de corrente pulsada, com variação arbitrária da frequência e forma da onda;
- Controle da Penetração e do Reforço do Cordão de Solda em CA: através da variação arbitrária da razão entre a parcela em que o eletrodo é

negativo e aquela em que o mesmo é positivo na onda CA.

❑ Funções Múltiplas

Possibilidade de alterar arbitrariamente a curva característica da fonte e as demais condições de soldagem;

❑ Comunicação com Equipamentos Periféricos Facilitada

Devido ao fato de que os circuitos integrados operam com sinais de baixa potência, a conexão com controles periféricos; sistemas automáticos e robôs foi extremamente facilitada;

❑ Redução de Custos e Preço

Os dispositivos eletrônicos são cada vez mais baratos e, conseqüentemente, o preço final do equipamento é constantemente reduzido.

SELEÇÃO DA FONTE DE POTÊNCIA

INTRODUÇÃO

A criteriosa seleção de uma específica fonte de potência elétrica para a soldagem pode ser difícil, pois provavelmente existirão conflitos entre os vetores técnicos e econômicos. Os principais fatores envolvidos são os seguintes:

- Processo em que a fonte será utilizada;
- Necessidade de alterar o tipo de curva característica (tensão ou corrente constante);
- Necessidade de variar a tensão de circuito aberto;
- Tipo da corrente: CC, CA, ambas, ou pulsada;
- Intervalo entre a mínima e a máxima corrente de soldagem;
- Ciclo de trabalho: tempo de arco aberto em relação ao tempo total de soldagem (maior descrição a seguir);
- Tensão, frequência, potência e número de fases disponíveis na rede de alimentação;
- Condições econômicas: qual o capital disponível, por exemplo;
- Condições ambientais: efeito da fonte sobre o ambiente e vice-versa;
- Sistema múltiplo operador: várias estações de solda conectadas numa mesma fonte. Nesse caso, o número de estações que podem operar simultaneamente é igual à Potência Disponível/(Ciclo de Tra-

balho x Corrente Média);

- Robustez e confiabilidade;
- Simplicidade de manutenção;
- Atendimento às Normas/Código vigentes no país em que opera;
- Necessidade de controle remoto e/ou automatização;
- Ajuste simples das operações;
- Necessidade de controle das operações e possibilidade de instalação de equipamentos auxiliares compatíveis;
- Condições de volume e massa, além do acesso (e “lay-out”) à fonte e acessórios.

Nem sempre é prestada a devida atenção aos sistemas de controle periféricos dos equipamentos para soldagem. Por exemplo, geralmente as fontes convencionais utilizam relés, ou componentes eletrônicos discretos, para controlar as seqüências necessárias de operação. Por sua vez, as fontes controladas por circuitos eletrônicos podem tanto fazer uso de componentes eletrônicos discretos, quanto de circuitos integrados, ou mesmo microprocessadores. Desta forma, esse sistema apresenta uma performance muito melhor em termos de taxa de resposta; precisão; custo e, ao contrário do que alguns usuários de fontes convencionais possam imaginar, maior confiabilidade de operação no longo prazo. Outrossim, comandos e seqüências inteiras das operações de soldagem tan-

to podem ser armazenadas em “chips” do tipo ROM (“Read Only Memory”, ou que executa somente aquilo que foi previamente programado no mesmo), ou RAM (“Random Access Memory”, ou programável pelo usuário).

Uma das mais importantes características das fontes eletrônicas, é a facilidade com que controles de retro-informação podem ser instalados, com alta velocidade de resposta à estímulos. Esse sistema opera através da comparação entre as condições previamente estabelecidas e aquelas que realmente estão ocorrendo durante a soldagem, sendo qualquer desvio rapidamente corrigido.

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS

Para facilitar a confrontação dos sistemas disponíveis, apresenta-se a seguir um resumo das principais características de cada tipo de fonte:

□ Fontes do Tipo Convencional

Destacam-se os seguintes fatos: (a) Entre média e pequena eficiência elétrica; (b) Entre médio e grande volume e massa; (c) Preço reduzido; (d) Pouca repetibilidade; (e) Entre média a pouca adequação para corrente pulsada; (f) Entre média e pouca adequação para automação; (g) Alta robustez.

Os tipos específicos possuem, ainda, as peculiaridades abaixo descritas:

▪ **Transformador Retificador com variação discreta de saída** (“taps”): (a) Regulagem grosseira (por intervalos) da saída; (b) Geralmente é impraticável utilizar controle remoto; (c) Normalmente é empregado em MIG de baixo custo para trabalhos leves.

▪ **Transformador/Retificador com derivação móvel**: (a) Adaptação cara do controle remoto, com problemas de desgaste e regulagem lenta; (b) Normalmente utilizado com Eletrodo Revestido; (c) Preço reduzido e de pequena capacidade.

▪ **Transformador/Retificador de núcleo móvel**: (a) Geralmente impraticável utilizar controle remoto; (b) O Reator de alta corrente é um componente caro; (c) Utilizado no passado para TIG e Eletrodo Revestido.

▪ **Transformador/Retificador com reator saturável** (amplificador magnético): (a) Variação contínua da saída; (b) Controle remoto possível; (c) Alguma alteração na forma da onda de saída possível; (d) Pequena taxa de resposta; (e) A CC

de controle pode ser alta (cerca de 10 A); (f) Normalmente utilizado em TIG e MIG.

□ Fontes Eletrônicas

▪ **Controle de Fase SCR**: (a) Entre média e alta eficiência elétrica; (b) Entre médio e grande volume; (c) Preço médio; (d) Repetibilidade média; (e) Taxa média de respostas entre 3 e 10 milissegundos; (f) Média propensão para uso em MIG pulsado; (g) Média propensão para automatização; (h) Sistema simples e robusto; (i) Grande amplificação, com altas correntes de saída controladas por muito pequenos níveis de sinais eletrônicos; (j) Limitada suavização da onda saída, mas muito melhor performance do que as do tipo convencional, além de ser possível estabilizá-la através de retro-informação; (l) Utilizado para Eletrodo Revestido; MIG em CC; onde de forma retangular para TIG em CA, Arco Submerso.

▪ **Controle por Transistores em Série**: (a) Pequena eficiência elétrica; (b) Entre médio e grande volume; (c) Alto preço (devido à necessidade de balancear cada transistor e assegurar repartição da corrente); (d) Alta repetibilidade; (e) Alta taxa de resposta (microsegundos para um transistor); (f) Grande propensão para o uso em MIG pulsado; (g) Alta propensão para automatização; (h) Média robustez; (i) Grande suavização da onda de saída; (j) Recomendável para fornecimento de pequena corrente, com alta precisão, além de pesquisas sobre processos, em TIG, MIG e Arco Submerso.

▪ **Controle por Chaveamento de Transistor no Secundário**: (a) Entre média e alta eficiência elétrica; (b) Médio volume; (c) Preço médio; (d) Alta repetibilidade; (e) Entre média e alta taxa de resposta (microsegundos); (f) Alta propensão para uso em MIG pulsado; (g) Alta propensão para automatização; (h) Média robustez; (i) O nível médio da saída é função da razão entre os tempos em que o transistor está ligado e desligado (cuja frequência varia entre 1 e 25 kHz); (j) Alta precisão em correntes de até 500 A, para MIG e TIG.

▪ **Retificador/Inversor no Primário**: (a) Alta eficiência elétrica; (b) Pequeno volume (pequeno transformador); (c) Preço entre médio e pequeno; (d) Alta repetibilidade; (e) Entre média e alta taxa de resposta; (f) Alta propensão para uso em MIG pulsado; (g) Alta propensão para automatização; (h) Média robustez; (i) Utilizada em Eletrodo Revestido, além de TIG e MIG pulsados.

FATOR DE POTÊNCIA E CONEXÕES

O produto da tensão (U) pela corrente (I) somente fornece a potência verdadeiramente disponível por qualquer circuito de corrente alternada, se ambos estiverem em fase, ou seja, passarem ao mesmo tempo por zero e pelos seus valores máximos. Caso contrário, U.I (em kVA) é denominada potência aparente, sendo proporcional à corrente que circula e, conseqüentemente, responsável pelas perdas nos seus componentes resistivos (I^2R).

Estando a corrente defasada da tensão por um ângulo " ϕ ", a mesma pode ser resolvida em dois componentes, ou seja: (a) $I \cdot \cos \phi$, ou aquele em fase com a tensão e que é o componente útil da potência; (b) $I \cdot \sin \phi$, o qual está defasado 90° da tensão e é denominado componente reativo, não produzindo potência útil. Dessa forma, quanto mais defasada a corrente, maior o ângulo ϕ e, portanto, menor seu coseno, o qual é denominado "fator de potência".

Por sua vez, a potência verdadeira é o resultado de $U \cdot I \cdot \cos \phi$ (unidade kW), enquanto a unidade do componente reativo da potência é geralmente indicada por kVAr (quilovolt-ampéres, com o "r" indicando estar o mesmo fora de fase).

Portanto, é possível que dois circuitos elétricos possuam a mesma potência verdadeira (kW), mas circulem nos mesmos diferentes fluxos de corrente (e com perdas I^2R distintas), pois a defasagem (ângulos ϕ) entre a corrente e a tensão não é a mesma em cada caso. Como a tarifa elétrica industrial geralmente é baseada no componente reativo da potência (kVAr), o usuário daquele circuito que operar com baixo fator de potência (grande ângulo ϕ) e, portanto, alto kVAr, será penalizado pagando mais por cada unidade de energia elétrica que realmente utilizar.

Em geral, há tendência de ser baixo o fator de potência, quando se emprega equipamentos para soldagem, principalmente devido aos circuitos indutivos contidos nos mesmos. Não sendo este o caso, uma forma de se corrigir (aumentar) o fator de potência e, conseqüentemente, diminuir o ângulo ϕ , é adicionar bancos de capacitores.

Outro aspecto de muita importância na instalação da fonte de potência, refere-se aos cabos de conexão com a peça e o porta eletrodo. Estes cabos devem ser flexíveis e corretamente dimensionados, devido às elevadas correntes utilizadas e questões de segurança envolvidas. Recomenda-se que na especificações da seção dos mesmos, sejam levados em consideração, no mínimo, os se-

guintes fatos:

- O ciclo de trabalho deve ser determinado;
- O isolamento precisa ser de muito boa qualidade e aprovado por Norma aplicável no país;
- A corrente máxima prevista para trabalho seja, no mínimo, 50 A abaixo da máxima fornecida pelo equipamento.

Para auxiliar neste dimensionamento, a **Tab. 3.2** mostra relações entre a seção do cabo (de cobre) e a corrente máxima de soldagem, em função do ciclo de trabalho. Note-se que são nominais o número de arames e dimensões dos mesmos nos condutores.

Por outro lado, deve ser previamente avaliada a influência dos comprimentos dos cabos sobre a queda de tensão disponível no arco, pois em grandes distâncias a mesma pode ser considerável. Uma das formas de se calcular essa queda de tensão (ΔU), é através da seguinte fórmula:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot L \cdot I}{A \cdot c} \quad (V) \quad [3.35]$$

onde:

L = Comprimento do cabo, sendo 2L para as duas conexões (m);

I = Corrente (A);

A = Seção transversal do cabo (mm^2);

c = Condutividade elétrica (igual à 56,1 $\text{m} \cdot \Omega^{-1} \cdot \text{mm}^2$ para o cobre).

Exemplificando, a seguir é realizada uma comparação entre as quedas de tensão em cabos conduzindo 250 A, com seção de 70 mm^2 , para os comprimentos de:

- L=10 m

$$\Delta U = 2 \times 10 \times 250 / (70 \times 56,1) \cong 1,3 \text{ V}$$

- L=60 m

$$\Delta U = 2 \times 60 \times 250 / (70 \times 56,1) \cong 7,6 \text{ V}$$

Portanto, para a maioria dos casos a queda de tensão é desprezível, numa relativamente pequena distância. Entretanto, supondo que a tensão de trabalho seja 26 V, o segundo caso representa quase 30% a menos de tensão disponível, gerando uma situação inaceitável. Dessa forma, cabos com maior seção transversal devem ser utilizados, para reduzir a queda de tensão a níveis suportáveis.

Tabela 3.2 - Área do Condutor (cobre) e Corrente de Soldagem, em Função do Ciclo de Trabalho

Condutor		Corrente (A) num Ciclo de Trabalho Máximo de				
Área Nominal (mm ²)	Número / Diâmetro dos Arames (mm)	100%	85%	60%	30%	20%
16	513 / 0,20	105	115	135	190	235
25	783 / 0,20	135	145	175	245	300
50	1566 / 0,20	220	240	285	400	490
70	2214 / 0,20	270	295	350	495	600
120	608 / 0,50	380	410	490	680	850
185	925 / 0,50	500	540	650	910	1120

CÓPIA AUTORIZADA PELO AUTOR.
DISTRIBUIÇÃO GRATUITA.
PROIBIDA A COMERCIALIZAÇÃO EM QUALQUER FORMATO.

**C
A
P
Í
T
U
L
O

04**

SOLDAGEM A ARCO COM ELETRODO REVESTIDO

INTRODUÇÃO	70
CARACTERÍSTICAS ESSENCIAIS DOS CONSUMÍVEIS	72
Introdução	72
Tipos de Revestimentos	73
Pó de Ferro	75
DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS CONSUMÍVEIS	76
Aços ao Carbono	76
Aços Baixa Liga	81
Aços Inoxidáveis	81
Cobre e suas Ligas	92
Ferros Fundidos	92
Revestimentos Protetores	93
Níquel e suas Ligas	96
RESSECAGEM DOS ELETRODOS REVESTIDOS	98
SOLDAGEM POR GRAVIDADE E POR CONTATO	99
SELEÇÃO DO ELETRODO REVESTIDO	101
Introdução	101
Alguns Indicadores de Produtividade	102
Categorias ASME	105
OPERACIONALIZAÇÃO DO PROCESSO	107
Variáveis de Procedimento	107
Manipulação do Eletrodo ("Tecimento")	109
PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM	111

INTRODUÇÃO

Nesse processo, o arco elétrico ocorre entre um eletrodo revestido consumível e a peça (conforme mostrado na **Fig. 4.1**), sendo assim estabelecida a poça de fusão.

O eletrodo é formado pelo arame (“alma”), o qual é revestido concêntricamente com uma massa composta de diversos minerais e produtos químicos. Os gases e a escória provenientes da decomposição deste revestimento, protegem da atmosfera o metal fundido e, além disso, são os principais responsáveis pelas reações pirometalúrgicas que ocorrem sob uma temperatura maior do que 6000 K.

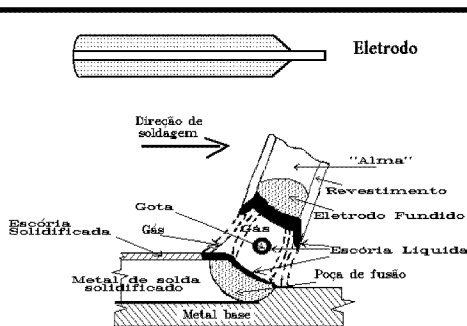


Figura 4.1-Soldagem com Eletrodo Revestido.

Sem nenhuma dúvida, foi devido ao eletrodo revestido que a soldagem projetou-se como um dos mais importantes processos de fabricação, como conseqüência direta da sua extrema flexibilidade.

Até cerca de 1907 a soldagem era praticada com um arame nu (sem revestimento), o que gera diversos problemas, tais como instabilidade do arco e reações dos gases do ar com o metal fundido, reduzindo muito a qualidade da solda. Em 1910, o sueco Oscar Kjellberg obteve uma patente (solicitada em 1907), na qual a alma do eletrodo era recoberta com um material argiloso. Esse revestimento propiciava mais fácil abertura do arco e aumentava sua estabilidade. Além disso, a escória formada pela decomposição do mesmo protegia a poça de fusão do contato com a atmosfera e permitia o uso do consumível em posição contrária à da gravidade (“sobrecabeça”).

Iniciava-se, assim, a moderna era da tecnologia da soldagem.

Este processo é apropriado para a maioria das ligas metálicas, no mínimo com os seguintes consumíveis disponíveis: aços ao carbono, baixa liga, resistentes à corrosão e altamente ligados; ferros

fundidos; alumínio; cobre; níquel. Entretanto, o mesmo não é adequado para ligas com muito baixo ponto de fusão (tais como chumbo, estanho ou zinco) devido à intensa energia gerada pelo arco elétrico, nem para aquelas extremamente reativas (tais como zircônio ou titânio) por não oferecer suficiente proteção à contaminação e/ou reação do metal fundido com os gases da atmosfera.

O circuito elétrico básico para esse processo é exibido na **Fig. 4.2**, consistindo essencialmente numa fonte de energia e cabos de conexão ao porta eletrodo e à peça (cabo “terra”, ou “retorno”).

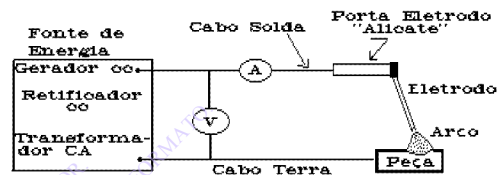


Figura 4.2-Sistema essencial para a soldagem com eletrodo revestido.

A tensão de circuito aberto se situa entre 60 e 90 V, enquanto aquela de trabalho permanece entre 20 e 40 V, não sendo geralmente viável a operação fora do intervalo 14 - 45 V. A corrente varia normalmente de 30 a 500 A, dependendo do tipo e do diâmetro do consumível, além da posição de soldagem. Na maioria das aplicações, os consumíveis empregados possuem diâmetros (medidos na “alma”) entre 1,5 e 8 mm, nos comprimentos usuais de 350 e 450 mm, mas podendo alcançar até 700 mm, ou mais. Por sua vez, é possível ocorrer a transferência do metal desde o eletrodo para a peça nos modos curto-circuito; gota, ou aerossol (“spray”), principalmente em função do tipo de revestimento, da tensão e da corrente de soldagem.

Dependendo do revestimento do eletrodo, o mesmo poderá operar em corrente contínua (CC), ou alternada (CA). De qualquer modo, a curva característica da fonte deverá ser do tipo corrente constante (“tombante”), já que num processo manual é impossível se manter absolutamente estável o comprimento do arco. Sob certas circunstâncias, é interessante que seja pequena a declividade dessa curva, permitindo ao soldador alterar a corrente através de ligeira modificação do comprimento do arco. Isso ocorre em casos de juntas mal posicionadas; com variação da geometria, ou,

ainda, quando é necessário ajustar a intensidade da corrente e o controle está muito afastado do local da soldagem. A curva III da **Fig. 3.5** (página 46) é um exemplo desse caso.

A escolha entre o tipo de corrente (CA ou CC) dependerá de considerações tais como: (a) Razões históricas, com preferências nacionais (ou mesmo regionais); (b) Todos os eletrodos revestidos podem operar com CC, o mesmo não sendo verdadeiro para CA; (c) Eletrodos de pequeno diâmetro, operando com baixa intensidade de corrente, apresentam arco mais estável em CC; (d) O fator de potência é, em geral, maior para um retificador do que para um transformador; (e) A deflexão eletromagnética do arco é menor (ou desprezível) com CA; (f) O transformador, em geral, exige menor investimento do que um retificador; (g) É mais fácil iniciar o arco e mantê-lo curto em CC do que em CA.

Outros fatores devem, ainda, ser levados em consideração para a escolha do tipo da corrente de soldagem. Por exemplo, com eletrodo negativo (CCEN), a penetração é menor e a taxa de deposição é maior do que com eletrodo positivo (CCEP), enquanto em CA esses valores são intermediários.

Por outro lado, a escolha adequada dos acessórios para a soldagem não são sempre devidamente considerados, principalmente quanto à funcionalidade dos mesmos.

O porta eletrodo é o instrumento pelo qual o soldador domina o movimento do consumível. É muito importante que a corrente seja transferida com mínima resistência entre as garras do mesmo e o eletrodo pois, caso contrário, ocorre superaquecimento, com desconforto para o soldador e queda de tensão. Outros aspectos essenciais do porta eletrodo, são o seu adequado isolamento elétrico; pouco peso; ranhuras com a inclinação adequada para posicionar o eletrodo no ângulo desejado, além da geometria condizente com o trabalho realizado e grande robustez.

Os cabos de conexão devem possuir área da seção transversal adequada ao ciclo de trabalho e corrente, além de suficiente flexibilidade, conforme descrito no Capítulo 3. Quando existir necessidade de extensão, a conexão dos cabos deve ser feita com conectores e isoladores adequados, minimizando a resistência elétrica.

A limpeza da escória é essencial, principalmente entre cada passe de solda. Com o picador a escória é fraturada e retirada com escova de metal. É importante que o picador não seja utilizado como martelo, pois o impacto da sua ponta aguda pode

provocar trincas, ou concentrar tensões no cordão de solda. A escova deve ser de metal compatível com a solda realizada, isto é, não utilizar aquela de aço em cobre, por exemplo, pois pode ocorrer contaminação da mesma.

No **Anexo 2** são descritos os principais aspectos que devem ser considerados para que a soldagem seja realizada com segurança. Entretanto, nunca é demais lembrar que o arco elétrico produz (principalmente) raios infravermelhos e ultravioletas e que o soldador deve vestir peças protetoras e utilizar um elmo com filtro adequado para os olhos. Então, são utilizados luvas; aventais; macacões; perneiras, etc., fabricados com materiais resistentes ao calor e isolante (muitas vezes de couro). Os elmos devem proteger toda a cabeça, com o visor consistindo de um filtro sobre o qual se pode colocar um vidro para receber os salpicos, pois esse é trocado a baixo custo. O filtro sugerido (AWS) para uso com eletrodo de até 4 mm de diâmetro é o de nº 10; para bitolas entre 4,8 e 6,4 mm o de nº 12, enquanto o de nº 14 para eletrodos com maiores diâmetros. Deve-se enfatizar, ainda, que a falta de uma adequada proteção pode provocar sérias queimaduras na pele e nos olhos. Além disso, a soldagem precisa ser realizada em ambientes corretamente ventilados, pois alguns dos fumos e gases emanados são tóxicos. Na impossibilidade de tal ventilação, o ar deve ser fornecido individualmente para o soldador. Maiores detalhes podem ser encontrados, por exemplo, na “American National Standard Z 49.1-Safety in Welding and Cutting”, publicada pela AWS, provavelmente a Norma mais difundida no mundo sobre esse assunto.

A soldagem é iniciada através de um rápido curto-circuito entre o consumível e a peça. Para tanto, a peça deve ser “riscada” com a ponta do eletrodo, em um movimento ilustrado na **Fig. 4.3**. Durante a operação, o comprimento do arco será mantido tão curto e constante quanto possível, pois além de exercer direto efeito sob a tensão, esse fator altera a composição química do metal de solda (principalmente com relação à admissão de gases da atmosfera) e, conseqüentemente, modifica suas propriedades mecânico/metalúrgicas. Na **Fig. 4.4(a)** o movimento (“balanço”) do eletrodo mantém corretamente o arco. Entretanto, o excesso de balanço ilustrado na **Fig. 4.4(b)** (com o deslocamento lateral ultrapassando 3 vezes o diâmetro do consumível) provoca contaminação do metal fundido pelos gases da atmosfera e aumenta notavelmente o teor de nitrogênio no mesmo, fragilizando-o.

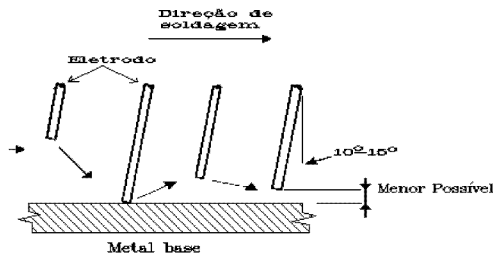


Figura 4.3-Movimento a ser realizado pelo soldador com o eletrodo para iniciar a soldagem.

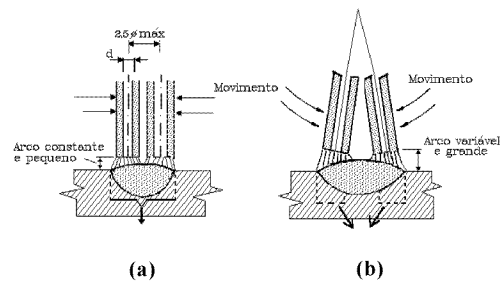


Figura 4.4- Balanço do eletrodo. Metal de solda: (a) 0,85% Mn; 0,25% Si; 500 ppm O₂; 40 ppm N₂; (b) 0,75% Mn; 0,18% Si; 500 ppm O₂; 100 ppm N₂.

CARACTERÍSTICAS ESSENCIAIS DOS CONSUMÍVEIS

INTRODUÇÃO

A alma do eletrodo revestido para soldagem dos aços ao carbono e baixa liga é, geralmente, produzida com aço “efervescente” (não desoxidado), o qual possui uma típica composição química de 0,10% C; 0,45% Mn; 0,01% Si; 0,03% S e 0,02% P. Esse aço solidifica com um anel externo de ferrita quase pura, com as inclusões localizadas no centro, resultando numa excelente estrutura para a trefilação do arame. As microporosidades formadas provavelmente auxiliam na transferência do metal durante a soldagem, através da expansão dos gases contidos no interior das mesmas. Além disso, devido aos baixos teores de silício e alumínio da alma, a estabilidade do arco é melhor que aquela obtida com aço “acalmado” (desoxidado).

Para os eletrodos que devem depositar metal de solda ligado, as opções são utilizar aço similar na alma (consideradas as perdas) ou elementos de liga no revestimento (eletrodo “sintético”), ou, ainda, os dois métodos simultaneamente.

Por sua vez, os revestimentos, devem satisfazer e cumprir um grande número de funções, destacando-se as seguintes:

▪ Metalúrgicas

(a) Proteção do metal durante a sua transferência, através da geração de gases e escória; (b) Desoxidação da poça de fusão; (c) Em certos casos, transferir elementos de liga; (d) Transferir o mínimo possível de hidrogênio para a poça de fusão, pois esse elemento coopera para a produ-

ção de trincas e porosidade.

▪ Controle do Arco

(a) Possuir elementos com baixo potencial de ionização, de forma a facilitar a ignição e re-ignição do arco; (b) Estabilizar o arco; (c) Regular a penetração; (d) Diminuir a produção de salpicos.

▪ Operação e Manipulação

(a) Produzir escória com intervalo de fusão conveniente, solidificando após o metal de solda; (b) Produzir escória com adequada viscosidade; (c) Produzir escória com adequada tensão interfacial com o metal de solda (geometria do cordão); (d) Produzir escória que seja facilmente destacável.

▪ Fabricação

(a) Os custos dos compostos do revestimento devem ser relativamente baixos; (b) A “massa verde” (o produto resultante da adição de silicatos aos compostos secos do revestimento) que irá revestir a alma deve ser de fácil produção; (c) A extrusão do revestimento deve ser realizada sem dificuldades; (d) Deve existir adesão suficientemente grande entre o revestimento e a alma; (e) O revestimento deve ser resistente a trincas nas operações de secagem e ressecagem; (f) A massa verde deve ser resistente à deformação; (g) O produto final deve resistir à embalagem; transporte e manipulação.

A análise desta lista de funções esperadas do revestimento (a qual não pretende estar comple-

ta), mostra quão complexa é a otimização de todos os fatores envolvidos, sendo o objetivo obter um consumível que produza soldas com características mecânico/metalúrgicas específicas.

Para satisfazer aos diversos requisitos industriais, os eletrodos são produzidos com revestimentos diferentes, cujos compostos, quando combinados, conferem aos mesmos propriedades que os tornam mais ou menos aptos para uma dada aplicação. Na **Tab. 4.1** são apresentados os principais constituintes dos revestimentos e suas funções mais importantes. Note-se que quase todos os compostos atuam sobre mais de uma propriedade, tornando o equilíbrio final uma difícil questão.

Por outro lado, os eletrodos revestidos são fabricados em extrusoras de alta velocidade (muitas vezes ultrapassando 1000 eletrodos/minuto) e um possível fluxograma da produção está mostrado na **Fig. 4.5**.

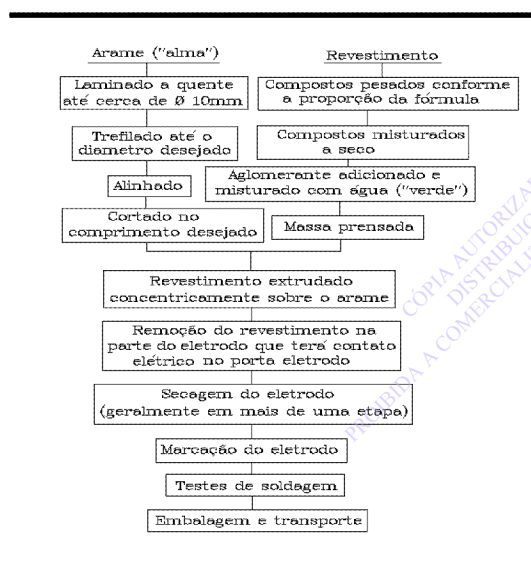


Figura 4.5-Fluxograma das operações essenciais para a produção de eletrodos revestidos.

Na descrição dos tipos de revestimentos que a seguir será apresentada, é importante se considerar a questão relacionada com a basicidade da escória. De um modo geral, quanto maior for no revestimento a razão entre o somatório dos compostos básicos (tais como CaO ; MgO , etc.) e os ácidos (tais como SiO_2 ; Al_2O_3 , etc.) mais básica é a escória, sendo essa relação denominada “Índice de Basicidade (IB)”. Em geral, quanto maior for esse IB, menor o nível de oxigênio no metal de solda nos aços (com redução da população de inclusões) e, conseqüentemente, mais alta a tenacidade à temperatura ambiente.

Maiores informações sobre esse assunto poderão ser encontradas no volume dedicado à Metalurgia da Soldagem, o qual é parte dessa série e será próximamente editado.

TIPOS DE REVESTIMENTOS

Dependendo dos compostos empregados e da proporção com que os mesmos se encontram no revestimento, os eletrodos podem ser classificados nos seguintes principais tipos:

□ Ácido

Esse consumível praticamente não é mais produzido, pois apesar do metal de solda apresentar relativamente boa aparência, o mesmo possui muito baixas propriedades mecânico/metalúrgicas, devido a ser efervescente (alto conteúdo de oxigênio). Entretanto, a sua descrição é ilustrativa, pois mostra um caminho a não ser seguido.

O revestimento contém altos teores dos óxidos de ferro e manganês, além de silicatos de alumínio e ferro-manganês. A tensão de trabalho se situa entre 20 e 40 V, dependendo da bitola do eletrodo, sendo possível a solda em qualquer posição, desde que o revestimento seja pouco espesso. Porém, geralmente esse consumível possui revestimento de grande diâmetro, soldando na posição plana, tanto em CA, quanto em CCEP. Com maiores teores de sílica e/ou alumina e elevada tensão (50 V), é obtida alta penetração na junta. A escória (ácida) é produzida em abundante quantidade, com a aparência de favos (porosa) e facilmente destacável. O metal de solda produzido por esse eletrodo é o mais sucetível (dentre todos) à trincas de solidificação e, portanto, os elementos carbono, enxofre e fósforo devem se encontrar em muito baixos teores.

□ Básicos

O metal de solda depositado por esse consumível pode apresentar as melhores propriedades mecânico/metalúrgicas entre todos os eletrodos (destacando-se a tenacidade) e, portanto, o mesmo deve ser preferido onde são grandes essas solicitações.

O revestimento contém elevados teores de carbonato de cálcio e fluorita, com dificuldades para operar em CA, quando o conteúdo desse último composto é excessivamente elevado. A escória se apresenta fluida e é facilmente destacável, com o cordão sendo de média penetração e perfil plano ou convexo. O metal depositado é altamente desoxidado e com muito baixo nível de inclu-

Tabela 4.1 - Alguns Compostos Utilizados nos Revestimentos dos Eletrodos e suas Principais Funções

Composto	Função: >/< =Atuação primária; +/- =Atuação secundária (positiva/negativa, aumenta/diminui; melhora/piora)
Actinolita [CaO.MgO.2FeO.4SiO ₂]	Formar escória (>); Estabilizar o arco (+)
Alumina [Al ₂ O ₃]	Formar escória (>); Estabilizar o arco (+); Desoxidar (-); Viscosidade (+); Destacabilidade (+)
Argilas* [Al ₂ O ₃ .2SiO ₂ .2H ₂ O]	Extrusão (>); Formar escória (+); Viscosidade (+); Estabilizar o arco (+)
Asbestos [Hidróxidos complexos de Al, Mg, Ca e Fe]	Formar escória (>); Extrusão (+); Resistência do revestimento (+); Viscosidade (+); Estabilizar o arco (+)
Cal [CaO]	Agente fluxante (>); Viscosidade (-)
Calcita [CaCO ₃]	Estabilizar o arco (>); Gerar gases (>); Formar escória (+); Viscosidade (-); Agente fluxante (+)
Carbonatos de Bário, Lítio e Zircônio	Estabilizar o arco (>)
Carboxil-Metil-Celulose	Adesão da alma ao revestimento (>)
Celulose [n.(C ₆ H ₁₀ O ₅)]	Gerar gases (>); Extrusão (+); Desoxidar (+); Resistência do revestimento (+)
Dolomita [MgO.CaO.2(CO ₂)]	Gerar gases (>); Agente fluxantes (+)
Feldspato [K ₂ O.Al ₂ O ₃ .6SiO ₂]	Formar escória (>); Agente fluxante (+); Estabilizar o arco (+); Viscosidade (+); Extrusão (+)
Ferro-ligas e Elementos de liga	Composição química (>); Desoxidar (+>); Estabilizar o arco (+)
Ferro-Manganês	Composição química (>); Desoxidar (+)
Ferro-Silício	Desoxidar (>); Composição química (+)
Fluorita [CaF ₂]	Formar escória (>); Agente fluxante (+); Viscosidade (-)
Hematita [Fe ₂ O ₃]	Oxidar (>); Formar escória (+); Viscosidade (-)
Ilmenita [FeO.TiO ₂]	Formar escória (>); Estabilizar o arco (+); Destacabilidade (+)
Magnetita [Fe ₃ O ₄]	Oxidar (>); Formar escória (+); Viscosidade (-)
Mica* [K ₂ O.3Al ₂ O ₃ .6SiO ₂ .2H ₂ O]	Extrusão (>); Estabilizar o arco (+)
Mischmetal [Ce, La e outras terras raras]	Desoxidar (>); Dessulfurizar (>)
Pó de Ferro	Taxa de deposição (>); Soldagem por arrasto (+)
Rutilo [TiO ₂]	Formar escória (>); Estabilizar o arco (+); Destacabilidade (+)
Silica [SiO ₂]	Formar escória (>); Viscosidade (+); Desoxidar (-)
Silicato de Potássio [K ₂ SiO ₃]	Estabilizar o arco (>); Aglomerante (+); Formar escória (>)
Silicato de Sódio [Na ₂ SiO ₃]	Aglomerante (>); Estabilizar o arco (+); Agente fluxante (+)
Talco [3MgO.4SiO ₂ .H ₂ O]	Extrusão (>); Agente fluxante (+); Formar escória (+); Viscosidade (+)
Titanato de Potássio [K ₂ TiO ₃]	Estabilizar o arco (>); Formar escória (+)
Zircônia [ZrO ₂]	Estabiliza o arco (>); Destacabilidade (+)

* Mais de uma composição possível, sendo essa típica.

sões complexas de sulfetos e fosfetos. A alta qualidade do metal de solda produzido com esse consumível, é devida primariamente aos efeitos do carbonato e da fluorita, já que os mesmos controlam as impureza (S e P) via a escória e, também, pela formação de muito pequenas inclusões não-metálicas. Por outro lado, a fluorita pode ser considerada um composto (metalúrgicamente) “básico”, parcialmente regulando o silício e o oxigênio do metal de solda dos aços e a formação de CO₂ (pro-

veniente da decomposição do CaCO₃) diminui a pressão parcial do hidrogênio no arco e, portanto, coopera para a redução desse elemento no metal de solda.

Após a extrusão, esses eletrodos são secos à relativamente alta temperatura, sendo esta operação extremamente efetiva. Entretanto, após rápido contato com a atmosfera, estes consumíveis somente poderão ser considerados como “baixo hidrogênio”, se forem devidamente ressecados an-

tes do uso, pois o revestimento é altamente higroscópico (por praticamente não conter material orgânico, a ressecagem geralmente ocorre em até 400 °C).

❑ Celulósico

Caracteriza-se pela elevada produção de gases, os quais são resultantes da combustão dos materiais orgânicos que contém (alto teor de celulose). Os principais gases gerados são CO₂, CO, H₂, H₂O (vapor) e seus sub-produtos. O hidrogênio não é proveniente somente da celulose mas, também, da umidade contida na mesma e no silicato. Entretanto, esses eletrodos não devem ser ressecados mas, se o forem, a temperatura não pode ultrapassar cerca de 100 °C (sob pena de destruir as propriedades operacionais do consumível), a qual não é efetiva para a retirada da umidade.

A atmosfera redutora que se forma, é a principal responsável pela proteção do metal fundido da atmosfera ambiente. Porém, o nível do hidrogênio depositado no metal de solda é muito alto, impedindo seu uso em estruturas muito constrangidas e/ou cujo material seja suscetível a trincas nas quais esse elemento é um dos principais agentes.

A penetração é alta, sendo produzida pouca escória, a qual é facilmente destacável. Operando em CCEP, geralmente a transferência é do tipo aerossol, sendo esse consumível ainda muito utilizado na soldagem de tubulações na posição vertical descendente, de forma que os passes são realizados rapidamente, mantendo a junta relativamente quente (~350 °C) e permitindo a evolução do hidrogênio para o ambiente.

❑ Oxidante

Obsoleto, pois as propriedades mecânicas do metal de solda são muito baixas, notavelmente a tenacidade. Uma possível utilização do mesmo é para a soldagem subaquática (“molhada”).

O revestimento é principalmente constituído por óxido de ferro (hematita, ou magnetita) com ou sem óxido de manganês, além de silicatos. Geralmente o mesmo é de grande espessura, formando protuberância na ponta (“taça”), devido à mais rápida fusão da alma. Dessa forma, é possível soldar por arraste, formando um cordão com acabamento liso, geralmente em passe único em filetes. A penetração é pequena, com escória espessa e facilmente destacável.

❑ Rutilico

Consumível de uso geral, cujo revestimento apresenta até 50% de rutilo, com alguns tipos

contendo até 15% de celulose. A transferência do metal é realizada por gotas maiores do que aquelas produzidas nos eletrodos ácidos. A penetração é média, com escória de rápida solidificação e facilmente destacável. O metal de solda pode apresentar um nível de hidrogênio alto (até 30 ml/100 g do metal de solda depositado) pois após a extrusão o consumível deve ser seco em relativamente baixa temperatura. Caso a ressecagem seja realizada em alta temperatura, a ação redutora do hidrogênio é perdida e o metal de solda apresenta porosidades grosseiras, provocadas por nitrogênio e monóxido de carbono.

❑ Básico/Rutilico

Esse é um consumível híbrido, geralmente utilizado para aços inoxidáveis. O mesmo apresenta uma razão rutilo/carbonato de cálcio entre 1,7 e 3, sempre com a presença do carbonato, enquanto o rutilico (“verdadeiro”) pode não conter esse composto.

Dependendo da proporção do carbonato (de cálcio, ou magnésio) o revestimento será mais básico, permitindo a soldagem na vertical-ascendente, ou mais ácido (com aumento do silício no metal de solda), tornando a escória mais fluída e um cordão com melhor acabamento, mas somente soldando (geralmente filetes) nas posições plana e horizontal. Com o aumento da basicidade há, conseqüentemente, redução na suscetibilidade à trinca de solidificação do metal de solda. Outrossim, devido a praticamente inexistir material orgânico no revestimento e à presença de CO₂ no arco, esses eletrodos podem ser do tipo baixo hidrogênio.

PÓ DE FERRO

A principal função desse composto é aumentar a taxa de deposição, ou seja, a massa do metal de solda depositado por unidade de tempo com o arco aberto, numa dada corrente de soldagem. Essa adição pode ser efetuada sobre os revestimentos dos tipos básico (entre 10 e 25%) e rutilico (até 60%).

Os pós de ferro existentes no mercado, dependendo do método de obtenção e finalidade, podem diferir quanto à granulometria; geometria e composição química. Aqueles utilizados nos eletrodos revestidos são produzidos geralmente, ou pela redução de óxido de ferro (“esponja”), ou pela dispersão (“atomização”) de metal fundido numa contracorrente de gás (inerte). Este pó de ferro pode ou não ser ligado, com composição típica de 0,09% C; 1,65% Mn; 0,20% Si; 0,020% (máx.) S;

0,015% (máx.) P.

Alguns dos efeitos provocados pelo aumento do teor do pó de ferro no revestimento, sobre as características operacionais do consumível e do metal de solda são os seguintes:

- Redução progressiva da tensão do arco, até um valor que impede a soldagem. Isso ocorre aproximadamente com 60% de pó de ferro.
- Aumento da fluidez da escória, devido à formação de óxido de ferro.
- Aumento do tempo para fundir uma unidade de comprimento do eletrodo, sendo em geral essa propriedade notável, com mais de 20% de pó de ferro.
- Sensível aumento da eficiência de deposição, ou seja, a relação entre as massas do metal de solda depositado e da alma fundida (em até acima de 160%). Esse efeito também pode ser obtido através do aumento da espessura do revestimento. Essa vantagem poderia não ser economicamente significativa, devido ao simultâneo aumento do tempo de fusão do eletrodo (item anterior). Entretanto,

isso é contornado pelo aumento da corrente, já que o pó de ferro é condutor elétrico e, assim, parte da mesma flui pelo revestimento.

- Melhora a estabilidade do arco e a penetração é reduzida, principalmente com alta intensidade de corrente. Esse fato pode minimizar a ocorrência de mordeduras.
- Possibilidade de soldar por arraste, desde que seja formada uma “taça” na ponta do eletrodo.
- Reduz a tenacidade do metal de solda.

Portanto, não deve ser realizada simplesmente adição de pó de ferro sobre um revestimento que tenha sido projetado para operar sem o mesmo. É necessária uma completa reformulação do consumível.

As Especificações relevantes devem ser consultadas para um melhor entendimento da classificação dos eletrodos revestidos, sendo que no livro já editado dessa série, “Sistemas de Especificação dos Consumíveis para Soldagem e Brasagem”, são comparadas as Normas AWS, ISO e DIN.

DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS CONSUMÍVEIS

Não se está sugerindo, neste estágio, condições de soldagem, ou aplicações específicas, mas sim pretende-se fornecer uma visão geral dos consumíveis disponíveis. Essa descrição não será efetuada para os consumíveis similares àqueles agora analisados, nos diferentes processos de soldagem dos capítulos subseqüentes.

Note-se, ainda, que a composição química de um eletrodo revestido é aquela do metal de solda depositado pelo mesmo, sem diluição (a exceção é o AWS ESt, no qual a alma deve ser analisada). Isso implica em se depositar sobre um material base, no mínimo 16 mm (cerca de 4 camadas) com o consumível e realizar a análise química na região mais próxima possível dessa superfície.

As características dos eletrodos serão a seguir apresentadas através de sua classe AWS. Detalhes das especificações envolvidas podem ser encontradas no livro acima citado, mas por conveniência a simbologia geral será aqui repetida.

AÇOS AO CARBONO

Os consumíveis para soldagem dos aços ao carbono podem ser representados por:

AWS EXX(X)YZ

Esta mesma simbologia, com o acréscimo de sufixo, é utilizada nos eletrodos revestidos para aços baixa liga, sendo que: (a) E designa eletrodo revestido; (b) Os dois, ou três dígitos seguintes (esse último caso é possível nos eletrodos para aços baixa liga), dependendo se são 4 ou 5 dígitos após o E, respectivamente, representam a mínima resistência à tração do metal de solda (em ksi=1000 psi) e demais propriedades mecânicas, de acordo com a especificação; (c) O penúltimo dígito determina as posições de soldagem; (d) O penúltimo e o último dígito (combinados) indicam os tipos de corrente; revestimento e demais características operacionais dos eletrodos revestidos, as quais são encontradas na **Tab. 4.2**; (e) A classificação como um todo estipula a análise química do metal de solda depositado (quando especificado).

Aos dígitos apresentados ainda poderá ser acrescentada a letra “M” (atualmente no E7018M), a qual indica que o consumível atende a maioria das especificações militares (dos EUA). Opcionalmente, os seguintes sufixos poderão existir: (a) Sufixo “1” designa aqueles eletrodos que atendem ao requerido para maior tenacidade (E7016-1 e E7018-1) e, no caso do E7024-1, também ductilidade; (b) Sufixo “HZ”, para aqueles eletrodos que

Tabela 4.2 - Características Operacionais dos Eletrodos Revestidos para Aços ao Carbono (baseada na AWS A5.1)

Classificação AWS	Tipo de Revestimento/Aglomerante (Silicato de)	Posições de Soldagem (a)	Tipo de Corrente (b)	Penetração Relativa	Taxa de Deposição Relativa
E6010	Alta celulose/sódio	T	CCEP	Alta	Baixa
E6011	Alta celulose/potássio	T	CA, CCEP	Alta	Baixa
E6012	Alto rutilo/sódio	T	CA, CCEN	Média	Baixa
E6013	Alto rutilo/potássio	T	CA, CC	Pequena	Baixa
E6019	Alto óxido de ferro e rutilo/potássio	T (V-asc)	CA, CC	Média	Média
E6020	Alto óxido de ferro/sódio	H-ang P	CA, CCEN CA, CC	Média	Média
E6022(c)	Alto óxido de ferro/potássio	P, H	CA, CCEN	Média	Alta
E6027	Alto óxido e pó de ferro/potássio	H-ang P	CA, CCEN CA, CC	Média	Alta
E7014	Pó de ferro e rutilo/potássio	T	CA, CC	Pequena	Média
E7015	Baixo hidrogênio/sódio	T	CCEP	Média	Baixa
E7016	Baixo hidrogênio/potássio	T	CA, CCEP	Média	Baixa
E7018	Baixo hidrogênio, pó de ferro/potássio	T	CA, CCEP	Média	Média
E7018M	Baixo hidrogênio, pó de ferro/potássio	T	CCEP	Média	Média
E7024	Pó de ferro e rutilo/potássio-sódio	P, H-ang	CA, CC	Pequena	Alta
E7027	Alto óxido e pó de ferro/sódio	H-ang P	CA, CCEN CA, CC	Média	Alta
E7028	Baixo hidrogênio, pó de ferro/potássio	P, H-ang	CA, CCEP	Média	Alta
E7048	Baixo hidrogênio, pó de ferro/potássio	T (V-des)	CA, CCEP	Média	Média

Notas Relativas à Tabela 4.2:

- (a) A letra "T" significa todas as posições, ou seja, Plana (P); Vertical (V); Sobrecabeça (SC) e Horizontal (H). "H-ang" significa posição horizontal em junta de ângulo. "V-des" significa posição vertical-descendente. "V-asc" significa posição vertical-descendente.
- (b) CA=Corrente Alternada.
CCEP=Corrente Contínua Eletrodo polaridade Positiva.
CCEN=Corrente Contínua Eletrodo polaridade Negativa.
CC=Corrente Contínua, ambas as polaridades.
- (c) Eletrodo para soldagem em passe único.

garantem um dado nível médio de hidrogênio difusível no metal de solda, em teste padronizado, onde "Z" pode ser 4, 8, ou 16 ml de H₂ por 100 g de metal de solda depositado.

Conhecer as formulações típicas dos revestimentos auxilia na compreensão dos vários fenômenos que ocorrem na soldagem e a **Tab. 4.3** ilustra aquelas para os aços ao carbono. Entretanto, em geral os revestimentos de eletrodos de uma mesma classe não são obrigados por Norma à serem iguais e o fabricante pode optar por aquela formulação que mais lhe convier.

Por outro lado, a **Tab. 4.4** é útil na falta de informações mais exatas do fabricante do consumível, pois apresenta os típicos intervalos de intensidade da corrente que podem ser praticados com os eletrodos para aços ao carbono, em função

da classe e bitola dos mesmos. Para a soldagem na posição vertical-ascendente, a corrente deve ser mantida próxima ao limite inferior desse intervalo.

São as seguintes algumas das mais importantes características dos eletrodos revestidos para os aços ao carbono, segundo a classificação AWS:

- E6010 e E6011: (a) Arco: rígido; transferência do metal tipo aerossol; grande penetração; proteção do metal fundido realizada principalmente por gases gerados pela decomposição do revestimento; (b) Escória: friável; facilmente destacável; pouco espessa; (c) Aparência do Cordão: perfil plano em juntas de ângulo; linhas de descanso grosseiras; (d) Características Gerais: elevado nível de hidrogênio no metal de solda, proveniente do alto teor de umidade no revestimento (até 7%)

e da decomposição do mesmo; soldagem com a corrente no limite superior provoca excessiva produção de salpicos; o E6011 pode operar em CA e utilizando CCEP produz menor penetração, quando comparado com o E6010; bitolas maiores do que 4,8 mm são melhor utilizadas nas posições plana ou em ângulo na horizontal; (e) Aplicações: soldas multipasse que serão inspecionadas radiograficamente, especialmente nas posições vertical ou sobrecabeça (em geral sobre tubulações); uso geral sobre aços ao carbono, mas também em galvanizados e alguns baixa liga.

- E6012: (a) Arco: suave e de fácil manejo; (b) Escória: densa, envolvendo completamente o cordão, o que pode ocasionar falta de penetração no passe de raiz; (c) Aparência do Cordão: perfil convexo em solda de ângulo; linhas de descanso finas na posição horizontal e grosseiras na vertical, tornando-se mais finas conforme aumenta o tamanho da solda; (d) Características Gerais: o metal de solda produzido por eletrodo apresenta menor ductilidade e maior limite de escoamento do que os do tipo celulósico; bitolas maiores do

que cerca de 4,0 mm são melhor utilizadas nas posições plana e horizontal; maiores bitolas, ainda, são empregadas na posição horizontal, em passe único com alta velocidade e corrente de soldagem; (e) Aplicações: conveniente para juntas mal posicionadas e/ou com distância de raiz relativamente grande, sobre aços ao carbono.

- E6013: Similar ao E6012, mas com algumas importantes diferenças: (a) Arco: em relação ao E6012, a transferência do metal é mais suave; a penetração é ligeiramente menor; opera em CA com mais baixas corrente e tensão de abertura do arco; (b) Escória: mais facilmente destacável do que aquela produzida pelo E6012; (c) Aparência do Cordão: liso; linhas de descanso finas; perfil plano em juntas de ângulo e côncavo em juntas a topo; (d) Características Gerais: esse consumível atende melhor aos requisitos de radiografia do que o E6012; nas posições vertical e sobrecabeça esse eletrodo pode operar com as mesmas intensidades de corrente que o E6012; (e) Aplicações: eletrodo projetado basicamente para a soldagem de chapas finas; em diâmetros maiores do que cerca de 3,2

Tabela 4.3 - Formulações Típicas dos Revestimentos dos Eletrodos para Soldagem de Aços ao Carbono

Composto	Proporção (%) nas Classes (AWS E)								
	6010 6013	6012 6013	6020 6022	6027	7014	7016	7018 7048	7024	7028
Argila	-	0-10	0-5	0-5	0-5	-	-	-	-
Carbonato de Cálcio	-	0-5	0-5	0-5	0-5	15-30	15-30	0-5	0-5
Celulose	25-40	2-12	1-5	0-5	2-6	-	-	1-5	-
Dolomita	-	-	-	-	-	-	-	-	5-10
Feldspato	-	0-20	5-20	0-5	0-5	0-5	0-5	-	0-5
Ferro-Manganês	-	5-10	5-20	5-15	5-10	2-6	2-6	5-10	2-6
Ferro-Silício	5-10	-	0-5	0-10	0-5	5-10	5-10	0-5	2-6
Fluorita	-	-	-	-	-	15-30	15-30	-	5-10
Magnetita	-	-	15-45	5-20	-	-	-	-	-
Mica	-	0-15	0-10	-	0-5	-	-	0-5	-
Óxido de Manganês	-	-	0-20	0-15	-	-	-	-	-
Pó de Ferro	-	-	-	40-55	25-40	-	25-40	40-55	40-55
Rutilo	10-20	30-55	0-5	0-5	20-35	15-30	0-5	20-35	10-20
Silica	-	-	5-20	-	-	-	-	-	-
Silicato de Potássio	(a)	5-15(a)	0-5	0-5	5-10	5-10	5-10	0-10	0-5
Silicato de Sódio	20-30	5-10	5-15	5-10	0-10	0-5	0-5	0-10	0-5
Titanato de Potássio	(a)	(a)	-	-	-	-	0-5	-	0-5

Nota: (a) O Silicato de Potássio é utilizado no lugar do Silicato de Sódio e o Titanato de Potássio no do Rutilo, para permitir soldagem com Corrente Alternada.

mm, pode realizar os mesmos trabalhos que o E6012.

- E6019: Revestimento similar ao do E6013 e E6020, mas apresentando diferenças fundamentais na operação: (a) Arco: maior penetração do que a dos eletrodos citados; (b) Escória: mais fluída; (c) Aparência do Cordão: liso; perfil plano, ou ligeiramente côncavo; (d) Características Gerais: metal de solda com maior ductilidade e tenacidade do que aquelas produzidas pelos eletrodos citados; atende aos requisitos de ensaio radiográfico; em bitolas maiores do que 4,8 mm deve ser empregado somente nas posições plana e horizontal em ângulo; na posição vertical ascendente, o “tecimento” do eletrodo deve ser limitado, para minimizar a ocorrência de mordedura (e) Aplicações: para soldagem multipasse de aço ao carbono em espessuras de até aproximadamente 25 mm.

- E6020: (a) Arco: transferência do metal em aerossol; penetração de média a alta; (b) Escória: muito densa, com aparência de favos na superfície inferior; facilmente destacável; devido a ser produzida em grande volume, a proteção do metal praticamente não depende da geração de gases; (c) Aparência do Cordão: perfil plano ou ligeiramente côncavo em solda de junta em ângulo; (d) Características Gerais: a fluidez do metal de solda é

tão alta, que a operação deve ser realizada nas posições plana e horizontal em ângulo; geralmente ocorrem covinhas na superfície do cordão nos primeiros passes (principalmente em CA) mas não existe nenhum defeito mecânico ou físico associado às mesmas; (e) Aplicações: vasos de pressão; bases de máquinas pesadas e outros componentes estruturais pesados.

- E6022: Similar ao E6020. Eletrodo projetado para soldas em alta velocidade e corrente, em passe único, sobre juntas a topo na posição plana; juntas sobrepostas na posição horizontal e juntas de ângulo de chapas finas. O perfil do cordão não é muito uniforme, mas tende a ser convexo.

- E6027 e E7027: Esses dois eletrodos são praticamente idênticos em quase todas as suas características. Entretanto, o E7027 foi projetado para produzir um metal de solda com propriedades mecânicas superiores àquele resultante do E6027. O revestimento desses dois eletrodos é similar ao E6020, mas a adição de pó de ferro torna sua massa cerca de 50% do total do consumível, sendo as seguintes suas principais características: (a) Arco: transferência do metal em aerossol; penetração média; diminuta produção de salpicos; (b) Escória: densa, tipo favos na face inferior, fa-

Tabela 4.4 - Intervalos Típicos de Corrente, em Função da Bitola e da Classe (AWS), dos Eletrodos Revestidos para Soldagem dos Aços ao Carbono

Bitola do Eletrodo (mm)	E6010 E6011	E6012	E6013	E6020	E6022	E6027 E7027	E7014	E7015 E7016 E7016-1	E7018 E7018-1	E7024-1 E7024 E7028	E7048
1,6	-	20 à 40	20 à 40	-	-	-	-	-	-	-	-
2,0	-	25 à 60	25 à 60	-	-	-	-	-	-	-	-
2,4	40 à 80	35 à 85	45 à 90	-	-	-	80 à 125	65 à 110	70 à 100	100 à 145	-
3,2	75 à 125	80 à 140	80 à 130	100 à 150	110 à 160	125 à 185	110 à 160	100 à 150	115 à 165	140 à 190	80 à 140
4	110 à 170	110 à 190	105 à 180	130 à 190	140 à 190	160 à 240	150 à 210	140 à 200	150 à 220	180 à 250	150 à 220
4,8	140 à 215	140 à 240	150 à 230	175 à 250	170 à 400	210 à 300	200 à 275	180 à 255	200 à 275	230 à 305	210 à 270
5,6	170 à 250	200 à 320	210 à 300	225 à 310	370 à 520	250 à 350	260 à 340	240 à 320	260 à 340	275 à 365	-
6,4	210 à 320	250 à 400	250 à 350	275 à 375	-	300 à 420	330 à 415	300 à 390	315 à 400	335 à 430	-
8	275 à 425	390 à 500	320 à 430	340 à 450	-	375 à 475	390 à 500	375 à 475	375 à 470	420 à 525	-

cilmente destacável e friável; (c) Aparência do Cordão: liso; finas linhas de descanso; perfil plano ou ligeiramente côncavo na posição horizontal sobre junta em ângulo; (d) Características Gerais: possível o uso de altas correntes; não atende tão satisfatoriamente quanto o E6020 aos requisitos de ensaio radiográfico; alta velocidade de soldagem; (e) Aplicações: aços ao carbono relativamente espessos.

- E7014: Revestimento similar àqueles dos eletrodos E6012 e E6013. Entretanto, é adicionado pó de ferro ao mesmo, aumentando dessa forma a eficiência de deposição do consumível. Além das características comuns aos consumíveis citados, esse eletrodo apresenta: (a) Arco: penetração equivalente ao E6012- portanto, é possível utilizar esse eletrodo sobre juntas mal posicionadas e com grande distância de raiz (b) Escória: com viscosidade alta o suficiente para soldagem em todas as posições; muitas vezes é auto-destacável; (c) Aparência do Cordão: liso, com finas linhas de descanso; perfil de solda de juntas em ângulo é plano ou ligeiramente convexo; (d) Características Gerais: devido ao pó de ferro, opera com maior intensidade de corrente; (e) Aplicações: emprego sobre aços ao carbono e baixa liga.

- E7015: Consumível do tipo baixo hidrogênio. (a) Escória: básica; densa; facilmente destacável; friável; (b) Aparência do Cordão: perfil plano de junta em ângulo e convexo em junta a topo; (c) Características Gerais: como o revestimento é higroscópico, o eletrodo somente será do tipo baixo hidrogênio, quando devidamente ressecado antes do uso; o arco deve ser mantido o mais curto possível, para reduzir o risco de porosidade; eletrodos com bitolas maiores do que 4,0 mm devem ser empregados somente para soldagem sobre junta a topo na posição plana, ou em ângulo nas posições plana e horizontal; (d) Aplicações: aços ao carbono e baixa liga, em relativamente pequenas soldas sobre espessas seções, as quais podem estar altamente estranguladas; aços com alto conteúdo de enxofre, quando, então, a escória poderá ser de difícil destacabilidade e irregular a superfície do cordão; aços esmaltados.

- E7016: Consumível do tipo baixo hidrogênio, com as mesmas características que o E7015, além de operar em CA. Como o revestimento é higroscópico, o eletrodo somente produzirá soldas de baixo hidrogênio, quando devidamente ressecado antes do uso. Além disso, o arco deve ser

mantido o mais curto possível, para reduzir o risco de porosidade. A classificação E7016-1 indica que o metal de solda deve possuir manganês no limite superior admissível. Isso resulta em menor temperatura de transição ao impacto, quando a soldagem é realizada fora de posição, ou com mais baixa energia.

- E7018 e E7048: Consumíveis do tipo baixo hidrogênio, com o E7048 projetado para produzir soldas na posição vertical-descendente de excepcional qualidade. Revestimento similar ao E7015, mas com adição de pó de ferro (até 40% da sua massa). (a) Arco: muito suave; pouca produção de salpicos; penetração média; (b) Escória: densa, facilmente destacável; (c) Aparência do Cordão: liso, com linhas de descanso finas; perfil ligeiramente convexo nas posições plana e horizontal de juntas em ângulo; (d) Características Gerais: a classificação E7018-1 designa objetivos similares àqueles do E7016-1; como o revestimento é higroscópico, o eletrodo somente será do tipo baixo hidrogênio, quando devidamente ressecado antes do uso; o arco deve ser mantido o mais curto possível, para reduzir o risco de porosidade; (e) Aplicações: aços ao carbono (inclusive alto), alta resistência, ou baixa liga.

- E7028: Consumível do tipo baixo hidrogênio. Como o revestimento é higroscópico, o eletrodo somente produzirá soldas com essa característica, quando devidamente ressecado antes do uso. Além disso, o arco deve ser mantido o mais curto possível, para reduzir o risco de porosidade. O revestimento é similar ao E7018, mas muito mais espesso, alcançando até 50% da massa do eletrodo, sendo até metade de pó de ferro. A escória é semelhante àquela do E7016. O consumível é conveniente para a soldagem nas posições plana de junta a topo e horizontal de juntas em ângulo, com elevada taxa de deposição.

- E7024: O revestimento é similar ao E6012 e E6013, mas muito mais espesso, alcançando até 50% da massa do eletrodo, sendo até metade de pó de ferro. (a) Arco: suave, pouca produção de salpicos e pequena penetração; (b) Aparência do Cordão: lisa, com finas linhas de descanso; perfil do cordão de convexo a plano; (c) Características Gerais: convenientes para realizar soldas em alta velocidade sobre junta em ângulo nas posições plana ou horizontal; a classificação E7024-1 indica metal de solda com maior ductilidade e menor temperatura de transição ao impacto do que o E7024.

AÇOS BAIXA LIGA

Os revestimentos desses consumíveis são similares aos daqueles para os aços ao carbono. Entretanto, nesse caso é mais complexa a inter-relação entre o material base; o consumível; a técnica e as demais condições de soldagem.

A simbologia da classificação é idêntica àquela apresentada para os consumíveis de aço ao carbono, além de sufixos, os quais determinam a composição química do metal de solda depositado, ou seja: (a) “A1” para aços carbono-molibdênio; (b) “B1, B2, B2L, B3, B3L, B4L ou B5” para aços ao cromo-molibdênio; (c) “C1, C1L, C2, C2L ou C3” para aços ao níquel; (d) “NM” para aços ao níquel-molibdênio; (e) “D1, D2 ou D3” para aços ao manganês-molibdênio; (f) “G” para outros baixa liga, com o metal de solda contendo pelo menos um dos seguintes elementos e na proporção mínima especificada, além de outros requerimentos convencionados entre fabricante e usuário: 1,00% Mn, 0,80% Si, 0,50% Ni, 0,30% Cr, 0,20% Mo, 0,10% V; (g) “M” para aqueles que atendam requisitos das especificações militares; (h) “W” para os consumíveis com adição controlada de cobre.

Da mesma forma, o penúltimo e o último dígitos (combinados) da classificação, indicam os tipos de corrente; revestimento e demais características operacionais dos eletrodos revestidos, as quais são encontradas na **Tab. 4.5**.

Por outro lado, apesar do caráter menos simples da soldagem desses aços, as **Tab. 4.6(a-d)** apresentam algumas sugestões para uma rápida seleção do consumível.

AÇOS INOXIDÁVEIS

A AWS acompanha a denominação do sistema proposto pelo “The American Iron and Steel Institute (AISI)”, conforme a seguinte divisão geral:

- Martensíticos
 - Série E4XX, ao cromo, representada pelo E410 e E410 NiMo
 - Série E5XX, ao cromo (4 a 10,5%), temperáveis ao ar.
- Ferríticos, ao cromo, com a classe E430.
- Austeníticos
 - Série E2XX, ao cromo-níquel-manganês;
 - Série E3XX, ao cromo-níquel.
- Endurecidos por precipitação, com o E630.

Em geral, a soldagem dos aços inoxidáveis não é realizada pela simples seleção de um eletrodo similar ao metal base. Por exemplo, os inoxidáveis ferríticos podem ser soldados com o E430, ou com austeníticos, ou ligas de níquel. A baixa tenacidade na ZAC dos ferríticos, aliada à dificuldade do eletrodo revestido em transferir alumínio e titânio para o metal de solda, limita o uso de material similar.

No caso dos inoxidáveis austeníticos, é digno de nota a necessidade do metal de solda conter ferrita delta em diversos casos, sendo que a formação desse microconstituente é função da composição química e condições em que a soldificação ocorre. A ferrita delta minimiza a incidência de trinca de solidificação no metal de solda e aumenta a sua resistência mecânica mas, por outro lado, afeta adversamente a tenacidade em serviço criogênico e é indesejável em altas temperaturas (500 à 900 °C), pois se transforma na fase frágil sigma, caso permaneça por tempo suficientemente longo neste intervalo. Elementos químicos tais como níquel; carbono; nitrogênio, etc., são formadores de austenita, enquanto cromo; nióbio; molibdênio, etc., promovem a ferrita delta. Conhecendo-se as composições químicas do metal base e daquele de adição, além da diluição, é possível se estimar através dos diagramas de Schaeffler ou de DeLong, por exemplo, o conteúdo de ferrita delta na microestrutura.

A avaliação do conteúdo de ferrita pode ser efetuada numa escala relativa por diversos meios, tais como metalográficos, ou pela intensidade do magnetismo apresentado por uma amostra. Entretanto, todos esses métodos apresentam dificuldades e há muito grande dispersão dos resultados medidos (podendo ser maior do que 16%). Portanto, foi desenvolvido pelo “Welding Research Council-WRC” dos EUA o conceito do “Número de Ferrita”, sendo estabelecido o procedimento do ensaio pela AWS. Dessa forma, sendo o “Número de Ferrita” relativo a padrões, medições realizadas em diferentes locais podem ser comparadas. Entretanto, cabe ressaltar que soldas realizadas com idênticos parâmetros, mas diferentes técnicas, podem produzir metais de solda com mesma composição química, mas distintos “Números de Ferrita”, principalmente como resultado da absorção de nitrogênio.

Considerando uma dada diluição, material base e especificação do número de ferrita, o estabelecimento do consumível mais adequado pelo método tradicional (“manual”) é demorado e impreciso. Para realizar esta operação de modo rápido e pre-

ciso, no **Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas** foi desenvolvido um programa de computador (“Soldinox”, o qual opera no ambiente Windows) que aponta o consumível mais conveniente, considerando todos os fatores envolvidos. Este programa é extremamente versátil e permite, inclusive, que se simule diferentes combinações de diluição e consumível, utilizando os diagramas “WRC-1988” para os aços inoxidáveis austeníticos e o “Espy” para os ferríticos, conforme recomendado no Apêndice da “ANSI/AWS A5.4-92”.

Como guia, na **Tab. 4.7** são exibidos valores usuais do Número de Ferrita para o metal de solda de diversos aços inoxidáveis.

A designação AWS dos eletrodos revestidos para aço inoxidável utiliza sufixos, os quais indicam certas propriedades do consumível, ou seja:

-15, indicando que o eletrodo é recomendado para uso com CCEP. Apesar do mesmo ser algumas vezes utilizado em CA, esse consumível

Tabela 4.5- Características Operacionais dos Eletrodos Revestidos para Soldagem dos Aços Baixos Liga (baseado na AWS A5.5)

Classificação AWS	Tipo de Revestimento/ Aglomerante (Silicato de)	Posição (b) de Soldagem	Tipo (c) de Corrente	Classificação AWS	Tipo de Revestimento / Aglomerante (Silicato de)	Posição (b) de Soldagem	Tipo (c) de Corrente
E7010-X	Alta celulose/sódio	T	CCEP	E9015-X	Baixo hidrogênio/sódio	T	CCEP
E7011-X	Alta celulose/potássio	T	CA, CCEP	E9016-X	Baixo hidrogênio/potássio	T	CA, CCEP
E7015-X	Baixo hidrogênio/sódio	T	CCEP	E9018-X	Baixo hidrogênio, pó de ferro/potássio	T	CA, CCEP
E7016-X	Baixo hidrogênio/potássio	T	CA, CCEP	E10010-X	Alta celulose/sódio	T	CCEP
E7018-X	Baixo hidrogênio, pó de ferro/potássio	T	CA, CCEP	E10011-X	Alta celulose/potássio	T	CA, CCEP
E7020-X	Alto óxido de ferro/sódio	H-ang	P CA, CCEN CA, CC	E10013-X	Alto rutilo/potássio	T	CA, CC
E7027-X	Pó de ferro e óxido de ferro/sódio	H-ang	P CA, CCEN CA, CC	E10015-X	Baixo hidrogênio/sódio	T	CCEP
E8010-X	Alta celulose/sódio	T	CCEP	E10016-X	Baixo hidrogênio/potássio	T	CA, CCEP
E8011-X	Alta celulose/potássio	T	CA, CCEP	E10018-X	Baixo hidrogênio, pó de ferro/potássio	T	CA, CCEP
E8013-X	Alto rutilo/potássio	T	CA, CC	E11015-X	Baixo hidrogênio/sódio	T	CCEP
E8015-X	Baixo hidrogênio/sódio	T	CCEP	E11016-X	Baixo hidrogênio/potássio	T	CA, CCEP
E8016-X	Baixo hidrogênio/potássio	T	CA, CCEP	E11018-X	Baixo hidrogênio, pó de ferro/potássio	T	CA, CCEP
E8018-X	Baixo hidrogênio, pó de ferro/potássio	T	CA, CCEP	E12015-X	Baixo hidrogênio/sódio	T	CCEP
E9010-X	Alta celulose/potássio	T	CCEP	E12016-X	Baixo hidrogênio/potássio	T	CA, CCEP
E9011-X	Alta celulose/potássio	T	CA, CCEP	E12018-X	Baixo hidrogênio, pó de ferro/potássio	T	CA, CCEP
E9013-X	Alto rutilo/potássio	T	CA, CC				

Notas Relativas à Tabela 4.5:

(a) O sufixo X representa os dígitos A1, B1, etc., os quais designam a composição química do metal de solda depositado.

(b) A letra T significa todas as posições, ou seja, Plana (P); Vertical (V); Sobrecabeça (SC) e Horizontal (H). "H-ang" significa posição Horizontal em junta de ângulo.

(c) CA= Corrente Alternada. CCEP= Corrente Contínua Eletrodo polaridade Positiva. CCEN= Corrente Contínua Eletrodo polaridade Negativa. CC= Corrente Contínua, ambas as polaridades.

Tabela 4.6 (a) - Eletrodos Revestidos Sugeridos para a Soldagem dos Aços ao Carbono e Baixa Liga

Especificação ASTM	Descrição	Grau(s)	Consumível (AWS)
CHAPAS,FOLHAS,FORJADOS,PERFISE FUNDIDOS			
A36-74	Estrutural (limite de escoamento mín. 36000 psi, ou 248MPa)	-	(a)
A113-70a	Equipamentos Ferroviários	Todos	(a)
A131-74	Estrutural - navios	A, B, C, CS, D, E, AH, DH, EH	(a) E7018
A148-73	Fundidos - Estrutural	80 - 40, 50 90 - 60 105 - 85, 120 - 95	E8018-C3 E9018-G E11018-M
A202-74a	Caldeira e Vaso de Pressão	A, B	E9018-G
A203-74a	Vaso de Pressão	A, B D, E	E8018-C1 E8018-C2
A204-74a	Caldeira e Vaso de Pressão	A, B C	A7010-A1 ou E7018-A1 E8018-B2(b)
A205-74a	Caldeira e Vaso de Pressão	A, B	E8018-C3
A225-74a	Caldeira e Vaso de Pressão	A, B	E8018-C3
A236-74	Forjados - Equipamentos Ferroviários	A, B C, D, E F, G H	E7018 ou E7028 E8018-C3 E9018-G E11018-M
A238-71	Forjados - Equipamentos Ferroviários	A B C, D, E	E8018-C3 E9018-G E11018-M
A242-74	Alta Resistência - Estrutural	Todos	E7018 ou E7028(c)
A266-69		1 2 3	(a) E7018 E8018-C3
A283-74	Chapas - Estrutural	Todos	(a)
A284-70a	Chapas - carbono/silício	Todos	(a)
A285-74a	Flange e chapas para fomalhas	Todos	(a)
A299-74a	Chapas - caldeira	Todos	E8018-C3
A302-74a	Caldeira e Vaso de Pressão	Todos	E8018-C3
A328-70		Todos F1	E7018 ou E7028 E8018-A1
A336-70a	Forjados (ligados)	F12	E8018-B2(b)
A352-74a	Fundidos-baixa temperatura	LCA, LCB, LCC LC1 LC2 LC3	E7018 E7018-A1 E8018-C1 E8018-C2
A356-74	Fundidos-turbinas (vapor)	5 6 8,10	E8018-B1 E8018-B2(b) E9018-B3
A361-71	Folhas Galvanizadas	-	(a,d)
A366-72	Folhas-aço ao carbono	-	(a)
A372-74	Forjados-vaso de pressão	Classe I Classe II Classe III Classe IV	E7018 ou E7028 E8018-C3 E9018-G E11018-M

Tabela 4.6 (b) - Eletrodos Revestidos Sugeridos para Soldagem dos Aços ao Carbono e Baixa Liga

Especificação ASTM	Descrição	Grau(s)		Consumível (AWS)	
CHAPAS, FOLHAS, FORJADOS, PERFISE FUNDIDOS					
A387-74a	Chapas-Caldeira (Cr-Mo)	A, B, C	D	E8018-B2 (b)	E9018-B3
A389-74a	Fundidos-alta temperatura	C23	C24	E8018-B2(b) E9018-B3	
A410-72	Chapas-vaso de pressão	-	-	E8018-C2	
A414-72	Flange e folhas para fôrmalha	A, B, C, D F	E, G	(a) E7018 ou E7028	E8018-C3
A424-73	Folhas-revestimento com porcelana	-	-	E7018	
A441-74	Alta Resistência-estrutural	Todos	-	E7018 ou E7028 (c)	
A442-74	Chapas-aço de granulação fina	Todos	-	E7018 ou E7028	
A444-71 e A446-72	Folhas Galvanizadas	A, B, C	D,F	(a,d) E7010-A1	
A445-74c	Chapas-vaso de pressão (C/Mn)	Todos	-	E8018-C3(e)	
A486-74	Fundidos-Pontes (Rodovias)	70	90	E7018 ou E7028	E9018-G
A487-71a	Fundidos-serviço sob pressão	8N, 9N AN, AQ C, CN, BQ, CQ	A, B, N,	E8018-B3 (a) E8018-C3	
A514-74a	Chapas-temperadas e revenidas	Todos	-	E11010-M(f)	
A515-74b	Chapas-caldeira (alta temperatura)	Todos	-	E7018 ou E7028	
A516-74a	Chapas-Vaso de Pressão (baixa temperatura)	55, 60 70	65,	E7018 ou E7028 E7018 ou E8018-C3	
A517-74a	Chapas-temperadas e revenidas	Todos	-	E11018-M(f)	
A526-71 e A528-71	Folhas Galvanizadas	-	-	(a,d)	
A529-72	Estrutural (limite de escoamento mín. 42000 psi, ou 290 MPa)	-	-	(a)	
A533-74	Chapas-temperadas e revenidas	Classe I Classes II e III	-	E8018-C3 E11018-M	
A537-74	Vasos de Pressão e Estruturas	Classe I Classe II	-	E7018 ou E7028 E8018-C3	
A541-73	Forjados-Vaso de Pressão	Classe I Classes II, III e IV Classe V Classe VI	-	E7018 ou E7028 E8018-B2 (b) E9018-B3	E8018-C3
A543-74	Chapas-temperadas e revenidas	Classes I, II e III	-	E11018-M(f)	
A570-72	Folhas e Lâminas-estrutural	Todos	-	(a)	
A572-74b	Chapas-estrutural	42, 45 50, 55 60, 65	-	(a) E7018 ou E7028	E8018-C3
E573-74	Chapas-estrutural	65, 70	-	E7018 ou E7028	
E588-74a	Alta Resistência-estrutural	Todos	-	E7018 ou E7028(c)	
E606-71	Folhas-alta resistência	Todos	-	(a)	
E607-70	Folhas-alta resistência, baixa liga	45, 50, 55 60, 65 70	(a)	E8018-C3 E9018-G	

Tabela 4.6 (c) - Eletrodos Revestidos Sugeridos para a Soldagem dos Aços ao Carbono e Baixa Liga

Especificação ASTM	Descrição	Grau(s)		Consumível (AWS)	
CHAPAS, FOLHAS, FORJADOS, PERFIS E FUNDIDOS					
E611-72	Folhas-laminadas a frio	A, B, C, D		(a)	
A615-74a	Barras de reforço	40	60	(a)	E9018-G
		75			E11018-M
A616-72	Barras de reforço	5060		E8018-C3 E9018-G	
A617-74	Barras de reforço	40	60	(a)	E9018-G
A706-74	Barras de reforço	60		E9018-G	
TUBOS, CANOS E CONEXÕES					
A53-73, A106-74, A120-73, A135-73d, A139-74, A179-73, A192-73, A211-73, A214-71, A226-73, A252-74, A523-73, A587-73, A589-73	Tubos-aço baixo carbono	Todos		(a, g)	
A105-73	Conexões-Alta temperatura	Classes I e II		E7018	
A106-74	Tubos-Alta temperatura	A, B, C		E7018	
A155-74	Tubos-alta temperatura	C45, C50, C55 KCF-55, 60 CM75 CMSH70 Cr	KC, CM65, 70 CMS75, 1/2, 1 e 1¼ 2¼Cr	(a) E7018 ou E7028 E7010-A1 ou E7018-A1 E8018-B2 (b) E8018-C3 E8018-B2 (b) E9018-B3	
E161-72	Tubos-destilaria	Baixo Carbono	T1	(a)	E7010-A1 ou E7018-A1
E178-73	Tubos-condensadores de caldeiras	Todos		(a)	
A181-68	Conexões-serviço geral	Classes I e II		E7018 ou E7010-A1	
A182-74	Conexões-alta temperatura	F1	F2, F11, F12	E7010-A1 ou E7018-A1 E8018-B2 (b)	
A199-73	Trocador de calor e tubos de condensadores	T11		E8018-B2 (b)	
A200-72	Tubos-destilaria (refino)	T11		E8018-B2 (b)	
A209-73	Tubos-caldeiras (C-Mo)	T1, T1a e T1b		E7010-A1 ou E7018-A1	
A210-73	Tubos-caldeiras (aço ao carbono)	A1	C	E7010-A1 (a)	E7010-A1
A213-74b	Tubos-caldeiras	T2, T11, T12, T17		E8018-B2 (b)	
A214-74b	Tubos-condensadores	Todos		(a)	
A216-74b	Conexões fundidos-alta temperatura	WCA, WCB, WCC		E7018 ou E7018-A1	
A217-74c	Conexões fundidos-alta temperatura	WC1	WC4	E7010-A1	E8018-C3
		WC6		E8018-B2 (b)	
A234-74	Conexões	WPA, WPB, WPC	WP1	(a)	E7010-A1 (g)
		WP11		E8018-B2 (b)	
A250-73	Tubos-caldeiras (C-Mo)	T1, T1a, T1b		E7010-A1 (g)	

Tabela 4.6 (d) - Eletrodos Revestidos Sugeridos para a Soldagem dos Aços ao Carbono e Baixa Liga

Especificação ASTM	Descrição	Grau(s)		Consumível (AWS)	
TUBOS, CANOS E CONEXÕES					
A333-74, A334-74	Tubos-baixa temperatura	1,6	3	E7018 ou E8018-C3	E8018-C2 E8018-C1
A335-74a	Tubos-alta temperatura	P1	P2, P11, P12	E7010-A1 (g)	E8018-B2 (b)
A350-74	Conexões-baixa temperatura	LF1, LF2	LF3	E8018-C1	E8018-C2 E8018-C3
E369-73a	Tubos-alta temperatura	Veja A335 e A182			
A381-73	Tubos-alta temperatura	Y35, Y42	Y46, Y52	(a, g)	(h)
		Y56, Y60, Y65			E8018-C3
A405-70	Tubos-alta temperatura	P24		E8018-B2 (b)	
A420-73	Tubos-baixa temperatura	Veja A203, A333, A334, A350			
A423-73	Tubos-baixa liga	1, 2		E8018-C3 ou E7018	
A426-74	Tubos fundidos-alta temperatura	Veja A335			
A498-73	Tubos-condensadores	Veja A199, A179, A213, A214 e A334			
A500-74a	Tubulação-estrutural	A, B, C		E7018 (a)	
A501-74	Tubulação-estrutural	E7018 (a)			
A524-72a	Tubulação-processamento	1, 2		E7010-A1 ou E7018	
A556-73, A557-73	Tubulação-alimentação d'água para aquecimento	A2, B2	C2	E7018 (a)	E7018
A618-74	Tubulação-estrutural	Classes I, II e III		E7018	

Notas Relativas às Tabelas 4.6 (a-d):

- (a) Desde que a especificação não seja contrariada, os eletrodos revestidos das classes E60XX ou E70XX devem ser empregados sobre aços com resistência à tração de 60.000 psi (414 MPa), ou menor. Para aços com resistência à tração entre 60.000psi (414 MPa) e 70.000 psi (483 MPa), os consumíveis da classe E70XX devem ser utilizados.
- (b) O eletrodo revestido E8018-B2 não deve ser utilizado, quando a estrutura estará em serviço sob baixa temperatura.
- (c) Os eletrodos revestidos E8018-C1 ou E8018-B2 devem ser utilizados para melhor combinação com pintura, ou em aços com resistência à corrosão atmosférica.
- (d) O eletrodo revestido E6010 é geralmente o mais indicado para folha galvanizada.
- (e) Eletrodos revestidos E7018 ou E7028 para filetes e E8018-C3 para soldas com finalidades gerais. Se o componente soldado será endurecido por precipitação, ou metal de solda com alta resistência é necessário, o E8018-B2 deve ser utilizado.
- (f) Para cordões em filete, o E7018 ou E8018-C3 são freqüentemente utilizados.
- (g) O E7010-G deve ser utilizado para soldagem no campo de tubos.
- (h) Devem ser utilizados eletrodos revestidos especialmente projetados para a soldagem no campo, de tubos fabricados com aços 5LX, graus X42 a X65.

não pode ser qualificado com esse tipo de corrente. Eletrodos com diâmetros menores do que 4,0 mm pode ser empregados para soldagem em todas as posições.

-16, o revestimento geralmente contém rutilo e elementos de baixo potencial de ionização, tal como potássio, podendo soldar em CA e CCEP. Em soldas de filete na posição horizontal, o perfil do cordão tipicamente varia de plano a levemente convexo. Eletrodos com diâmetros menores do que 4,0 mm são empregados para soldagem em todas as posições.

-17, eletrodo de revestimento similar ao com sufixo -16, podendo soldar em CA e CCEP, mas com o rutilo substituído por sílica. Eletrodos com diâmetros superiores à 4,8 mm não são recomendados para soldagem nas posições vertical ou sobrecabeça, enquanto os de menores diâmetros podem ser utilizados em todas as posições. Comparando-se com o com sufixo -16, essa designação apresenta as seguintes principais diferenças: (a) A transferência do metal de solda tende a se efetuar em aerossol e as linhas de descanso do cordão de solda são mais finas; (b) A taxa de solidificação da escória é menor, com melhor desempenho quando se solda com a técnica de arrasto (apoio sobre a junta) do eletrodo; (c) Em soldas de filete na posição horizontal, o perfil do cordão tipicamente varia de plano a côncavo. Na posição de soldagem vertical-ascendente, é necessário se realizar um leve “tecimento” (balanço) do eletrodo, devido à menor taxa de solidificação da escória. Como consequência, a largura mínima do cordão de solda em filete é maior do que aquela obtida com eletrodos cujo sufixo é -16.

-25, com o revestimento similar, em composição e características operacionais, àquele com sufixo -15, podendo soldar em CCEP. Nesse caso, entretanto, a alma do eletrodo pode possuir com-

posição química muito diferente daquela do metal de solda depositado, com os elementos de liga introduzidos através do revestimento (o consumível é dito “sintético”), o qual possui diâmetro maior do que aquele com sufixo -15 e soldando somente nas posições plana e horizontal. Sendo a alma de aço baixo carbono, a intensidade da corrente para a soldagem deve ser maior do que se a mesma fosse de aço inoxidável.

-26, com o revestimento similar, em composição e características operacionais, àquele com sufixo -16, podendo soldar em CA e CCEP. Nesse caso, entretanto, a alma do eletrodo pode possuir composição química muito diferente daquela do metal de solda depositado, com os elementos de liga introduzidos através do revestimento (o consumível é dito “sintético”), o qual possui diâmetro maior do que aquele com sufixo -16 e soldando somente nas posições plana e horizontal. Sendo a alma de aço baixo carbono, a intensidade da corrente para a soldagem deve ser maior do que se a mesma fosse de aço inoxidável.

De forma geral, quando comparados com os aços ao carbono e baixa liga, os inoxidáveis possuem diversas características diferentes, notavelmente maior expansão e menor condutividade térmica, o que aumenta a tendência das soldas provocarem distorção. Há de se considerar, também, que os mesmos possuem mais alta resistência elétrica, o que resulta numa maior taxa de deposição para uma mesma intensidade de corrente. Por outro lado, a soldagem desses aços pode apresentar típicos problemas, tais como: (a) Trinca de solidificação; (b) Formação de fase sigma (frágil); (c) Crescimento excessivo dos grãos na ZAC; (d) Precipitação de carbonetos.

Para agilizar a seleção nos casos mais simples, na **Tab. 4.8** são apresentadas sugestões de eletrodos revestidos convenientes sobre diferentes me-

Tabela 4.7- Limites para o Número de Ferrita no Metal de Solda dos Aços Inoxidáveis Austeníticos.

Classe AWS	Número de Ferrita	Classe AWS	Número de Ferrita
E310, E310H, E310Cb, E310Mo, E320, E320LR, E330, E383, E385	Zero	E16-8-2	5máx
E316, E316L	2máx.	E308, E308L, E308 Mo, E308 MoL, E309, E309 L, E309 Mo, E318, E347	4 a 10
E317, E317L	2 a 5	E312, E349, E2209, E2553	20 min.

tais base.

A seguir será realizada uma breve descrição dos eletrodos revestidos disponíveis para os aços inoxidáveis, segundo a classificação AWS:

- E209: Composição química nominal 21%Cr; 10%Ni; 5,5%Mn; 2%Mo e 0,20%N. Depósito austenítico de alta resistência mecânica e boa tenacidade num amplo intervalo de temperatura devido ao nitrogênio. Reduzida tendência à precipitação intergranular de carbonetos, com boa resistência à corrosão intergranular. Alta resistência à corrosão localizada (“pitting”) e galvânica nas fendas em meio aquoso clorídrico. Utilizado na soldagem de metais dissimilares - como aço ao carbono em inoxidável - e revestimento sobre aço ao carbono.

- E219: Composição química nominal 20%Cr; 6%Ni; 9%Mn e 0,20%N. Depósito austenítico, geralmente empregado para a soldagem do AISI Tipo 219, com propriedades mecânicas; resistência à corrosão e aplicações similares ao E209.

- E240: Composição química nominal 18%Cr; 5%Ni; 12%Mn e 0,02%N. Depósito austenítico, geralmente empregado para soldagem dos AISI Tipos 240 e 241, os quais apresentam superior resistência ao desgaste (partícula-metal e metal-metal) e à corrosão, quando comparado com o AISI Tipo 304. A resistência à corrosão intergranular e demais aplicações são similares ao E209, além de também ser utilizado para revestimento protetor ao desgaste.

- E307: Composição química nominal

Tabela 4.8-Eletrodos Revestidos para Soldagem dos Aços ao Cromo-Níquel Resistentes à Corrosão (vide texto)

Metal Base (AISI)	Condições de Serviço da Junta Soldada		Consumível Sugerido E)	(AWS)	
Aços Austeníticos					
301, 302, 304, 305, 308	302B	(a) ou (b)	(a)	308	309
304L	303, 303Se	(a) ou (d)	(a) ou (b)	347, 308L	312
309, 309S	310, 310S	(a)	(a)	309	310
316	316L	(a) ou (b)	(a) ou (d)	316	318, 316L
317	317L	(a) ou (d)	(a) ou (b)	317	317Nb
318, 316Nb	321	(a) ou (e)	(a) ou (e)	318	347
347	348	(a) ou (e)	(a) ou (e)	347	347
Aços Martensíticos					
403,410,416,416Se	403,410	(b) ou (c)	(a)	410	308, 309, 310
416,416Se	420	(a)	(b) ou (c)	308, 309, 312	420
431	431	(b) ou (c)	(a)	410	308, 309, 310
Aços Ferríticos					
405	405,430	(b)	(a)	405Nb, 430	308, 309, 310
430F,430FSe	430,430F,430FSe	(a)	(b)	308, 309, 312	430
446	446	(b)	(a)	446	308, 309, 310

Notas Relativas à Tabela 4.8:

(a) Como Soldada; (b) Recozida; (c) Endurecida e tensões aliviadas; (d) Tensões aliviadas; (e) Estabilizada e tensões aliviadas.

19%Cr; 9,8%Ni e 4%Mn. Utilizado em aplicações para moderada resistência mecânica, apresentando alta resistência à trinca na solda de metais dissimilares, tal como aço manganês austenítico em aço ao carbono forjado ou fundido.

- E308: Composição química nominal 19%Cr e 10%Ni. Utilizado geralmente na soldagem de metais de mesma composição química, tais como AISI Tipos 301, 302, 304 e 305.

- E308H: Composição química similar ao E308, com carbono no limite superior do intervalo admissível. Empregado geralmente na soldagem do AISI Tipo 304H.

- E308L: Composição química similar ao E308, exceto o limite no conteúdo de carbono (0,04% máx.), o que reduz a possibilidade de precipitação de carbonetos nos contornos dos grãos e, como consequência, a corrosão intergranular, mesmo sem o emprego de estabilizantes, tais como nióbio ou titânio. Entretanto, o metal base não deve conter mais do que 0,03% C e a resistência em altas temperaturas é menor do que o metal de solda estabilizado com nióbio, ou aquele tipo 304H.

- E308Mo: Composição química similar ao E308, com maior conteúdo de molibdênio (2-3%). Recomendado para a soldagem do aço inoxidável fundido ASTM CF8M. Também pode ser empregado sobre o AISI 316, quando for necessário maior Número de Ferrita do que aquele obtido com o E316.

- E308MoL: Composição química similar ao E308 Mo, com baixo carbono. Recomendado para a soldagem do aço inoxidável fundido ASTM CF3M. Também pode ser empregado sobre o AISI 316L, quando for necessário maior Número de Ferrita do que aquele obtido com o eletrodo E316L.

- E309: Composição química nominal 23,5%Cr; 13%Ni. Geralmente utilizado para a soldagem de metais similares, ou união de aço ao carbono e AISI Tipo 304 e revestimento protetor à corrosão sobre aço ao carbono. Também é empregado na soldagem do AISI Tipo 304 entre si, quando a junta requer superior resistência à corrosão.

- E309L: Composição química similar ao E309, com baixo carbono. Entretanto, a resistên-

cia em altas temperaturas é menor do que aquele estabilizado ao nióbio, ou com mais alto carbono, tal como o obtido com o E309.

- E309 Cb: Nos E.U.A, o elemento nióbio (Nb) ainda é denominado por muitos “colúmbio” (Cb), apesar dessa prática estar diminuindo. A composição química é similar ao E309, exceto pela adição de nióbio e redução do carbono. Isso aumenta a resistência à corrosão intergranular -o nióbio diminui a precipitação de C_xCr_y - e a resistência mecânica em elevada temperatura de serviço. Geralmente utilizado na soldagem de aços revestidos com AISI Tipo 347, ou para a solda des- se com outro aço ao carbono.

- E309 Mo: Composição química similar ao E309, com maior adição de molibdênio e redução do carbono. Utilizado basicamente na soldagem de aços revestidos do tipo AISI 316, ou metais dissimilares como austeníticos inoxidáveis contendo molibdênio em aços ao carbono.

- E310: Composição química nominal 26,5%Cr; 21%Ni. Geralmente utilizado na soldagem de aços de composição similar.

- E310H: Composição química similar ao E310, com mais alto conteúdo de carbono (0,35-0,45%). Geralmente empregado na soldagem de união, ou reparo de fundidos com composição química similar - como os do Tipo HK (“Alloy Castings Institute”) - resistentes ao calor e corrosão. Não recomendado para serviços cujo ambiente contenha alto enxôfre, ou que ocorra choque térmico. Relativamente longa exposição à temperatura entre 760 e 870 °C pode induzir a formação da fase sigma e carbonetos secundários, resultando em marcante redução da resistência à corrosão e/ou ductilidade.

- E310Cb: Composição química similar ao E310, exceto pela adição de nióbio e redução do carbono. Utilizado geralmente na soldagem de aços revestidos do tipo AISI 347, ou metais dissimilares, tais como aços ao nióbio em aços ao carbono.

- E312: Composição química nominal 30%Cr; 9%Ni. Originalmente projetados para a soldagem de ligas fundidas de composição química similar. Também empregado na soldagem de metais dissimilares, dos quais um possui alto conteúdo de níquel. Apresenta alta resistência a trinca de solidificação pois, mesmo com grande dilui-

ção, mantém alto o conteúdo de ferrita na matriz austenítica. Entretanto, se empregado em temperaturas que excedem 420 °C, há formação de fases secundárias frágeis.

- E316: Composição química nominal 18,5%Cr; 12,5%Ni e 2,5%Mo. Geralmente utilizado para a soldagem do AISI Tipo 316 e similares, além de nas uniões em serviço de alta temperatura, com elevada resistência à fluência devido ao molibdênio. A corrosão poderá ocorrer em alta taxa se: (a) A ferrita formar uma rede contínua, ou semi-contínua; (b) A relação cromo/molibdênio for menor do que 8,2; (c) A junta permanecer imersa num meio corrosivo.

- E316 OH: Composição química similar ao E316, com o conteúdo de carbono no limite superior do intervalo admissível (0,04-0,08%), apresentando maior resistência à fluência e resistência à tração em temperaturas elevadas. Geralmente empregado para soldar metais base de composição química similar.

- E316L: Composição química similar ao E316, com baixo carbono (0,04% máx.), aumentando a resistência à corrosão intergranular, sem o emprego de estabilizantes, tais como nióbio e titânio. Entretanto, a resistência em elevadas temperaturas é menor do que a do E316H. Utilizado geralmente na soldagem de aços austeníticos ao molibdênio de baixo carbono.

- E317: Composição química nominal 19,5%Cr; 13%Ni e 3,5%Mo. Empregado na soldagem de metais com composição química similar e cuja junta estará exposta a ambiente altamente corrosivo.

- E317L: Composição química similar ao E317, com baixo carbono (0,04% máx.), aumentando a resistência à corrosão intergranular, sem o emprego de estabilizantes, tais como nióbio e titânio. Entretanto, a resistência mecânica em temperaturas elevadas é menor do que a do E317.

- E318: Composição química similar ao E316, exceto pela adição de nióbio, o que fornece maior resistência à corrosão intergranular. Utilizado basicamente para a soldagem de metais com composição química similar.

- E320: Composição química nominal 20%Cr; 34%Ni; 2,5%Mo e 3,5%Cu, além da adi-

ção de nióbio para aumentar a resistência à corrosão intergranular. Empregado principalmente na soldagem de metais com composição química similar, onde é necessária alta resistência à corrosão, incluindo ácido sulfúrico e seus sais. Esse eletrodo pode soldar aços laminados ou fundidos de composição química similar, sem necessidade de tratamento térmico após a soldagem. É disponível uma versão sem nióbio para fundidos que não contenham esse elemento, sendo necessário tratamento térmico de solubilização após a solda.

- E320 LR: Composição química similar ao E320, mas com menor limite superior dos elementos C, Si, P e S, além de Mn e Nb em menores intervalos (“LR” significa “Low Residuals”, ou baixos residuais). A tendência à trinca de solidificação é, assim, reduzida, mantendo a mesma resistência à corrosão, quando comparado com metais de solda completamente austeníticos, apesar da resistência mecânica ser menor do que a do E320.

- E330: Composição química nominal 15,5%Cr; 35%Ni. Empregado em situações que requerem resistência ao calor e à formação de carepas acima de 980 °C. Entretanto, ambientes com alta concentração de enxofre podem afetar adversamente essas características. Geralmente empregado em reparos de defeitos sobre ligas fundidas de composição química similar.

- E330H: Composição química similar ao E330, mas com alto conteúdo de carbono (0,35-0,45%). Utilizado basicamente na união e reparos de ligas resistentes ao calor e corrosão do tipo HT (“Alloy Castings Institute”), podendo ser empregado em até 1150 °C com atmosfera oxidante, ou 1090 °C se a mesma for redutora. Entretanto, ambientes com alta concentração de enxofre podem afetar adversamente essas características.

- E347: Composição química nominal 19,5%Cr; 10%Ni, com adição de nióbio, ou nióbio e tântalo, para estabilizar a precipitação de carbonetos, aumentando assim a resistência à corrosão intergranular. Geralmente empregado na soldagem de metais com composição química similar, estabilizados com nióbio ou titânio. Não são disponíveis eletrodos revestidos que depositem titânio, devido à elevada perda desse elemento, quando o mesmo é transferido através do arco elétrico com eletrodo revestido. Um muito baixo Número de Ferrita, ou depósito completamente

austenítico aumenta sensivelmente a tendência à trinca de solidificação do mesmo. Entretanto, sendo o Número de Ferrita excessivamente alto, o desempenho da junta em alta temperatura é afetado adversamente.

- E349: Composição química nominal 19,5%Cr; 9%Ni; 1%Nb; 0,5%Mo e 1,4%W. Geralmente empregado na soldagem dos aços AISI Tipos 651 e 652, de composição química similar. O metal de solda apresenta alta resistência à fratura em temperaturas elevadas e é pouco suscetível à trinca de soldificação, como consequência do elevado conteúdo de ferrita delta.

- E383: Composição química nominal 28%Cr; 31,5%Ni; 3,7%Mo e 1%Cu. Metal de solda austenítico, geralmente empregado para soldar aços de composição similar, ou com outros inoxidáveis. O metal de solda apresenta alta resistência à ambientes contendo ácidos sulfúrico e fosfórico, com baixos conteúdos de C, Si, P e S, para reduzir a suscetibilidade à trinca de solidificação.

- E385: Composição química nominal 20,5%Cr; 25%Ni; 5%Mo e 1,5%Cu. Metal de solda austenítico, geralmente empregado para soldar o AISI Tipo 904L, em vasos contendo ácido sulfúrico e cloretos; ou esse metal base em outros aços inoxidáveis; ou, ainda, o Tipo 317L para melhor resistência à corrosão. Os elementos C, Si, P e S são mantidos em baixos níveis, reduzindo a suscetibilidade à trinca de solidificação.

- E410: Composição química nominal 12%Cr. O depósito é temperável ao ar, sendo necessário pré- e pós-aquecimento para que a solda alcance adequada ductilidade. Geralmente utilizado para soldar metais de composição química similar e revestimentos resistentes à corrosão; erosão ou abrasão.

- E410 NiMo: Composição química modificada do E410 para eliminar a ferrita da microestrutura, pois a mesma afeta adversamente as propriedades mecânicas. O tratamento térmico após a soldagem não deve exceder 620 °C, pois mais altas temperaturas podem causar re-endurecimento devido à martensita não revenida na microestrutura, quando do resfriamento. Empregado principalmente na soldagem do fundido ASTM CA6NM, ou similares, assim como sobre chapas finas dos AISI 405 (ferrítico); 410 e 410S (ambos martensíticos).

- E430: Composição química nominal equilibrada, para que o metal de solda contenha de 15 a 18%Cr. Possui adequada resistência à corrosão para aplicações usuais, com suficiente ductilidade após tratamento térmico.

- E502: Composição química nominal 5%Cr; 0,5%Mo. Portanto, o metal de solda não é de um aço inoxidável. Utilizado para a soldagem de metais com composição química similar, usualmente tubos. É necessário pré- e pós-aquecimento, pois o mesmo é temperável ao ar.

- E505: Composição química nominal de 9%Cr e 1%Mo. Portanto, o metal de solda não é o de um aço inoxidável. Empregado para a soldagem de metais com composição química similar, usualmente na forma de tubos. É temperável ao ar, necessitando pré- e pós-aquecimento.

- E630: Composição química nominal 16,4%Cr; 4,7%Ni e 3,6%Cu. Destinado basicamente para a soldagem do ASTM A564 Tipo 630 (17%Cr; 4%Ni) e aços endurecidos por precipitação. O metal de solda não possui ferrita alinhada na microestrutura martensítica, o que causaria efeito adverso sobre as propriedades mecânicas. A junta pode ser utilizada no estado soldado; após tratamento térmico de endurecimento por precipitação, ou solubilizada e endurecida por precipitação.

- E16-8-2: Composição química nominal 15,5%Cr; 8,5%Ni; 1,5%Mo. Geralmente empregado na soldagem de tubos de aços inoxidáveis que trabalham sob alta pressão e temperatura, tais como os Tipos 16-8-2, 316 e 347. O Número de Ferrita deve ser menor do que 5, com o depósito possuindo boa ductilidade a quente e pouca tendência a trincas de solidificação, mesmo sob alto constrangimento. A junta pode ser utilizada no estado soldado, ou solubilizada. Dependendo do meio em que estiver imerso, esse metal de solda pode apresentar menor resistência à corrosão do que o metal base AISI Tipo 316.

- E7Cr: Composição química nominal 7%Cr; 0,5%Mo, não sendo, portanto, um aço inoxidável. Utilizado, em princípio, para a soldagem de metais com composição química similar, geralmente na forma de tubos ou fundidos. O metal de solda é temperável ao ar, com a soldagem requerendo pré- e pós-aquecimento.

- E2209: Composição química nominal 22,5%Cr; 9,5%Ni; 3%Mo e 0,15%N. Empregado

basicamente para a soldagem de aços duplex com 22%Cr. O metal de solda é duplex (austenítico-ferrítico), apresentando boa resistência mecânica; alta resistência à corrosão localizada (“pitting”) e à trinca por corrosão sob tensão.

- E2553: Composição química nominal 25,5%Cr; 7,5%Ni; 3,5%Mo; 2%Cu e 0,17%N. Utilizado basicamente para a soldagem de aços duplex com 25%Cr. O metal de solda possui as outras características similares àquelas do E2209.

COBRE E SUAS LIGAS

Na descrição dos consumíveis a seguir, as composições químicas (principais elementos adicionados além do cobre) bem como as durezas discriminadas, são dos metais de solda depositados sem diluição.

- ECu: cobre puro desoxidado; dureza de 20 a 40 HRF. Eletrodo utilizado na soldagem de materiais base desse tipo; similares e cobre eletrolítico. Empregado, também, em reparos desses materiais, ou revestimentos protetores de ferros fundidos e aços, sendo que sobre soldas de revestimento, esse reparo deve ser realizado com a mínima diluição possível.

- ECuSi: 3%Si, com baixos teores de manganês e estanho; dureza de 80 a 100 HB (carga de 500 kg). Eletrodo operando em CCEP e frequentemente empregado em revestimento protetor à corrosão, além de na união de latões; cobre; metais dissimilares - incluindo alguns ferrosos - e bronze de silício.

- ECuSn (A e C): ECuSn-A com 4-6%Sn e o ECuSn-C com 7-9%Sn, ambos contendo 0,05-0,35%P; dureza do ECuSn-A entre 70 e 85 HB e a do ECuSn-C entre 85 e 100 HB (carga de 500 kg). O eletrodo opera em CCEP, produzindo uma poça de fusão pouco fluída e geralmente a soldagem somente é possível com alto pré-aquecimento do metal base. Deve ser evitada a absorção de umidade pelo revestimento e sempre será realizado ressecagem antes da soldagem. Utilizado principalmente na soldagem do bronze, esses consumíveis são também empregados sobre latões, entre si e com aços ao carbono e ferros fundidos, além de na produção de revestimentos protetores e reparos de fundidos.

- ECuNi: 29-33%Ni e 1-2,5%Mn; dureza de

60 a 80 HB (carga de 500 kg). O eletrodo pode operar em todas as posições, nos diâmetros de 2,4 e 3,2 mm com CCEP. Utilizado na soldagem de laminados ou fundidos de ligas cobre-níquel tipo 70/30; 80/20 e 90/10, além do lado revestido com CuNi de aços; níquel ou ligas NiCu. Geralmente não é realizado pré-aquecimento no metal base.

- ECuAl-A2: 7-9%Al e 0,5-5%Fe; dureza de 130 a 150 HB (carga de 3000 kg). Eletrodo operando em CCEP e posição plana, utilizado na soldagem de bronzes de alumínio de composição similar; ligas cobre-zinco de alta resistência mecânica; bronzes de silício; bronzes de manganês; algumas ligas de níquel; diversas ligas ferrosas; metais dissimilares; revestimento protetor de mancais.

- ECuAl-B: 8-10%Al e 2,5-5%Fe; dureza de 140 a 180 HB (carga de 3000 kg). O metal de solda apresenta maiores dureza; resistência à tração e limite de escoamento do que aquele depositado pelo ECuAl-A2, mas menor ductilidade. O eletrodo opera em CCEP na posição plana e é utilizado no reparo de fundidos e revestimento protetor em mancais.

- ECuNiAl: 4-6%Ni, além de manganês e ferro; dureza entre 160 e 200 HB (carga de 3000 kg). Eletrodo operando em CCEP e na posição plana, utilizado na união ou reparo de laminados e fundidos de bronzes níquel-alumínio; revestimento protetor à corrosão, erosão e cavitação em águas levemente salgadas.

- ECuMnNiAl: 1-2,5%Ni; 11-13%Mn; 5,5-7,5%Al, além de ferro; dureza entre 160 e 200 HB (carga de 3000 kg). Eletrodo operando em CCEP e posição plana, empregado na união ou reparo de fundidos e laminados de bronzes manganês-níquel-alumínio; revestimento protetor que requeira excelente resistência à corrosão, erosão e cavitação.

FERROS FUNDIDOS

Esses eletrodos podem ser apresentados nos seguintes quatro grupos:

- Ferro Fundido: a alma desse eletrodo revestido é de ferro fundido (3,5%C; 3%Si; 0,70%Mn; 0,60%P), sendo designado ECI (CI para “Cast Iron”, ou seja, ferro fundido). A escória é relativamente fina, apesar do revestimento ser espesso. Dependendo do porte da peça, pode ser necessário pré-aquecer a mesma entre

200 e 650 °C, com o propósito da dureza do depósito não ultrapassar 200 HB.

□ Ligas de Níquel

Com esses consumíveis, desde que seja pequena a diluição, as soldas realizadas sem pré-aquecimento são usináveis. Uma única camada pode resultar em dureza tão alta quanto 350 HB, enquanto multi-camadas devidamente controladas apresentam de 175 a 200 HB. Os seguintes eletrodos revestidos compõem esse grupo:

- ENi-CI: Com alma de níquel puro, esse eletrodo é utilizado na reconstrução e reparo de fundidos, além de na união dos mesmos com outras ligas ferrosas e não-ferrosas. Soldas de união podem ser realizadas sobre juntas não muito tensionadas, ou quando o metal base apresentar baixo teor de fósforo. O metal de solda apresenta relativamente baixa resistência e ductilidade, sendo esse eletrodo somente empregado quando há necessidade de máxima usinabilidade. Caso contrário, o eletrodo ENiFe-CI abaixo descrito deve ser preferido.

- ENi-CI-A: Similar ao ENi-CI, esse eletrodo possui maior teor de alumínio no revestimento (até 3%). Enquanto esse elemento pode melhorar as características da escória, o mesmo também reduz a ductilidade do metal de solda.

- ENiFe-CI: Eletrodo com alma de ferro-níquel, utilizado em situações similares ao anterior (ENi-CI). Além de ser menos caro, o mesmo deve ser preferido na soldagem do ferro fundido nodular; ferros fundidos com teor de fósforo acima de 0,20%; seções altamente estrangidas e ferros fundidos de alta resistência mecânica.

- ENiFe-CI-A: Similar ao ENiFe-CI, mas com maior teor de alumínio no revestimento (até 3%). Enquanto esse elemento pode melhorar as características da escória, o mesmo também reduz a ductilidade do metal de solda.

- ENiFeMn-CI: Esse eletrodo deposita um metal de solda com até 14% de manganês, o que pode ser benéfico para sua fluidez e propriedades mecânicas. Portanto, esse consumível pode ser empregado na união de ferros fundidos nodulares de alta resistência mecânica e como revestimento protetor ao desgaste.

- ENiCu-A e ENiCu-B: O primeiro tipo pode conter até 45%Cu, enquanto o segundo 35%Cu.

Esses consumíveis devem ser empregados de modo a produzir pequena diluição, pois caso contrário se formam trincas no metal de solda. As aplicações são similares àquelas recomendadas para o ENiFe-CI, ENiFe-CI-A e ENiFeMn-CI.

□ Aço ao Carbono

Uma interessante característica da Norma AWS para o eletrodo revestido ESt, é que a análise química requerida se refere à alma do consumível (e não do metal de solda depositado sem diluição, como em todos os outros casos), com a mesma sendo de aço contendo baixos teores de carbono e silício. Por outro lado, o seu revestimento difere daquele empregado nos eletrodos para soldagem de aços ao carbono, principalmente considerando o relativamente baixo ponto de fusão que apresenta. O eletrodo pode operar em todas as posições, com CCEP ou CA e é geralmente empregado no reparo de pequenas trincas e falhas de fundidos. Os cordões devem ser curtos e bastante separados entre si, com um leve martelamento sendo aplicado imediatamente após o término de cada um. O pré-aquecimento somente deve ser utilizado, quando for necessário prevenir o desenvolvimento excessivo de tensões em outras partes da peça. As soldas em uma única camada podem apresentar dureza tão elevada quanto 350 HB, tornando-as de difícil usinabilidade. Quando esse eletrodo for utilizado na soldagem de grandes descontinuidades, é recomendável o emprego de pinos que “ancorem” o metal de solda ao metal base. Esse pinos devem ser enroscados numa profundidade mínima igual ao seu diâmetro (o qual varia geralmente entre 6 e 16 mm), projetando-se cerca de 5 mm acima da superfície a ser soldada e posicionados além da ZAC. A área total da seção transversal dos pinos deve se situar entre 25 e 35% daquela da superfície que sofrerá a soldagem.

□ Ligas de Cobre

Os eletrodos revestidos mais utilizados na soldagem dos ferros fundidos são o ECuSn-A, ECuSn-C e ECuAl-A2, descritos anteriormente.

REVESTIMENTOS PROTETORES

Uma das mais inteligentes aplicações da engenharia da soldagem, é o revestimento de superfícies com propriedades de resistência à específicos agentes, tais como, entre outros, desgaste por fricção; impacto; abrasão; erosão; cavitação e oxidação. Esse tipo de operação é muitas vezes denominado “revestimento duro”. Entretanto, como

será visto no volume dedicado à Metalurgia da Soldagem, a dureza não é sempre um indicador único da resistência ao desgaste e, portanto, esta é uma terminologia equivocada.

Desta forma, os consumíveis para revestimentos protetores podem ser empregados tanto na fabricação de novas peças, quanto no reparo e extensão da vida útil de componentes que já se encontram em serviço. Devido ao grande número de aplicações e necessidades diversas de proteção, esses eletrodos são agrupados por propriedades, as quais são as seguintes:

□ Aços Ferramenta

Disponíveis como EFe5-A, EFe5-B e EFe5-C, com teores decrescentes de carbono (0,7-1,0% na primeira classificação e 0,3-0,5% na última) e todos contendo tungstênio; cromo; molibdênio e vanádio. As propriedades do metal de solda desses eletrodos são similares entre si, com as classes -A e -B empregadas em corte e usinagem, pois mantêm o fio e quinças, enquanto o do tipo -C desempenha melhor as funções que requerem maior tenacidade e nos trabalhos a quente. Algumas típicas aplicações são: ferramenta de corte; lâminas de corte; matrizes; brochadeiras e guias. O depósito possui, ainda, as seguintes propriedades gerais: (a) Dureza à temperatura ambiente de 60 HRC, diminuindo para 47 HRC à 587 °C e cerca de 30 HRC à 642 °C; (b) Moderada resistência ao impacto como soldado, com significativo aumento da mesma após adequado revenimento; (c) Baixa resistência à oxidação, necessitando uma conveniente atmosfera quando sofrer tratamento térmico; (d) Alta resistência à corrosão atmosférica; (e) Muito mais alta resistência à abrasão do que aquela apresentada pelos aços ao carbono, mas ainda assim não é considerado um revestimento adequado para esse tipo de desgaste; (f) Alta resistência à deformação até a temperatura de 587 °C; (g) Alta resistência mecânica em até 587 °C; (h) Baixo coeficiente de fricção; (i) Elevada resistência ao desgaste metal-metal, especialmente em altas temperaturas.

A microestrutura do metal de solda é composta por martensita tetragonal e austenita retida, ambas com altos teores de elementos de liga, além de carbonetos complexos não dissolvidos. Para a soldagem, deve ser empregado um pré-aquecimento mínimo de 150 °C e caso seja necessário usinar o depósito, o mesmo deve ser recozido entre 835 e 890 °C. Nesse caso, a têmpera pode ser realizada através do pré-aquecimento da peça entre 1192 e 1220 °C e resfriamento da mesma ao ar ou óleo.

A essa operação deve seguir um duplo revenimento, consistindo na repetição do aquecimento à 546 °C por duas horas. Observe-se que deve ser evitado, sempre que possível, qualquer tratamento térmico sobre peças soldadas.

□ Aços Austeníticos ao Manganês

O metal de solda depositado por esses eletrodos contém de 11 a 16% de manganês, sendo que adicionalmente o EFeMn-A possui entre 2,75 a 6,0%Ni (exibindo maior alongamento) e o EFeMn-B de 0,6 a 1,4%Mo (com maior limite de escoamento). Algumas características importantes do metal de solda depositado por esses eletrodos são: (a) A sua microestrutura é composta principalmente por austenita quase saturada por carbono, sendo que a mesma não é completamente estável e, em temperaturas intermediárias, ou durante deformação, carbonetos de ferro e manganês serão precipitados; (b) O EFeMn-A apresenta maior resistência à fragilização ao aquecimento até 425 °C do que o EFeMn; (c) A dureza do metal como soldado se encontra entre 170 e 230 HB, elevando-se para 450 a 550 HB após sofrer trabalho a frio; (d) O reaquecimento prolongado acima de 250 °C pode causar fragilização, devido à precipitação de carbonetos; (e) A resistência à oxidação e corrosão é similar àquela dos aços ao carbono. Dessa forma, esse material não deve realizar trabalho a quente, sendo o mesmo próprio para aplicações envolvendo: (a) Altas tensões e impactos repetidos em geral; (b) Impacto e desgaste metal-metal; (c) Moagem de rochas; (d) Trilhos de estrada de ferro, nos cruzamentos e desvios (EFeMn-B). Portanto, o metal de solda deve resfriar rapidamente, e, caso o metal base seja aço ao manganês, o mesmo deve permanecer abaixo de 250 °C numa distância de cerca de 50 mm do cordão pois, caso contrário, poderá ocorrer precipitação de carbonetos. Além disso, o depósito não deve ser realizado diretamente sobre aços ao carbono ou baixa liga, devido à possibilidade da formação de uma zona de transição de baixo manganês do tipo martensítica, extremamente frágil e que pode até provocar separação da solda quando em serviço. Nesse caso, deve ser previamente realizado um revestimento (“amanteigamento”) sobre o metal base, empregando um aço inoxidável austenítico, por exemplo.

□ Ferro Fundido Austenítico de Alto Cromo

O metal de solda depositado pelo eletrodo EFeCr-A1 possui de 3 a 5%C e 26 a 32%Cr, além de alto manganês, molibdênio e silício. A maior aplicação do mesmo, é recobrir superfícies para

resistir à erosão e abrasão em baixa tensão, tais como em: (a) Calhas de deslizamento de coque; (b) Guias de laminadores; (c) Componentes de jato de areia; (d) Peças de máquinas em olarias; (e) Peças de implementos agrícolas, notavelmente rella e arado, não sendo indicado onde ocorra impacto, como arar em solo rochoso. Algumas características desse metal de solda são: (a) A dureza à temperatura ambiente se encontra entre 52 a 60 HRC (dependendo do teor de carbono), decrescendo lentamente conforme aumenta a temperatura até 425-480 °C, sendo que nesse ponto ocorre uma súbita aceleração na sua redução e a mesma torna-se sujeita à fluência; (b) É elevada a resistência à oxidação até cerca de 980 °C; (c) Não é alta a sua resistência à corrosão, nem o mesmo é inoxidável, sendo bastante baixa em meio líquido, devido ao relativamente pequeno teor de cromo na matriz austenítica. O metal de solda não é comercialmente usinável, sendo muito difícil de ser retificado. A microestrutura do mesmo é composta de carbonetos duros (cerca de 2000 VPN) do tipo Cr_7C_3 , dispersos numa matriz austenítica, a qual é estável quando o resfriamento é lento.

A classificação em pauta não se aplica aos ferros com altos teores de cromo, nos quais é possível a formação de perlita; endurecimento martensítico e outras formas de transformação da austenita.

□ Ligas à Base de Cobalto

São três os eletrodos classificados nessa categoria. O ECoCr-A apresenta o menor teor de carbono e tungstênio, com dureza na temperatura ambiente entre 23 e 47 HRC, dependendo da diluição do depósito. Esse consumível encontra aplicação onde são requeridas resistências ao calor; corrosão e oxidação, ou seja, tipicamente nos componentes em contato direto com exaustão de motores à explosão, ou em assentos de válvulas. Os metais de solda depositados pelos eletrodos ECoCr-B e ECoCr-C possuem, nessa ordem, maiores teores de carbono e tungstênio, exibindo dureza na temperatura ambiente entre 34 e 47 HRC e 43 a 58 HRC, respectivamente. Os mesmos são utilizados quando a resistência à abrasão e maior dureza são necessárias, mas apresentam menor tenacidade. De forma geral, o metal de solda depositado por esses eletrodos possui elevada resistência mecânica e dureza em altas temperaturas. Acima de 650 °C é considerado superior aos outros revestimentos pois, por exemplo, um depósito realizado pelo ECoCr-C apresenta dureza média de 49 HRC na temperatura ambiente; à 345 °C 41 HRC; à 565

°C 35 HRC, enquanto que à 650 °C ainda exibe 29 HRC, retornando para seu valor original quando novamente na temperatura ambiente. Entre as temperaturas de 540 °C e 650 °C as vantagens são discutíveis e dependem da aplicação específica, sendo que abaixo de 540 °C geralmente outro tipo de revestimento pode ser o mais indicado.

□ Cobre e suas Ligas

Esses eletrodos são utilizados em revestimentos de mancais e superfícies em geral, as quais devem ser resistentes à corrosão e ao desgaste. As seguintes classes se enquadram nesse grupo, além daquelas mencionadas nos itens anteriores: (a) ECuAl-A2, para superfícies de sustentação e resistência à corrosão, com dureza entre 130 e 190 HB; (b) ECuAl-B e ECuAl-C, para superfícies de sustentação, com dureza entre 140 e 290 HB; (c) ECuAl-D e ECuAl-E, para superfícies de sustentação e resistentes ao desgaste, com dureza entre 230 e 390 HB, tais como engrenagens; cames e roldanas; (d) ECuSi, para superfícies resistentes à corrosão; (e) ECuSn-A e ECuSn-C, para superfícies de sustentação que requerem baixa dureza; resistência à corrosão e, ocasionalmente, resistência ao desgaste. Essas ligas de cobre possuem as seguintes características gerais: (a) Não são recomendadas para uso em temperaturas relativamente elevadas, com a dureza sofrendo grande redução acima de 205 °C; (b) A resistência ao impacto mais alta é a do ECuAl-A2, com essa propriedade decrescendo com o aumento do teor de alumínio; (c) O ECuSi possui boa resistência ao impacto, mas não ao desgaste metal-metal; (d) Os depósitos do ECuSn-A e -C apresentam a menor resistência ao impacto; (e) Possuem, em geral, boa resistência à oxidação e à corrosão, mas não são recomendadas para serviços com severa abrasão; (f) Em aplicações como mancais, uma pequena porosidade superficial é aceitável pois, por exemplo, certos depósitos de bronze possuem chumbo na sua composição, o qual propositadamente produz poros, os quais retêm óleo, promovendo lubrificação adicional.

□ Ligas Níquel-Cromo-Boro

Os depósitos das três classes apresentam boa resistência ao desgaste; à abrasão de baixa tensão; à corrosão e retém dureza em elevadas temperaturas, conforme mostram os resultados sobre duas camadas da **Tab. 4.9**. A resistência ao impacto que produza deformação plástica é baixa, pois tem como consequência trincas no depósito do ENiCr-C e prováveis trincas nas outras duas

classes. Devido ao alto conteúdo de níquel (maior do que 60%), essas ligas são resistentes à oxidação até cerca de 980 °C, mas há o perigo de ocorrer fusão incipiente próximo à essa temperatura e não é recomendável o emprego das mesmas acima de 945 °C. De forma geral, os depósitos possuem alta resistência à corrosão, sendo excelente a resistência dos memos ao desgaste metal-metal.

□ Eletrodo Compósito

Esse consumível é geralmente composto por tubo de aço efervescente, com o interior preenchido por elementos de liga em pó e revestido exteriormente com fluxo. Raramente esses tubos são utilizados sem revestimento. As classes de interesse possuem carboneto de tungstênio, além daquelas já apresentadas (EFe5-A; EFe5-B; EFe5-C; EFeMn-A; EFeMn-B; EFeCr-A1). As cinco classificações dependem da granulometria dos grãos do carboneto de tungstênio, sendo: EWC-12/30; EWC-20/30; EWC-30/40; EWC-40 e EWC 40/120. Os depósitos realizados por esses eletrodos exibem as mais altas resistências à abrasão, entre todos aqueles obtidos por soldagem. São tipicamente empregados naquelas aplicações onde não é importante a rugosidade superficial, mas sim a resistência à abrasão, tais como em dentes de brocas de rochas; superfícies de desgaste em minas; equipamentos para escavação, entre outros. O depósito possui matriz com alto carbono e tungstênio (de alta dureza) a qual suporta grânulos de carbonetos de altíssima dureza. A microdureza de um depósito WC com 6,1%C possui 1880 Knoop (K_{100}) no carboneto; matriz com 30 HRC (granulometria 40-60) depositada por arco elétrico e até 60 HRC, quando oxiacetileno com chama carburante é empregado. A dureza desses depósitos se mantém até a temperatura em torno de 540 °C, reduzindo-se para 40 HRC à 640 °C. Esse depósitos não são comercialmente considerados usináveis, apresentando pequena resistência à oxidação e corrosão desgaste metal-metal.

NÍQUEL E SUAS LIGAS

A soldagem com eletrodos revestidos desse grupo, requer consideração de certos fatores específicos. Como o metal fundido possui pouca fluidez, o mesmo não preenche a junta tão facilmente quanto o de aço e deve ser posicionado exatamente no local que o requer, com pequeno balanço do eletrodo. Caso a poça de fusão exiba largura maior do que três vezes a bitola do eletrodo, isso é indicação de possível exposição da mesma à atmosfera. Por outro lado, a tentativa de se compensar a relativa falta de fluidez através da elevação da intensidade de corrente, leva ao excessivo aquecimento do eletrodo e resulta em perda da estabilidade do arco e proteção da poça de fusão, pois o revestimento se separa da alma antes de alcançar a extremidade em que se encontra o arco.

As principais características de cada classe são:

- ENi-1: O metal de solda depositado é de níquel quase puro, com 1-4% de titânio no revestimento para desoxidá-lo e eliminar porosidade. O mesmo é altamente resistente a ataques corrosivos de álcalis cáustico, gases halógenos secos, etc., com uso na soldagem de níquel comercialmente puro (tipicamente ASTM A461 Grs. B160, B161, B162 e B163) empregado nos equipamentos de processamento de alimentos e transporte de materiais cáusticos, entre outros. Esse consumível também é utilizado na soldagem ou revestimento de aço com níquel. O eletrodo opera em CCEP, com diâmetros de até 3,2 mm soldando em todas as posições. Para maiores bitolas, as posições possíveis são a plana e a horizontal.

- ENiCu-7: O metal depositado é do tipo monel (Ni-Cu), utilizado por apresentar combinação de resistência à corrosão e alta tenacidade, geralmente necessária em instalações químicas e outras áreas de engenharia. Tipicamente empregado na união de ASTM A461 Grs. B127, B163,

Tabela 4.9 - Características das Ligas Níquel-Cromo-Boro, em Depósito de Duas Camadas.

Classe AWS	Composição Química (%)			Dureza (HRC) à Temperatura de			
	C	Cr	B	21 °C	315 °C	430 °C	540 °C
ENiCr-A	0,30-0,60	8,0-14,0	2,00-3,00	30-35	30	29	24
ENiCr-B	0,40-0,80	10,0-16,0	2,00-4,00	40-45	41	39	33
ENiCr-C	0,50-1,00	12,0-18,0	2,50-4,50	49-56	49	46	39

B164 e B165, além de ligas Ni-Cu com aços, ou no lado em que o aço é revestido com essa liga. O tipo de corrente e posições de soldagem são idênticas ao ENi-1.

- ENiCrFe-1: O depósito apresenta resistência à oxidação em temperaturas elevadas, mantendo boas propriedades mecânicas, sendo utilizado em acessórios de fornos para tratamento térmico e processamento de alimentos. Além disso, devido à sua elevada resistência à corrosão sob tensão; corrosão por água de alta pureza e íon cloro, o mesmo é também empregado em reatores nucleares. Os metais base tipicamente soldados são ASTM A461 Grs. B163, B166, B167 e B168, com o tipo de corrente e posições de soldagem idênticas às classes anteriores.

- ENiCrFe-2: Amplamente utilizado na soldagem de ligas dissimilares, tais como aços ferríticos em austeníticos; ou ligas com alto conteúdo de níquel em aços austeníticos; ou ASTM A461 Grs. B163, B166, B167 e B168. O tipo de corrente e posições de soldagem são idênticas às anteriores.

- ENiCrFe-3: Versão com alto manganês do ENiCrFe-2, com aplicação específica na área nuclear. Esse elemento diminui a resistência à corrosão do depósito em meios que não sejam a água quente. Em compensação, a tendência à trinca é minimizada na soldagem de juntas altamente restringidas. É utilizado nas soldas de ligas Ni-Cr-Fe; no lado revestido por essas ligas em aços e revestimento protetor, além de tipicamente ser empregado sobre ASTM A461 Grs. B163, B166, B167 e B168. O tipo de corrente e posições de soldagem são idênticas às anteriores.

- ENiCrFe-4: Desenvolvido com o propósito de soldar aços com 9%Ni, tipicamente ASTM A333, A334, A353, A522 e A553. O eletrodo opera em CA e CC, com o depósito possuindo maior

resistência mecânica do que o do ENiCrFe-2.

- ENiMo-1: Utilizado na soldagem de ligas Ni-Mo; lado de aço revestido com essa liga; sobre outras ligas de níquel; tipicamente sobre aços ASTM B333, B335, B619, B622 e B626. A posição de soldagem usual é a plana.

- ENiMo-3: Empregado na soldagem de metais dissimilares entre ligas de níquel, cobalto e ferro. O eletrodo geralmente opera somente na posição plana.

- ENiMo-7: Utilizado na soldagem de ligas Ni-Mo; lado revestido de juntas de aço com materiais tais como ASTM B333, B335, B619, B622 e B626. O eletrodo geralmente opera na posição plana.

- Grupo ENiCrMo: Os eletrodos que compõem esse grupo, são utilizados para a soldagem de ligas NiCrMo, com ligas Hastelloy do tipo C, F, G e X. De forma geral, além dessas ligas esses eletrodos realizam soldas no lado revestido com níquel de aços; de chapas assim revestidas com aço, ou com ligas à base de níquel. Os eletrodos geralmente operam somente em CC e na posição plana, com exceção do ENiCrMo-6, o qual solda com CA e CC, em todas as posições com diâmetros de até 3,2 mm e nas posições plana e horizontal quando a bitola for maior. Tipicamente, esses consumíveis são utilizados nos seguintes metais base: (a) ENiCrMo-1, sobre ASTM B581, B582, B619, B622 e B626; (b) ENiCrMo-2, sobre ASTM B435, B572, B619, B622 e B626; (c) ENiCrMo-3, sobre ASTM B443, B444 e B446; (d) ENiCrMo-4, sobre ASTM B574, B575, B619, B622 e B626; (e) ENiCrMo-5, sobre ASTM B334, B336 e B366; (f) ENiCrMo-6, sobre aços com 9%Ni, tais como ASTM A333, A334, A353, A522 e A553; (g) ENiCrMo-7, sobre ASTM B574, B575, B619, B622 e B626; (h) ENiCrMo-9, sobre ASTM B581, B582, B619, B622 e B626.

RESSECAGEM DOS ELETRODOS REVESTIDOS

Juntas soldadas submetidas a grande constrangimento (altamente tensionadas) em conjunto com microestruturas frágeis (martensita de alto carbono, por exemplo) e com elevado teor de hidrogênio depositado pelo consumível na poça de fusão, podem apresentar trincas no metal de solda, ou (mais freqüentemente) na Zona Afetada pelo Calor (ZAC). Portanto, para evitar esse defeito - denominado "Trinca Induzida pelo Hidrogênio (TIH)" - uma importante providência que deve ser tomada, é minimizar o hidrogênio proveniente da umidade do revestimento. Outra origem desse elemento, é a decomposição do material orgânico contido em certos revestimentos, sendo uma solução, nesse caso, a troca do consumível para o do tipo "baixo hidrogênio". Esse revestimento, entretanto, necessita ser devidamente ressecado, pois é caracteristicamente higroscópico.

Por outro lado, sempre que possível deve ser seguida a temperatura e o tempo de ressecagem recomendado pelo fabricante do consumível. Isso se deve ao fato, de que eletrodos pertencentes a uma mesma classe, mas fabricados por diferentes produtores - e, portanto, com diferentes proporções, ou até mesmo diversos compostos químicos - absorvem a umidade da atmosfera em diferentes taxas. A Fig. 4.6 exemplifica esse ponto, mostrando como varia a umidade absorvida pelo revestimento do eletrodo classe E7018-G, produzido por seis diferentes fabricantes. Nesse caso, os eletro-

dos foram expostos por vários períodos de tempo à uma atmosfera de 21°C e umidade relativa de 65%. Note-se que para uma mesma exposição de 48h, uma marca absorve umidade cerca de 20 vezes (!) mais do que outra.

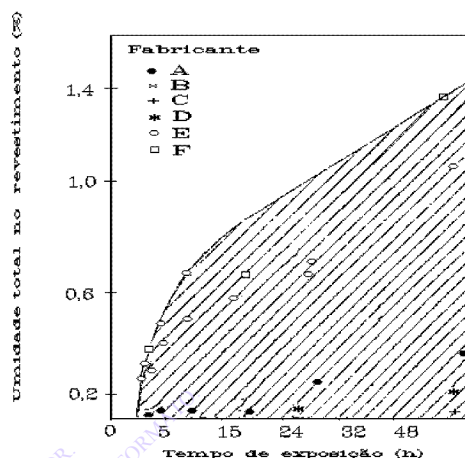


Figura 4.6 - Umidade absorvida pelo revestimento de eletrodos da Classe AWS E7018-G, procedentes de diversos fabricantes.

Na falta de informações mais precisas do fabricante sobre seu produto, a Tab. 4.10 pode ser utilizada para estocagem e ressecagem dos eletrodos para aço ao carbono.

Tabela 4.10 - Recomendações para Estocagem e Ressecagem dos Eletrodos Revestidos para Aço ao Carbono (a)

Classificação (AWS)	Umidade Máxima (%)	Condições de Estocagem		Ressecagem
		Exposto à Atmosfera	Estufa de Manutenção	
E6010, E6011	NE (b)	Temperatura Ambiente	NR (c)	NR
E6012, E6013, E6019, E6020, E6022, E6027, E7014, E7024, E7027	NE	30±10°C com 50% de Umidade Relativa máxima	12 à 24°C acima da Temperatura Ambiente	1 hora na Temperatura de 135±15°C
E7015, E7016, E7018, E7028, E7048	0,6	NR	30 à 140°C acima da Temperatura Ambiente	1 a 2 horas na Temperatura de 350 à 425 °C
E7015R, E7016R, E7016-1R, E7018R, E7018-1R, E7028R, E7048R	0,3	NR	Idem	Idem
E7018M	0,1	NR	Idem	Idem

Notas Relativas à Tabela 4.10: (a) O fabricante do consumível deve ser consultado, sempre que possível, sobre as melhores condições de estocagem e ressecagem para seu produto; (b) Não Especificado; (c) Não Recomendado.

Apesar da ênfase demonstrada pela AWS com relação à umidade contida no revestimento do eletrodo, não existe uma direta relação entre seu teor e o nível de hidrogênio difusível (ou total) transferido pelo metal de solda. Além disso, certos tipos de eletrodos possuem elevado conteúdo de material orgânico no revestimento e inerentemente depositam alto hidrogênio. Portanto, o que deve ser medido é o nível desse elemento no metal de solda depositado sob condições especificadas, pois o mesmo é o principal agente causador da trinca induzida pelo hidrogênio produzida na junta. Por sua vez, o International Institute of Welding (IIW) recomenda a seguinte terminologia, em mililitros de hidrogênio difusível por 100 g do metal de solda depositado: (a) Muito baixo, de 0 a 5; (b) Bai-

xo, de 5 a 10; (c) Médio, de 10 a 15; (d) Alto, acima de 15. Existindo risco de que ocorra trincas induzidas pelo hidrogênio, deve-se empregar consumíveis que depositem metal de solda com níveis “muito baixo” ou “baixo” desse elemento. Em geral, os diferentes tipos de eletrodos depositam os seguintes volumes de hidrogênio difusível por 100 g do metal de solda depositado: (a) Celulósicos, acima de 30 ml; (b) Rutilícos, entre 15 e 30 ml; (c) Básicos, menos de 10 ml.

A umidade no revestimento também pode causar defeitos em outros materiais. Para evitá-los, e caso não sejam disponíveis indicações do fabricante do consumível, podem ser seguidas as sugestões apresentadas na **Tab. 4.11**.

Tabela 4.11 - Condições de Ressecagem de Diferentes Eletrodos Revestidos

Tipo do Consumível	Temperatura/Tempo de Ressecagem	Tipo do Consumível	Temperatura/Tempo de Ressecagem
Aço Inoxidável Rutilíco	120 à 150°C/2 horas	Ferro Fundido-Alma de Níquel ou Monel	150 à 180°C/1 hora
Aço Inoxidável Básico/Rutilíco	180 à 200°C/2horas	Ferro Fundido-Alma de Aço Baixo Carbono	150 à 200°C/1 hora
Cobre e suas Ligas Básico	200 à 250°C /2 horas	Níquel e suas Ligas	200 à 250°C/2 horas
Alumínio e suas Ligas	175 à 200 °C/1 hora		

SOLDAGEM POR GRAVIDADE E POR CONTATO

A soldagem por gravidade é uma variante daquela manual com eletrodo revestido. Nesse caso, um eletrodo geralmente mais longo do que o usual (cerca de 700 mm); de relativamente grande bitola (5 mm ou maior) e com revestimento espesso, opera num tripé alimentador, realizando soldas de ângulo na posição horizontal. O movimento do eletrodo, ou é consequência da aceleração devida à gravidade, ou resultado da ação de molas (quando também é possível soldar juntas a topo e em ângulo na posição plana), conforme ilustrado nas **Figs. 4.7(a,b)**, respectivamente.

Seja qual for o sistema empregado, a grande vantagem desse processo é permitir que somente um operador coordene até quatro tripés ao mesmo tempo, com grande ganho de produtividade. Como pode ser visto na **Fig. 4.7(a)**, enquanto se realiza a solda por gravidade o porta eletrodo desliza para baixo, ao longo da barra suporte de deslizamento. Como consequência, o comprimento do cordão

soldado será igual à soma da projeção da parte útil da barra suporte e da projeção do eletrodo (menos o toco). O método com mola da **Fig. 4.7(b)**, atua com a alavanca puxando o eletrodo num ângulo de 10 a 50° com a junta. Conforme se processa a soldagem, esse ângulo aumenta, alterando ligeiramente o tamanho da perna e a penetração da solda.

A fonte de potência utilizada em ambos os casos é a mesma daquela para o método de soldagem convencional (em CC ou CA). Entretanto, atenção deve ser dada à questão do ciclo de trabalho e corrente da mesma. O uso de revestimento espesso nos eletrodos com esse método, é devido ao fato de que assim os mesmos formam uma protuberância na ponta (“taça”), com a alma fundido mais lentamente, evitando-se curto-circuito com o metal base. Além disso, o revestimento espesso aumenta a rigidez do eletrodo, impedindo-o de oscilar. Por outro lado, praticamente se observou

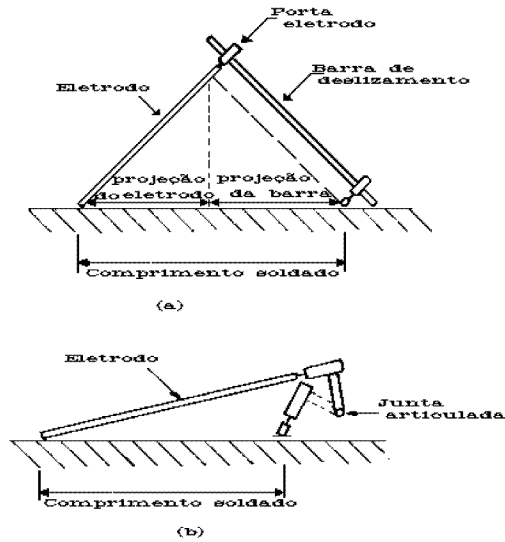


Figura 4.7-Soldagem por gravidade, sendo realizada em (a) por ação devida à aceleração da gravidade e em (b) por efeito de molas.

que o comprimento do eletrodo em torno de 700 mm é o mais conveniente, pois não há grande diferença de aquecimento do mesmo por efeito Jou-

le entre o início e o fim da solda, o que provocaria variação da taxa de deposição.

Sugestões para a soldagem por gravidade (sem mola) e utilizando mola como atuador (com CA) são apresentadas na **Tab. 4.12**. Por outro lado, é notável o aumento da taxa de deposição com o emprego desses métodos. Por exemplo, na produção de soldas de filete com 8 mm de perna e eletrodo AWS E6027, a soldagem por gravidade apresenta os seguintes valores: (a) Manual, com 4,5 kg/h; (b) Gravidade-2 eletrodos (ou dois “arcos”), com 7,7 kg/h; (c) Gravidade-3 arcos, com 11,8 kg/h; (d) Gravidade-4 arcos, com 15,4 kg/h.

Por sua vez, a soldagem por contato é outro método que pode aumentar significativamente a produtividade, possuindo vantagens similares àquele por gravidade, permitindo realizar soldas sobre juntas de difícil acesso nas posições plana e vertical. Nesse caso, é utilizado eletrodo com revestimento muito espesso e de grande comprimento, disposto conforme ilustrado na **Fig. 4.8**, para junta a topo (a) e em ângulo (b). O eletrodo (E) é posicionado horizontalmente ao longo da junta, coberto com um material isolante (M), sobre o qual são colocadas grandes massas de cobre (C). O consumível pode ser conectado a um porta eletrodo

Tabela 4.12 - Condições para Soldagem com Eletrodo Revestidos por Gravidade Com e Sem Mola como Atuador

Classe AWS	Consumível Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Junta em Ângulo	
			Perna (mm)	Comprimento (mm)
E6027 (Sem Mola)	5,6	260	7,1	686
		290	6,4	787
	6,4	260	8,7	686
		290	8,0	787
E7024 (Sem Mola)	5,6	290	7,1	686
		350	6,4	787
	6,4	290	8,7	686
		350	8,0	787
E6027 (Com Mola)	5,6	240	6,4	686
	6,4	270	8,0	686
E7024 (Com Mola)	5,6	240	6,4	686
	6,4	270	8,0	686

para soldagem convencional, sendo a operação realizada em CA ou CC, com o arco aberto através de curto-circuito entre o mesmo e a peça (através de uma vareta de carbono, por exemplo).

Nessa técnica, o consumível deve possuir excelente estabilidade de arco, sendo geralmente empregado bitolas de 2,4 a 4 mm para juntas de topo e acima de 4 até 8 mm para em ângulo. Os blocos de cobre são utilizados para aumentar a taxa de extração do calor, podendo ser refrigerados, impedindo, assim, o empenamento do eletrodo revestido.

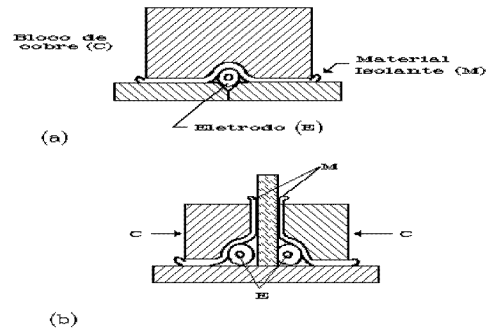


Figura 4.8-Soldagem por contato, para juntas de topo (a) e em ângulo (b).

SELEÇÃO DO ELETRODO REVESTIDO

INTRODUÇÃO

Um consumível é adequadamente escolhido, quando as propriedades mecânico/metalúrgicas do metal de solda depositado pelo mesmo são compatíveis com aquelas do material base e aplicação da junta; as suas características operacionais são as melhores possíveis para as condições do serviço proposto e a soldagem é realizada pelo menor custo.

É importante o conhecimento exato do material base que será objeto da soldagem, pois o mesmo é um dos fatores a serem considerados na definição das temperaturas de pré- e pós-aquecimento, além de assim se evitar a ocorrência de diversas discontinuidades. Também deve ser considerada a compatibilidade dos metais de solda e base. Por exemplo:

- Aços de baixo carbono ferrítico podem ser soldados, em geral, com qualquer classe de eletrodo para aço ao carbono. Entretanto, aços com mais de 0,35%C, ou resistência à tração maior do que 414 MPa, devem ser soldados com eletrodos do tipo baixo hidrogênio;

- Aços inoxidáveis dependem de considerações relativamente complexas para serem soldadas, enquanto que soldas de não-ferrosos possuem, geralmente, composição química similar a do metal base. Porém, existem diversos casos em que o metal de solda deve possuir composição química diferente do metal base, para minimizar a incidência de defeitos, ou melhorar as propriedades mecânicas.

Entretanto, somente o conhecimento da composição química do metal base não é condição suficiente para se determinar o consumível a ser utilizado. As propriedades mecânicas do mesmo podem variar num amplo intervalo, dependendo dos tratamentos termo-mecânicos que sofreu e é geralmente requerido que o metal de solda apresente propriedades equivalentes àquelas do metal base, mas no estado bruto de fusão. Para tanto, é necessário que a composição química e a taxa de resfriamento sejam inteligentemente manipuladas, produzindo assim a microestrutura desejada.

Em geral, estruturas (ou peças) sujeitas a grandes solicitações mecânico/metalúrgicas, são soldadas com eletrodos similares ao metal base. Incluem-se nesses casos, aquelas que requerem alta resistência a impacto e serviços em alta ou baixa temperatura, quando então eletrodos do baixo hidrogênio devem ser utilizados, produzindo soldas com alta resistência; boa ductilidade e elevada tenacidade a baixas temperaturas.

Por outro lado, a habilidade do soldador para trabalhar com o eletrodo, é um fator geralmente desconsiderado quando da seleção do mesmo. Entretanto, é de fundamental importância que exista esta familiaridade, antes de se iniciar a soldagem pois, por exemplo, o E6020 utilizado em posição plana requer menos habilidade do que o E6010. Também, em geral, os eletrodos do tipo baixo hidrogênio são mais difíceis de operar do que qualquer outro.

Outrossim, há de se realizar a soldagem da forma mais econômica possível. Esse problema será discutido no Capítulo 20, mas desde já cabe salientar, que o custo da soldagem é sensivelmente

afetado pela seleção do consumível, pois o mesmo influi diretamente num dos fatores mais importantes dessa questão, que é a taxa de deposição, enquanto um menor efeito é provocado pelo seu preço. Por exemplo, a Fig. 4.9 exibe a influ-

ência do eletrodo sobre o tempo de arco e custo, para soldas horizontais de filetes com tamanhos (pernas) diferentes. Note-se que o E7024 é geralmente mais caro, mas realiza a solda no menor tempo.

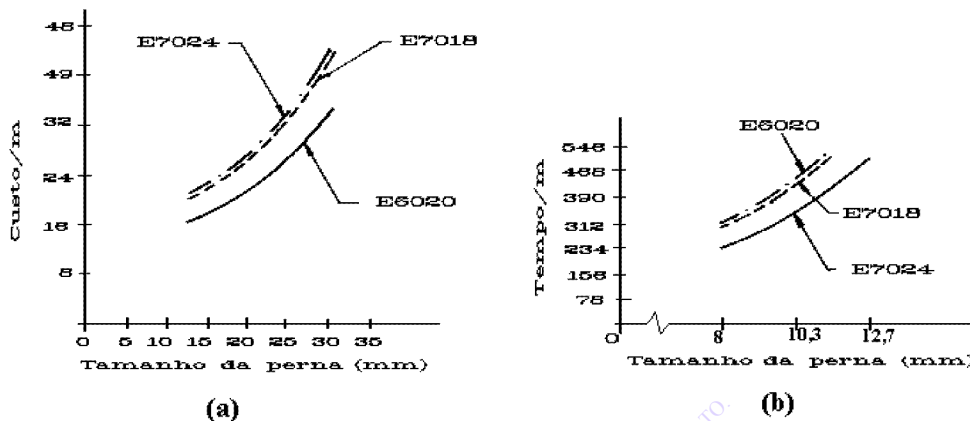


Figura 4.9-Economia em função da classe do eletrodo e tamanho da perna, por metro do cordão: (a) Custo relativo; (b) Tempo de soldagem (em segundos).

ALGUNS INDICADORES DE PRODUTIVIDADE

Entre os diversos itens que compõem esse complexo assunto, se destacam os seguintes:

❑ Relação Volumétrica do revestimento (“RV”)

Determina, juntamente com o pó de ferro, a eficiência e a taxa de deposição (veja mais abaixo), sendo dada por:

$$RV = (D^2 - d^2) / d^2 \quad [4.1]$$

onde “D” é o diâmetro do revestimento e “d” a bitola da alma.

É possível se obter “RV” tão alto quanto 5, com elevada proporção de pó de ferro, de forma que o eletrodo deposite até 8 kg/h de metal de solda.

❑ Rendimento de Deposição

É a razão entre a massa do metal de solda depositado e a massa consumida da alma, expressa como porcentagem. Essa é uma importante informação para a economia da soldagem, a qual deve ser fornecida pelo fabricante, ou determinada pelo usuário.

Um procedimento para a verificação dessa característica é descrito a seguir:

- Uma chapa de aço baixo carbono, com dimensões aproximadas de 70 x 170 x 9 mm deve ser limpa e pesada com acuracidade de ± 1 g, designando-se sua massa por m_c . O material e as dimensões não são críticas.
- Cinco eletrodos, do tipo e dimensões iguais aos que serão testados, deverão ter o revestimento completamente retirado e suas almas pesadas em conjunto, com acuracidade de ± 1 g, sendo essa massa denominada m_a .
- Cinco eletrodos devem ser depositados sobre a chapa, com corrente próxima da máxima indicada pelo fabricante, na posição plana. Para aqueles eletrodos que operam em corrente alternada (CA) e também em corrente contínua (CC), será escolhida a CA, com a deposição ocorrendo sem interrupção, até restar um toco do eletrodo com aproximadamente 50 mm. Entre as deposições com cada eletrodo, a temperatura da chapa não deve exceder cerca de 100 °C, sendo permitido o resfriamento em água. Após todos os eletrodos serem depositados, a chapa deve ser resfriada até a temperatura ambiente, limpa e pesada. A massa m_p , com acuracidade de ± 1 g designará, então, o metal base mais o metal depositado.

- Todo o revestimento dos cinco tocos deverá ser retirado e a massa combinada das suas almas m_r registrada com acuracidade de ± 1 g.
- O rendimento de deposição nominal do eletrodo (R_d) é calculado por:

$$R_n = [(m_t - m_c) / (m_a - m_r)] \times 100 (\%) \quad [4.3]$$

Típicamente os eletrodos revestidos apresentam os seguintes rendimentos de deposição: (a) Celulósico, com 93%; (b) Rutílico, revestimento normal, com 93%; (c) Rutílico, revestimento espesso, de 130 à 165%; (d) Básico, revestimento normal, com 105%; (e) Básico, revestimento espesso (pó de ferro), de 115 à 140%.

Na Fig. 4.10 é exibida a influência do rendimento de deposição e da energia de soldagem sobre o tamanho do cordão (perna), de soldas em ângulo.

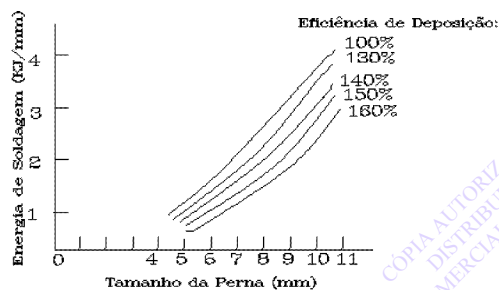


Figura 4.10-Influência do Rendimento de Deposição, com diferentes energias de soldagem, sobre o tamanho da perna em solda de filete.

☐ Taxa de Deposição

É a massa do metal de solda depositado por unidade de tempo, numa dada corrente de soldagem e bitola do eletrodo. Esse é um muito importante fator a ser considerado na economia da soldagem, sendo que a Fig. 4.11 mostra como o mesmo varia em função da corrente. Observe-se que diversas bitolas são empregadas para cada classe de eletrodo nos intervalos de corrente considerados.

☐ Comprimento do Cordão de Solda

Para um dado tipo e bitola de eletrodo revestido, uma vez fixadas as dimensões do cordão de solda a ser realizado com cada consumível se está, indiretamente, estabelecendo a energia da soldagem. As Figs. 4.12(a,b) exibem o compri-

mento do cordão depositado, para cada 100 mm de eletrodo fundido, como função de sua bitola e energia de soldagem, nos casos de rendimentos de deposição iguais a 100-115% e 150-165%, respectivamente. Observe-se que em ambos os casos, o intervalo do emprego da energia de soldagem para cada bitola de eletrodo é: (a) Diâmetro 2,5 mm, de 0,6 à 1,0 kJ/mm; (b) Diâmetro 3,2 mm, de 0,8 à 1,6 kJ/mm; (c) Diâmetro 4,0 mm, de 1,2 à 1,8 kJ/mm; (d) Diâmetro 5,0 mm, de 1,4 à 2,5 kJ/mm; (e) Diâmetro 6,3 mm, de 1,6 à 4,0 kJ/mm.

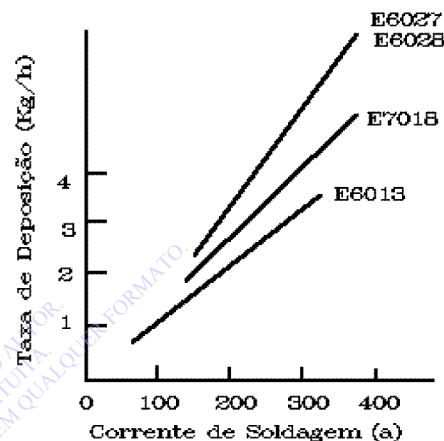


Figura 4.11-Taxa de Deposição de eletrodos revestidos, em função da corrente de soldagem.

☐ Posição de Soldagem

As posições vertical e sobrecabeça restringem os tipos dos eletrodos que podem ser utilizados, além de diminuir a taxa de deposição e necessitar soldadores mais bem treinados. Portanto, sempre que possível, as soldas devem ser realizadas na posição horizontal ou plana, sendo que a troca da vertical ou sobrecabeça para a plana pode, em certos casos, aumentar a velocidade de soldagem em até 400% (!).

☐ Corrente (intensidade / polaridade) e Penetração

A corrente de soldagem é diretamente proporcional à penetração, existindo um intervalo útil no qual cada tipo e bitola de eletrodo pode operar, conforme apresentado na Tab. 4.4. Além disso, a combinação do penúltimo e o último dígito na classificação AWS de eletrodos revestidos para aços ao carbono e baixa liga, fornece uma série de informações de interesse, as quais também foram

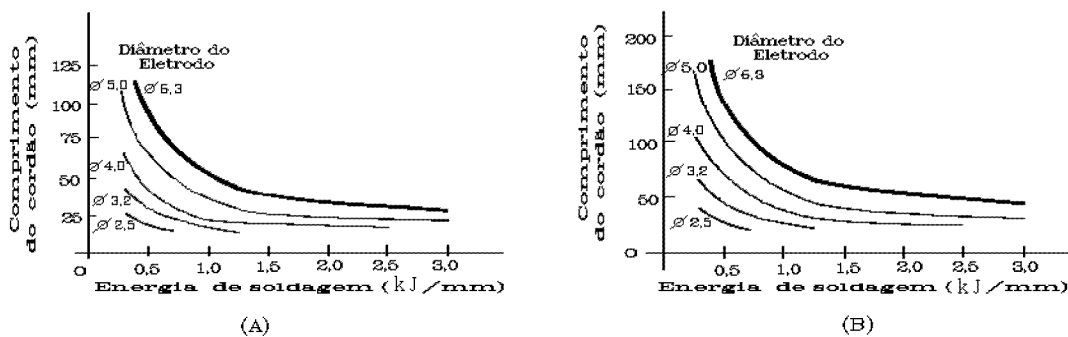


Figura 4.12-Comprimento do cordão de solda para cada 100 mm de eletrodo revestido fundido. Rendimento de Deposição: (A) 100-115%; (B) 150-165%.

resumidas nas **Tabs. 4.2** e **4.5**, respectivamente.

Por outro lado, a CC pode ser utilizada em qualquer classe e alguns de seus aspectos notáveis são:

- A queda de tensão nos cabos é mais elevada do que em CA;
- A estabilidade do arco em baixas correntes é melhor do que CA;
- O arco é mais facilmente iniciado do que com CA;
- A manutenção de um arco extremamente curto é mais fácil do que em CA;
- Há tendência de ocorrer “sopro magnético”, principalmente em estruturas massivas e altas correntes, sendo esse fenômeno praticamente inexistente em CA;
- É mais fácil soldar fora de posição do que com CA. Entretanto, soldadores habilidosos conseguem iguais resultados com ambos os tipos de corrente;
- A soldagem de chapas finas é mais facilmente realizada do que com CA;

Com relação à Polaridade, comparando o eletrodo conectado ao pólo negativo (CCEN) com o positivo (CCEP), têm-se:

- CCEN produz menor penetração do que CCEP;
- A taxa de deposição é maior em CCEN do que em CCEP;
- Praticamente, todos os eletrodos para aços podem soldar com CCEP, não sendo o caso, entretanto, para os metais não-ferrosos;

- Em CCEN há maior geração de calor no eletrodo do que na peça. Como conseqüência, ocorre menor distorção e a velocidade de soldagem é maior do que em CCEP;

- CCEN é indicada para chapas finas e juntas com distância de raiz excessiva;
- CCEP produz a maior penetração entre todos os três casos. Dessa forma é interessante utilizar esta polaridade para passes de raiz ou fora de posição.

Outrossim, quando soldando com CA, nota-se os seguintes fatos:

- A CA produz um arco menos estável do que em CC. A penetração e taxa de deposição são intermediárias entre CCEP e CCEN;
- Devido à reversão da tensão em cada ciclo (passando por zero) em CA, os revestimentos dos eletrodos são especialmente projetados para operar com este tipo de corrente, contendo maior proporção e específicos estabilizantes do arco para facilitar a re-ignição, do que aqueles para CC;
- Em CA há, em geral, maior produção de salpico que em CC.

Os eletrodos a serem utilizados em juntas com chanfro reto, ou naquelas que requerem rígido controle dimensional, devem ser aqueles que produzem maior penetração. Sobre chapas finas, entretanto, são preferíveis aqueles de pequena penetração. Por outro lado, sobre estruturas muito rígidas - pela forma, ou espessura das partes envolvidas - o eletrodo a ser especificado é aquele que produza metal de solda com máxima ductilidade.

□ Diâmetro do Eletrodo

A bitola escolhida deve ser a mais conveniente para um dado trabalho, pois esse fator exerce profunda influência sobre a economia da soldagem. As principais considerações se dirigem para: (a) Projeto da junta; (b) Número de passes; (c) Espessuras das camadas; (d) Posição da soldagem; (e) Energia de soldagem admissível (mínima e máxima); (f) Habilidade do soldador.

Praticamente, todas as classes de eletrodos podem ser utilizadas para soldagem multipasse, com cada bitola operando num dado intervalo de corrente. Para a soldagem nas posições vertical e sobrecabeça, as menores bitolas são escolhidas pois é, em geral, mais fácil manter e manejar uma pequena poça de fusão do que uma grande. Por outro lado, pode ser necessária a especificação de uma bitola ainda menor, para permitir que o arco alcance e funda a raiz de uma junta que possua nariz muito alto.

Geralmente existe uma dada relação entre a área da seção transversal de cada camada e a bitola do eletrodo utilizado. Para o primeiro passe, um valor inicial para essa área pode ser (em valor absoluto) igual a 7 vezes aquele da bitola do eletrodo, isto é, para um consumível com diâmetro de 4,0 mm, a área seria 28 mm², por exemplo. Para as camadas subsequentes, cada uma pode possuir uma área igual (em valor absoluto) a 10 vezes a bitola do eletrodo.

A seleção da bitola do eletrodo revestido poderá ser auxiliada pelos seguintes fatos:

- Nas soldas de tubulações, com completa fusão no passe de raiz, as bitolas devem ser de 3,2 ou 4,0 mm. Os passes seguintes podem utilizar bitolas de 4,0 ou 5,0 mm em todas as posições, sendo que na plana, bitolas de 5,0 mm ou maiores são empregadas.

- Na posição plana de juntas em duplo ou simples “V”, que possuam mata-junta, ou que possam ser goivadas, o primeiro passe pode utilizar bitola de 5,0 mm. Os passes restantes devem ser realizados com eletrodos de maiores diâmetros.

- Soldas em ângulo na posição plana utilizam, em geral, bitolas entre 5,0 e 6,3 mm, sendo possível o emprego de maiores diâmetros se o metal base for suficientemente espesso.

- Em soldas fora de posição em ângulo ou a topo, a maior bitola de uso prático é de 5,0 mm, sendo que o primeiro passe é depositado, em geral, com diâmetro de 4,0 mm.

- Os eletrodos tipo baixo hidrogênio são geralmente utilizados em bitolas de 3,2 e 4,0 mm para soldagem na posição vertical e sobrecabeça. Nas posições plana e horizontal, as bitolas utilizadas podem ser de 5,0 mm ou maiores.

CATEGORIAS ASME

É de muito interesse para a prática da soldagem, que também sejam utilizados outros critérios para a seleção do consumível, envolvendo fatores, entre outros, tais como posição de soldagem; taxa de deposição; penetração. Uma possível sistematização é aquela proposta pela ASME, podendo ser encontrado na Seção IX desse Código os eletrodos agrupados em categorias (“F-Numbers”), conforme mostrado na **Tab. 4.13** para aços ao carbono e baixa liga. Para uso geral, os eletrodos num mesmo F-nº possuem técnicas operacionais similares. Além disso, um melhor entendimento dessa terminologia implica na percepção de que a mesma identificação não somente o tipo de eletrodo mas, também, características da junta.

Portanto, o agrupamento destes eletrodos ocorre principalmente por suas propriedades operacionais intrínsecas, ou seja:

Tabela 4.13 - Categorias dos Eletrodos (“F-Numbers”) para Soldagem de Aços ao Carbono e Baixa Liga conforme a Seção IX do Código ASME

Categoria (“F-Number”)	Característica	Classificação (AWS)
F-1	Alta Taxa de Deposição	EXX19, EXX20, EXX24, EXX27, EXX28
F-2	Pequena/Média Penetração	EXXX2, EXX13, EXXX4
F-3	Alta Penetração	EXX10, EXX11
F-4	Baixo Hidrogênio	EXX15, EXX16, EXXX8

▪ Alta Taxa de Deposição (F1)

Os eletrodos que compõem essa categoria, são projetados para soldar em alta velocidade nas posições plana e horizontal. Existindo necessidade de vários passes, o primeiro deve ser depositado com maior volume sobre a chapa inferior, de acordo com a seqüência mostrada na Fig. 4.13.

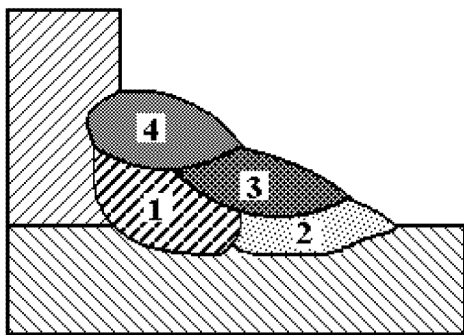


Figura 4.13 - Seqüência dos Passes para Eletrodos da Categoria ASME de Alta Taxa de Deposição.

Como o metal de solda possui relativamente baixa taxa de solidificação, esses eletrodos são recomendados para soldagem nas posições plana e horizontal, sendo desejável uma ligeira inclinação e sentido ascendente. Soldas que se enquadram nesse tipo, são aquelas em ângulo sobre chapas de espessuras igual ou superior a 6 mm.

A penetração é pequena, com cordão plano ou ligeiramente convexo. Na posição plana é utilizada a técnica do “arrasto”, com o revestimento do eletrodo se apoiando levemente sobre a chapa, num ângulo entre 60 a 80° com a mesma no sentido do deslocamento. A ponta do eletrodo é mantida alguns milímetros à frente da poça de fusão, com alta velocidade de soldagem, mas que permita perfeita proteção da escória. A corrente deve ser de 5 a 10 A acima da metade do intervalo recomendado e não exceder esse valor se a solda for inspecionada por Raios-X.

As soldas na posição horizontal de filetes e sobrepostas são realizadas com o eletrodo num ângulo de 45°, com a ponta do mesmo tocando as faces horizontal e vertical da junta.

▪ Pequena Penetração (F2)

Esses eletrodos possuem médias taxas de deposição e penetração, podendo soldar em todas as posições. Os mesmos adequam-se aos casos de soldas irregulares, ou curtas, cuja direção ou posição é alterada freqüentemente e juntas mal ajustadas. Os principais tipos de juntas e espessuras para

aplicação são: (a) Junta em ângulo, em todas as posições com espessura de até 2 mm; (b) Junta em ângulo na posição plana, com espessura entre 2 e 6 mm; (c) Junta a topo com chanfro reto em todas as posições, inclusive tubos na vertical descendente, com espessura de até 2 mm; (d) Junta a topo com chanfro reto, em todas as posições (com exceção da plana), inclusive tubos na vertical descendente, com espessura entre 2 e 6 mm.

▪ Grande Penetração (F3)

A alta penetração é a característica mais pronunciada desse grupo, mas o fato de ocorrer rápida solidificação da solda é muitíssimo importante.

Esses consumíveis são projetados de forma que o metal de solda solidifique rapidamente, sendo indicados principalmente para as posições vertical e sobrecabeça. Apesar da taxa de deposição não ser tão elevada quanto a de outros eletrodos, os mesmos podem operar na posição plana, exigindo habilidade do soldador.

As seguintes aplicações são usuais: (a) Junta em ângulo em todas as posições (com exceção da plana), com espessura entre 2 e 6 mm; (b) Junta em ângulo nas posições horizontal e sobrecabeça, com espessura superior a 6 mm; (c) Junta a topo, com chanfro reto em todas as posições, inclusive tubos na vertical ascendente, com espessura entre 2 e 6 mm; (d) Junta a topo, com chanfro em “V” em todas as posições, inclusive tubos na vertical ascendente e descendente, com espessura superior a 6 mm; (e) Junta a topo, inclusive tubos, com chanfro em “U” nas posições vertical descendente, com espessura acima de 6 mm.

A soldagem na posição vertical deve ser realizada com eletrodos de bitolas igual ou menor do que 5 mm. A posição vertical-ascendente é empregada com a corrente no limite inferior recomendado, na seqüência ilustrada na Fig. 4.14. O primeiro passe é realizado com um movimento da ponta do eletrodo (em geral denominado “tecimento” - veja mais adiante) do tipo “chicote” para soldas em ângulo (filete), ou “circular” para soldas a topo. Os passes restantes utilizam movimento com pausa nas bordas, para assegurar a penetração requerida e flutuação adequada da escória.

Nas soldas realizadas sobrecabeça, a bitola máxima do eletrodo deve ser de 5 mm e o tecimento similar ao recomendado para o primeiro passe da soldagem na vertical-ascendente. A posição plana requer que o eletrodo seja movido com velocidade suficientemente alta, de forma que sempre permaneça à frente da poça de fusão, sendo a

corrente fixada no valor médio. Sobre chapas finas em canto ou a topo, a peça deve ser posicionada num ângulo de 45° com a horizontal, sendo a velocidade de soldagem a maior possível no sentido descendente.

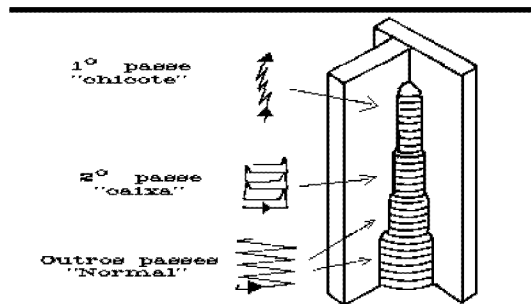


Figura 4.14-Soldagem na posição vertical-ascendente com eletrodos do tipo alta penetração (F3).

▪ Baixo Hidrogênio (F4)

A principal característica desses eletrodos, é depositar muito baixo ou baixo volume de hidrogênio no metal de solda, desde que devidamente ressecado. Em geral, esse eletrodos são utilizados sobre: (a) Junta em ângulo, nas posições horizontal, vertical-ascendente e sobrecabeça, com espessura entre 6 e 19 mm; (b) Junta em ângulo, em todas as posições (com exceção da vertical-descendente), com espessura superior a 19 mm; (c) Junta a topo chanfro em “V”, nas posições horizontal, vertical-ascendente e sobrecabeça, inclusive tubos na vertical ascendente, com espessura entre 6 e 19 mm; (d) Junta a topo chanfro em “V”, em todas as posições (com exceção da vertical descendente), inclusive tubos na vertical ascendente, com espessura superior a 19 mm; (e) Junta em “U” em todas as posições (com exceção da vertical descendente), inclusive tubos na vertical ascendente, com espessura superior a 6 mm.

OPERACIONALIZAÇÃO DO PROCESSO

VARIÁVEIS DE PROCEDIMENTO

O controle do processo e, conseqüentemente, a produtividade e a qualidade da junta soldada, é determinado, em grande parte, pelas variáveis de procedimento, as quais se dividem nos seguintes grupos:

□ Variáveis Pré-Selecionadas

São aquelas escolhidas antes de se começar a soldagem e não podem, em geral, ser alteradas após a mesma ter iniciado, contendo os seguintes itens:

▪ Tipo do Eletrodo

De acordo com os itens anteriores, a seleção da classe do eletrodo deve ser a mais conveniente possível para uma dada aplicação, pois a mesma decide, entre outras, as propriedades mecânicas; o rendimento de deposição; a penetração; a taxa de deposição e o perfil do cordão.

▪ Bitola do Eletrodo

Também analisado no item anterior, possuindo implicações, entre outras, sobre a taxa de fusão; intervalo de corrente; penetração; acesso à raiz da junta. Portanto, a sua escolha deve ser criteriosamente realizada.

▪ Tipo de Corrente

Dependendo do eletrodo selecionado, o tipo de corrente estará determinado. Existindo opção, deve ser lembrado que para uma mesma intensidade de corrente, a CCEP oferece maior penetração, mas menor taxa de deposição, sendo essas propriedades inversas quando se utiliza CCEN e intermediárias com CA.

□ Variáveis Ajustáveis Primárias

São os parâmetros corrente; tensão e velocidade de soldagem, os quais controlam, entre outros, a energia de soldagem; a geometria do cordão, incluindo a penetração e, parcialmente, a sanidade da junta soldada. Os mesmos são ajustados dependendo do tipo da junta e das variáveis Pré-Selecionadas mas, em geral, operam num amplo intervalo.

A corrente é diretamente proporcional à penetração e taxa de deposição. Ultrapassada a intensidade conveniente para uma dada operação, são provocados defeitos na junta, tais como salpico; mordedura e cordão com geometria irregular. Por outro lado, insuficiente intensidade da corrente pode não gerar energia capaz de fundir a junta; causar penetração incompleta e/ou instabilizar o arco.

O aumento da velocidade de soldagem, com

os outros parâmetros mantidos constantes, reduz a massa de metal de solda por unidade de comprimento do cordão e aumenta a penetração até um máximo, à partir do qual a mesma diminui e se produz um cordão com geometria irregular. Por outro lado, uma velocidade de soldagem muito baixa provoca mordedura e sobreposição do metal de solda.

Nesse processo, para um dado consumível, a tensão é diretamente proporcional ao comprimento do arco. Maior tensão provoca um cordão mais largo e chato, com seu excesso resultando numa solda irregular e contato do ar da atmosfera com o metal fundido, fato altamente indesejável.

□ Variáveis Ajustáveis Secundárias

São itens mais difíceis de serem quantificados, pois incluem os ângulos de trabalho e de deslocamento, além das técnicas de movimento da extremidade do eletrodo (“tecimento”).

Os ângulos do consumível com relação à linha da solda estão mostrados nas **Figs. 4.15(a,b)**, para juntas a topo e filete, respectivamente. Esses ângulos influenciam a facilidade com que o consumível é depositado; a uniformidade da fusão do mesmo e a geometria do cordão, sendo que o correto posicionamento do eletrodo previne uma série de defeitos na junta soldada, causados por erros de operação. Como ilustrado nessa figura, o ângulo de deslocamento é aquele que o eletrodo mantém, no ponto do arco, com uma linha imaginária do plano de deslocamento, o qual é ortogonal à superfície do cordão de solda e contém seu

eixo. Por sua vez, o ângulo de trabalho é definido como aquele existente entre o eletrodo, no ponto do arco, e uma linha imaginária pertencente ao plano de trabalho, o qual é ortogonal e transversal ao eixo do cordão de solda.

Por outro lado, na **Tab. 4.14** são apresentados típicos ângulos de deslocamento e de trabalho para juntas a topo e de filete e diferentes tipos de eletrodos revestidos. O ângulo negativo indica inclinação contrária do consumível (está “empurrando”), ou que o mesmo ultrapassou a vertical.

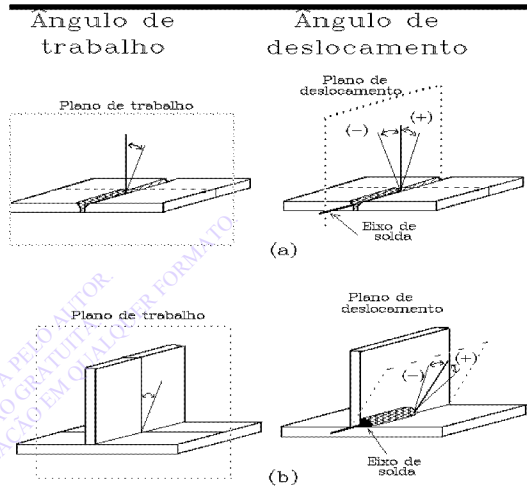


Figura 4.15-Ângulos de trabalho e de deslocamento para juntas a topo (a) e de filete (b).

Tabela 4.14 - Ângulos Típicos de Operação para os Eletrodos Revestidos

Tipo do Eletrodo	Tipo da Junta	Posição de Soldagem - Ângulos em (°)							
		Plana		Horizontal		Vertical		Sobrecabeça	
		D	T	D	T	D	T	D	T
Celulósico	Topo	30 a 20	90	30 a 20	60 a -20	0 a -20	90	20 a 10	90
	Filete	20 a 10	0	20 a 10	40 a 20	0 a -20	0	20 a 10	70 a 60
Rutilico	Topo	30 a 20	90	30 a 20	60 a -20	0 a -20	90	20 a 10	90
	Filete	20 a 10	0	20 a 10	40 a 20	-20	0	20 a 10	70 a 60
Rutilico c/ Pó de Ferro	Topo	40 a 30	90	40 a 30	70 a -20	30 a 10	90	30 a 20	90
	Filete	30 a 20	0	30 a 20	55 a 45	30 a 10	0	30 a 20	45 a 40
Básico	Topo	30 a 20	90	40 a 20	60 a -20	20 a 10	90	20 a 10	90
	Filete	30 a 20	0	20 a 10	0	20 a 10	40 a 30	30 a 20	60 a 50

Nota: D= Ângulo de deslocamento; T= Ângulo de Trabalho

MANIPULAÇÃO DO ELETRODO (“TECIMENTO”)

O movimento da extremidade do eletrodo revestido (“tecimento”) depende, dentre outros fatores, do tipo e dimensões da junta; posição de soldagem; classe e bitola do eletrodo e, em grande parte, preferência pessoal do soldador. Não existem regras fixas, ou justificativas teóricas que determinam qual o tecimento que deve ser empregado numa dada situação de soldagem. Entretanto, uma vez selecionada a intensidade da corrente, a energia de soldagem será mantida principalmente pela velocidade de deslocamento. Sob a ótica do soldador, essa energia é ditada pelo tamanho da solda (perna ou garganta); pelo número de cordões de solda em cada passe e por quantas camadas serão depositadas. O tecimento, além de influenciar parcialmente a velocidade de soldagem, afeta a geometria do cordão de solda; a penetração e a ocorrência de defeitos na junta, tais como mordedura; inclusão de escória; porosidade; sobreposição e falta de fusão.

As **Figs. 4.16(a-f)** ilustram alguns dos mais populares tipos de tecimentos. O “circular” é mais empregado para o passe de raiz em juntas, mas não para revestimento protetor; aquele em “oito” encontra aplicação em passes largos, principalmente os de enchimento; o “caixa” e “T” são geralmente utilizados em juntas na posição vertical (ascendente).

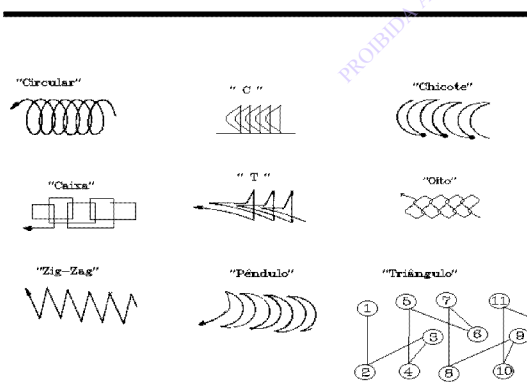


Figura 4.16 - Alguns tipos de tecimentos utilizados na soldagem com eletrodo revestido (vide texto).

Os demais tecimentos podem ser empregados, entre outros, nos seguintes casos:

- **“Triângulo”**: (a) Passes subseqüentes ao de raiz na posição vertical (3F)-ascendente de filete, ou parte externa de junta em quina; ou junta a topo

“V-com nariz” (3G), com eletrodos E6010 ou E6011.

- **“Zig-Zag”**: Um dos tecimentos mais populares, é geralmente empregado tanto na soldagem de juntas, quanto de revestimento protetor. Algumas aplicações são: (a) Passe de raiz na posição vertical (3F)-ascendente de junta sobreposta, com eletrodo E7018; (b) Passes subseqüentes ao de raiz na posição vertical (3G)-ascendente de junta a topo com cobre-junta, com eletrodo E7018; (c) Passes subseqüentes ao de raiz na parte externa de junta em quina; ou junta a topo “V-com nariz” na posição vertical (3G)-ascendente, com eletrodo E6010 ou E6011; (d) Passes subseqüentes ao de raiz em junta a topo “V-com nariz”, na posição vertical (3G)-descendente, com eletrodo E7018.

- **“C”**: (a) Passes de revestimento; (b) Passes em junta em “V-simples” na posição horizontal (2G), com eletrodos E6010 ou E6011; (c) Passes subseqüentes ao de raiz na posição vertical (3F)-ascendente de junta sobreposta, com eletrodo E6010 ou E6011; (c) Juntas de filete, ou a topo “V-simples” na posição sobrecabeça (4F), com eletrodos E6010, ou E6011, ou E7018.

- **“Pêndulo”**: (a) Passe de cobertura (último) em junta de filete na posição plana; ou passes subseqüentes ao de raiz na posição vertical (3F)-ascendente de junta de filete, com eletrodo E7018; (b) Passes subseqüentes ao de raiz na parte externa de junta em quina na na posição vertical (3G)-descendente, com eletrodo E6010 ou E6011.

- **“Chicote”**: Em geral, esse tecimento pode ser empregado em duas situações distintas: na primeira, o avanço do eletrodo é cerca de 8 mm além da poça de fusão, recuando em torno de 5 mm, com o arco sendo mantido constante, resultando numa poça de fusão que permanece mais tempo fluida, com boa penetração e acabamento; na segunda - utilizada para soldagem nas posições vertical e sobrecabeça - o eletrodo avança cerca de 10 mm, com o comprimento do arco aumentando nesse movimento, e recua 6 mm, resultando numa poça de fusão que solidifica mais rapidamente e com menor penetração. Algumas aplicações podem ser: (a) Passe de raiz na parte externa de junta em quina na posição plana (1G) com eletrodo E6010 ou E6011; (b) Passe de raiz em filete; ou junta sobreposta; ou junta em “V-com nariz”, ou parte externa de junta em quina na posição vertical (3F)-ascendente, com eletrodo E6010 ou

E6011.

Algumas situações típicas são as seguintes:

□ Tubos, junta na posição 2G (horizontal, eixo do tubo na vertical)

Os eletrodos podem ser da classe E6010 ou E6011. Conforme exibido nas **Figs. 4.17(a,b)**, os ângulos de trabalho e de deslocamento devem permanecer entre 5 e 10°. A solda é iniciada com um furo controlado, logo após sendo realizada com tecimento tipo “chicote”. A seqüência dos passes está ilustrada na **Fig. 4.17(c)**, com o segundo passe largo o suficiente para cobrir totalmente o de raiz. Os passes subsequentes são soldados de forma similar à chapas na posição horizontal, ou seja, com tecimento em “C”.

□ Tubos, junta na posição 6G (eixo do tubo inclinado 45°)

Essa solda pode ser realizada com diferentes números de passes e camadas. Os ângulos de deslocamento e de trabalho estão ilustrados na **Fig. 4.18(a,b)**, respectivamente, sendo empregados os seguintes procedimentos:

▪ Soldagem com 4 passes e 3 camadas

O passe de raiz é realizado com eletrodos classe E6010 ou E6011, iniciando na posição 12:30 h e se deslocando pelo lado 1, com ângulo de deslocamento de 20 a 30°, sem tecimento. Quando for alcançada a posição 6 h, o arco deve ser interrompido. Após a limpeza da escória, a solda é novamente iniciada em 12:30 h, com o deslocamento pelo lado 2 se realizando até encontrar cordão anterior. O segundo passe pode ser realizado com eletrodo classe E7018, iniciando em torno da posição 5:30 h e terminando em 12:00 h pelo lado 2, com um

leve movimento lateral (não usar “chicote”) e ângulo de deslocamento negativo entre 0 e 10°. Esse cordão é completado no lado 1 da mesma forma e iniciando em 5:30 h. O terceiro e quarto passes são realizados de maneira idêntica e a seqüência de deposição está mostrada na **Fig. 4.18(c)**.

▪ Soldagem com 7 passes e 4 camadas

São utilizados somente os eletrodos E6010 ou E6011. Todos os passes iniciam na posição 12:30 h e prosseguem até 6:00 h, em ambos os lados, alternadamente. O ângulo de trabalho se situa entre 0 e 10°, enquanto que o deslocamento é de 20 a 30°, com a seqüência dos passes apresentada na **Fig. 4.18(d)**.

□ Conexão de tubos, com chanfro de 45° no secundário

O eletrodo pode ser classe E6010 ou E6011. O passe de raiz emprega bitola de 3,2 mm e, conforme ilustrado na **Fig. 4.19(a)**, a soldagem deve iniciar em torno da posição 6:00 h e progredir até 12:00 h, com tecimento em “chicote” ou “C”, de forma que o eletrodo “ataque” (o arco seja dirigido contra) o tubo secundário entre 6:00 h e 3:00 h e o tubo principal entre 3:00 h e 12:00 h.

O outro lado deve ser soldado de maneira similar, iniciando em 6:00 h. Os passes subsequentes são realizados com eletrodos de bitola 4,0 mm em tecimento em “C”, na mesma progressão do passe de raiz.

É muito importante que: (a) Nos passes depositados na metade inferior do tubo secundário, o ataque seja realizado contra o mesmo; (b) O ataque seja realizado contra o tubo principal, nos passes depositados na metade superior do tubo secundário. A seqüência de deposição dos passes é exibida na **Fig. 4.19(b)**.

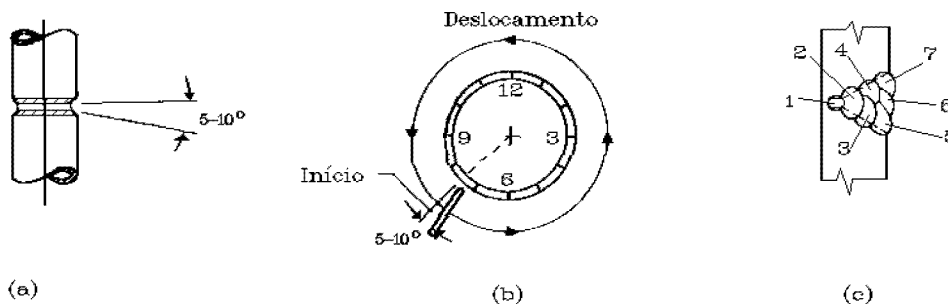


Figura 4.17 - Soldagem de tubos na posição 2G: (a) Ângulo de trabalho; (b) Ângulo de deslocamento; (c) Seqüência de deposição.

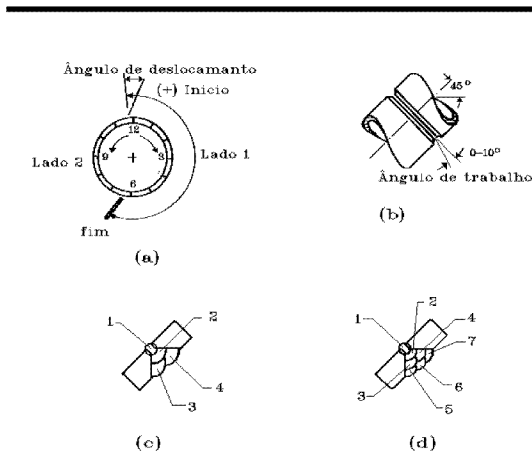


Figura 4.18 - Soldagem de tubos na posição 6G: (a,b) Ângulos de deslocamento e de trabalho, respectivamente; (c) Com 4 passes e 3 camadas; (d) Com 7 passes e 4 camadas.

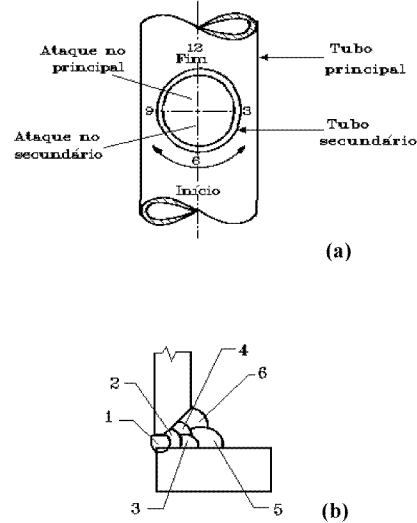


Figura 4.19 - Soldagem de conexão de tubo com chanfro de 45° no secundário: (a) Progressão da solda; (b) Seqüência de deposição dos passes.

PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

No Capítulo 1 foram exibidos os tipos de juntas e chanfros existentes, os quais, em conjunto com o procedimento de soldagem adotado são função, no mínimo, dos seguintes itens: (a) Processo de soldagem; (b) Espessura e tipo do material; (c) Projeto da estrutura; (d) Acesso disponível; (e) Considerações metalúrgicas, ambientais e de serviço; (e) Especificação que está sendo seguida.

Foge do escopo desse livro analisar aspectos metalúrgicos e de dimensionamento do cordão de solda (isso será abordado em outro livro dessa série). Entretanto, a seguir serão salientadas diversas questões operacionais que devem ser resolvidas antes da soldagem se realizar.

A primeira providência requer, que se certifique ser o eletrodo revestido o mais conveniente para a soldagem da junta analisada. Caso existam outros processos tecnicamente aceitáveis, os custos para a produção de todas as juntas similares devem ser confrontados e, logicamente, escolhido aquele que for mais econômico. Apesar desse ponto ser melhor analisado no Capítulo 20, deve-se salientar aqui, que apesar de um dado consumível apresentar menor preço, isso não significa, necessariamente, ser de menor custo a soldagem realizada com o mesmo.

A menor espessura geralmente soldada a topo

com eletrodo revestido é de 1,5 mm, mas exige um soldador hábil e, via de regra, esse não é o processo mais indicado. Por sua vez, o limite máximo de espessura do metal base para se utilizar a soldagem manual, é decidido pelo custo comparativo com outros processos e constrangimentos tecnológicos específicos.

Por outro lado, durante a fase do projeto da estrutura deve ser previsto acesso para a soldagem das juntas. Em situações críticas, ou nas quais existam dúvidas, é necessário que se realize simulações para avaliar a viabilidade do proposto.

Conhecendo o intervalo admissível da energia de soldagem, a próxima etapa é definir os tipos de junta e chanfro mais convenientes, além da seqüência de deposição dos passes e número de camadas. Essas questões foram satisfatoriamente resolvidas de forma empírica, sendo que nas **Figs. 4.20** e **4.21** estão exibidas sugestões para juntas a topo e em ângulo, respectivamente. Nesse caso, os consumíveis apresentados são para aço ao carbono, mas outros materiais base podem ser soldados empregando os mesmos princípios aqui expressos.

A seguir, detalha-se o procedimento de soldagem. Nas **Tab. 4.15** à **4.35** são apresentadas sugestões para juntas a topo, de aço ao carbono em espessuras de 3 a 25 mm, com os tipos de juntas mencionados sobre as mesmas sendo aqueles ilus-

trados na Fig. 4.22.

Por outro lado, as **Tabs. 4.36 à 4.40** exibem procedimentos de soldagem para juntas em ângulo de aço ao carbono, com “pernas” (“tamanho” da solda) variando entre 5 e 25 mm.

Com relativamente pequenas modificações, outros materiais base também podem empregar os procedimentos aqui descritos. Além disso, é importante se frizar que os procedimentos sugeridos não são inflexíveis e nem os únicos possíveis para um dado material e espessura. Experiências preliminares sempre devem ser realizadas e grande atenção prestada a detalhes simples, mas muito importantes, tais como limpeza da junta antes da soldagem e completa retirada da escória entre os

passes.

Outrossim, nas tabelas mencionadas são apresentados, para cada espessura da junta ou tamanho da perna, as opções de eletrodos; os parâmetros de soldagem e dois importantes fatores da economia do processo, os quais são a massa do metal de solda depositado e o tempo total de arco, ambos por unidade de comprimento do cordão. Esse último item deve ser interpretado, como o tempo em que o soldador está realmente soldando, não incluindo qualquer outra operação. Em soldagem denomina-se “fator de operação”, à razão entre esse tempo e o tempo total para a realização da solda, o qual, com eletrodos revestidos, geralmente não ultrapassa 30%.











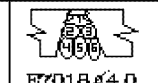


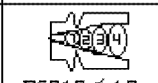




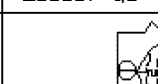
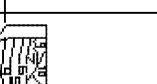


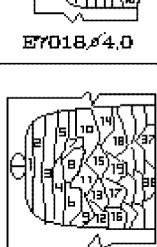
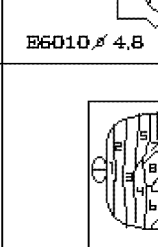
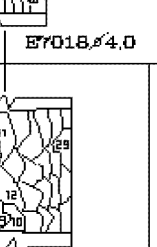

Espessura do Material Base (mm)	Posição da Soldagem, seqüência de Deposição, Classe (AWS) e Diâmetro (mm) do Eletrodo Revestido				
	Plana (1G)	Horizontal (2G)	Vertical Ascendente (3G)	Vertical Descendente (3G)	Sobrecabeça (4G)
3,2	E6010, ϕ 2,4	E6010, E6012 ϕ 2,4	E6010, E6012 ϕ 2,4	E6014, E6013 ϕ 2,4	E6014, E6013 ϕ 2,4
4,8	E6010 ϕ 3,2	E6010, E6012 ϕ 3,2	E6010, E6012 ϕ 3,2	E6014, E6013 ϕ 3,2	E6014, E6013 ϕ 3,2
6,4	E6010 ϕ 4,0	E6010, E6012 ϕ 4,0	E6010, E6012 ϕ 4,0	E6014, E6013 ϕ 4,0	E6014, E6013 ϕ 4,0
	 (Todas as Posições)				
6,4 à 9,5	 Selagem E6010 ϕ 4,8	 E6010 ϕ 4,8 ou E7018, ϕ 4,0	 E6010 ϕ 4,0	 E7018, ϕ 4,0	 E7018, ϕ 4,0
9,5 à 12,7	 E6010 ϕ 4,8	 E6010 ϕ 4,8 ou E7018, ϕ 4,0	 E6010 ϕ 4,0	 E7018, ϕ 4,0	 E7018, ϕ 4,0
12,7 à 15,9	 E6010 ϕ 4,8	 E6010 ϕ 4,8 ou E7018, ϕ 4,0	 E6010 ϕ 4,0	 E7018, ϕ 4,0	 E7018, ϕ 4,0
15,9 à 25,4	 Selagem E7018, ϕ 6,4	 E7018, ϕ 4,0	 E6010, ϕ 4,8	 E7018, ϕ 4,0	 E7018, ϕ 4,0
25,4 à 50,8 (e acima)	 E7018, ϕ 6,4	 E7018, ϕ 4,0	 E6010, ϕ 4,8	 E7018, ϕ 4,0	 E7018, ϕ 4,0

Figura 4.20 - Tipo de junta, seqüência de deposição e eletrodos revestidos sugeridos para soldas a topo.

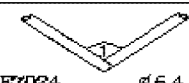
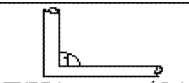
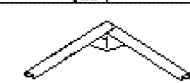
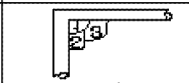



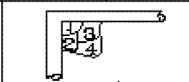




Tamanho da Perna do Filete (mm)	Posição de Soldagem, seqüência da deposição, classe (AWS) e diâmetro (mm) do Eletrodo revestido			
	Plana (1F)	Horizontal (2F)	Vertical Ascendente (3F)	Sobrecabeça (4F)
6,4	 E7024 ϕ 6,4	 E7024 ϕ 6,4	 E7018 ϕ 4,0	 E8010 ϕ 4,8 / E7018 ϕ 4,0
12,7	 E7024 ϕ 6,4	 E7024 ϕ 6,4	 E7018 ϕ 4,0	 E8010 ϕ 4,8 / E7018 ϕ 4,0
19	 E7024 ϕ 6,4	 E7024 ϕ 6,4	 E7018 ϕ 4,0	 E8010 ϕ 4,8 / E7018 ϕ 4,0

Figura 4.21 - Tipos de eletrodos e seqüência de deposição dos passes para soldas de filete com diferentes pernas.

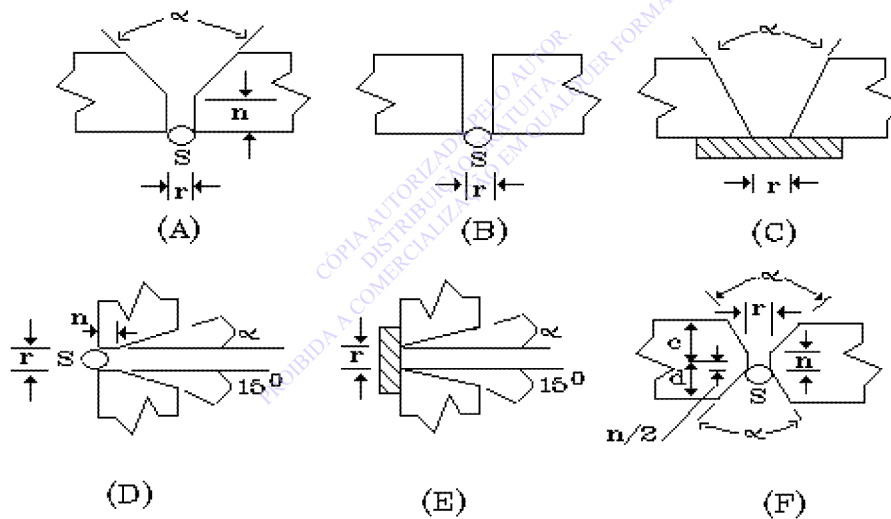


Figura 4.22 - Tipos de Juntas referidos nas Tabelas para Procedimentos de Soldagem.

Tabela 4.15 - Soldagem com Eletrodo Revestido (Junta a Topo - Posição Plana - Espessura 3 mm)

Classe (AWS)	Junta (a/r/n/c/d)*	Passe	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passe (mm/s)	Metal de Adição (Total - kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
E6011	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	80	3,3	0,08	5,05
	B(1)	1	3,2	80	6,8	0,04	7,83
		1S	3,2	95	3,1	0,10 (0,14)	
	C(30/3)	1	4,0	145	3,5	0,13	4,76
E6012 ou E6013	A(60/1,6/1)	1	3,2	110	2,7	0,09	6,17
	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	110	3,3	0,07	12
		1S	3,2	110	2,4	0,10 (0,17)	
C(30/6)	1 e 2	4,0	180	3,8	0,21	8,77	
E7014	A(60/1,6/1)	1	3,2	130	4,7	0,09	3,55
	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	130	5,7	0,07	6,33
		1S	3,2	150	4,5	0,11 (0,18)	
	C(60/6)	1	3,2	150	11,8	0,04	5,30
		2	4,0	220	4,3	0,20 (0,24)	
E7024	A(60/1,6/1)	1	3,2	125	5,8	0,09	2,87
	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	125	7,0	0,07	6,26
		1S	3,2	150	4,3	0,15 (0,22)	
	C(60/3)	1	3,2	150	4,0	0,16	4,17
E7016	A(60/1,6/1)	1	3,2	110	3,1	0,09	5,38
	B(1,6)	1	3,2	110	5,3	0,05	8,05
		1S	3,2	120	3,4	0,09 (0,14)	
E7016	C(60/3)	1	3,2	125	3,6	0,09	6,85
		2	4,0	175	7,5	0,07 (0,16)	
E7018	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	100	3,1	0,09	5,37
	B(1,6)	1	3,2	115	6,5	0,05	6,27
		1S	3,2	130	4,5	0,09 (0,14)	
	C(60/3)	1	3,2	130	4,4	0,09	5,49
		2	4,0	190	9,8	0,07 (0,16)	

* Referente à Fig. 4.22.

Tabela 4.16 - Soldagem com Eletrodo Revestido (Junta a Topo - Posição Horizontal - Espessura 3 mm)

Classe (AWS)	Junta (a/r/n/c/d)*	Passe	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passe (mm/s)	Metal de Adição (Total - kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
E6011	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	80	3,8	0,08	4,38
	A(60/1/1,6)	1	4,0	120	6,7	0,06	8,44
		IS	3,2	80	2,8	0,10(0,16)	
	C(60/3)	1	4,0	120	2,5	0,16	6,67
E6012 ou E6013	A(60/1,6/1)	1	3,2	120	3,0	0,09	5,55
	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	120	3,6	0,07	11,57
		IS	3,2	120	2,4	0,11(0,18)	
	C(30/4)	1	3,2	110	1,5	0,15	11,11
E7014	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	120	4,8	0,08	3,47
	A(60/1/1,6)	1	3,2	150	8,9	0,06	7,25
		IS	3,2	120	3,1	0,11(0,17)	
	C(60/3)	1	3,2	150	5,6	0,09	4,55
		2	4,0	190	10,6	0,07(0,16)	
E7016	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	110	4,0	0,08	4,17
	A(60/1/1,6)	1	3,2	110	5,2	0,06	7,97
		IS	3,2	110	3,5	0,09(0,15)	
	C(60/3)	1	3,2	110	3,3	0,09	7,4
		2	4,0	170	7,1	0,07(0,16)	
E7018	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	105	4,5	0,08	3,7
	A(60/1/1,6)	1	3,2	110	6,3	0,06	7,15
		IS	3,2	110	3,7	0,10(0,16)	
	C(60/3)	1	3,2	120	4,4	0,09	5,56
		2	4,0	180	9,4	0,07(0,16)	

* Referente à Fig.4.22.

Tabela 4.17 - Soldagem com Eletrodo Revestido (Junta a Topo - Posição Vertical Ascendente - Espessura 3 mm)

Classe (AWS)	Junta (a/r/n/c/d)*	Passe	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passe (mm/s)	Metal de Adição (Total - kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
E6011	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	100	4,5	0,08	3,70
	A(60/1/1,6)	1	3,2	100	5,9	0,06	8,57
		IS	3,2	80	2,9	0,10(0,16)	
	C(60/3)	1	3,2	100	9,7	0,04	8,66
		2	3,2	80	2,4	0,12(0,16)	
E6012	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	110	3,1	0,08	5,38
E6013	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	110	3,3	0,07	12,99
		IS	3,2	110	2,1	0,12(0,19)	
	C(60/3)	1	3,2	110	1,5	0,16	11,11
E7014	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	120	4,8	0,08	3,47
	A(60/1/1,6)	1	3,2	120	6,2	0,06	8,06
		IS	3,2	120	3,1	0,11(0,17)	
	C(60/3)	1	3,2	120	2,3	0,16	7,25
E7016	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	110	4,5	0,08	3,70
	B(1,6)	1	3,2	110	6,6	0,05	8,08
		IS	3,2	110	3,0	0,11(0,16)	
	C(60/3)	1	3,2	110	2,2	0,16	7,57
E7018	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	110	4,8	0,08	3,47
		B(1,6)	1	3,2	110	7,0	
	IS	3,2	110	2,8	0,13(0,18)	8,33	
		C(60/3)	1	3,2	110		2,3

* Referente à Fig.4.22.

Tabela 4.18 - Soldagem com Eletrodo Revestido (Junta a Topo - Posição Vertical Descendente - Espessura 3 mm)

Classe (AWS)	Junta (a/r/n/c/d)*	Passe	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passe (mm/s)	Metal de Adição (Total - kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
E7016	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	140	5,3	0,08	3,14
		1	3,2	140	5,6	0,07	7,88
		IS	3,2	140	3,4	0,12 (0,19)	
		1	4,0	170	6,9	0,07	
		IS	4,0	170	4,2	0,12 (0,19)	6,38
	C(60/30)	1	3,2	140	4,5	0,09	5,92
		2	4,0	170	7,5	0,07 (0,16)	
		1	4,0	170	3,1	0,16	5,37

* Referente à Fig.4.22.

Tabela 4.19 - Soldagem com Eletrodo Revestido (Junta a Topo - Posição Sobrecabeça - Espessura 3 mm)

Classe (AWS)	Junta (a/r/n/c/d)*	Passe	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passe (mm/s)	Metal de Adição (Total - kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
E6011	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	80	3,3	0,08	5,05
	C(60/3)	1 e 2	3,2	80	3,2	0,16	10,42
E6012 ou E6013	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	110	3,1	0,08	5,37
	C(50/3)	1 e 2	3,2	110	3,0	0,16	11,11
E7014	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	120	4,8	0,08	3,47
	C(60/3)	1	3,2	120	2,3	0,16	7,25
E7016	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	120	3,4	0,08	4,90
	C(60/3)	1 e 2	3,2	120	3,2	0,16	10,42
E7018	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	110	4,6	0,08	3,62
		1	3,2	110	3,8	0,09	6,64
	2	4,0	150	7,4	0,07 (0,16)		

* Referente à Fig.4.22.

Tabela 4.20 - Eletrodo Revestido (Junta a Topo - Posição Plana - Espessura 6 mm)

Classe (AWS)	Junta (a/r/n/c/d)*	Passo	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passo (mm/s)	Metal de Adição (Total - kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
E6011	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	80	1,9	0,13	11,8
		2	4,0	145	5,5	0,08 (0,21)	
	C(30/3)	1e2	4,0	145	4,6	0,18	12,62
		IS	3,2	95	3,1	0,10 (0,28)	
		1e2	4,0	145	3,2	0,26	
E6012 ou E6013	A(60/1,6/1)	1	3,2	110	1,9	0,13	13,28
		2	4,0	180	3,7	0,11 (0,24)	
E6013	A(60/1/1,6)	1	5,0	210	2,6	0,18	16,83
		IS	3,2	110	1,6	0,15 (0,33)	
	C(30/6)	1e2	4,0	180	4,0	0,20	15,91
		3	5,0	210	2,2	0,22 (0,42)	
		1e2	5	210	2,2	0,42	
E7014	A(60/1,6/1)	1	3,2	130	3,3	0,13	7,16
		2	4,0	220	7,9	0,11 (0,24)	
	A(60/1,6/1,6)	1	4,0	220	4,1	0,21	7,77
		IS	3,2	150	4,5	0,11 (0,32)	
	C(30/6)	1	3,2	150	11,8	0,04	9,13
		2	4,0	220	5,0	0,17	
3		5,0	285	3,8	0,31 (0,52)		
E7024	A(60/1,6/1)	1	3,2	125	4,0	0,13	6,20
		2	4,0	200	8,2	0,11 (0,24)	
	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	125	3,9	0,13	9,61
		2	4,0	200	11,4	0,08	
		IS	3,2	150	4,3	0,15 (0,36)	
	C(60/3)	1	3,2	150	3,4	0,19	8,37
2		4,0	200	4,8	0,19 (0,38)		
E7016	A(60/1,6/1)	1	3,2	110	2,2	0,13	11,30
		2	4,0	175	4,5	0,11 (0,24)	
	A(1,6/1,6)	1	3,2	110	3,1	0,09	10,11
		IS	3,2	120	3,4	0,09 (0,18)	
	C(60/3)	1	3,2	125	3,6	0,09	13,89
2e3	4,0	175	3,6	0,28 (0,37)			
C(30/8)	1e2	5,0	215	2,4	0,53	13,88	
E7018	A(60/1,6/1)	1	3,2	100	2,2	0,13	10,35
		2	4,0	190	6,0	0,11 (0,24)	
	A(60/1/1,6)	1	5,0	190	3,5	0,18	8,46
		IS	3,2	130	4,5	0,09 (0,27)	
	C(60/3)	1	3,2	130	4,4	0,09	11,03
		2e3	4,0	190	4,6	0,28 (0,37)	
	C(30/8)	1e2	5,0	250	3,4	0,53	9,80

* Referente à Fig.4.22.

Tabela 4.21 - Eletrodo Revestido (Junta a Topo - Posição Horizontal - Espessura 6 mm)

Classe (AWS)	Junta (a/r/n/c/d)*	Passe	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passe (mm/s)	Metal de Adição (Total - kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
E6011	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	80	2,2	0,13	10,98
		2	4,0	120	4,9	0,08 (0,21)	
	A(60/1/1,6)	1	4,0	120	2,1	0,12	13,89
E6012 ou 6013	A(60/1,6/1)	IS	3,2	80	2,8	0,10 (0,22)	16,67
		C(60/3)	1 a 3	4,0	120	3,0	
	A(60/1,6/1,6)	1 e 2	3,2	120	2,0	0,25	16,67
E7014	A(60/1,6/1,6)	IS	3,2	120	2,4	0,21	20,83
		IS	3,2	120	2,4	0,11 (0,32)	
	C(30/4)	1 a 3	3,2	110	2,4	0,31	20,83
E7016	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	120	2,7	0,13	8,00
		2	4,0	190	9,1	0,08 (0,21)	
	A(60/1/1,6)	1	3,2	150	3,9	0,13	10,90
	2	4,0	190	13,3	0,05		
	IS	3,2	120	3,1	0,11 (0,29)		
C(60/3)	1	3,2	150	5,6	0,09	9,39	
2 e 3	4,0	190	5,2	0,28 (0,37)			
E7018	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	110	2,3	0,13	9,98
		2	4,0	170	6,1	0,08 (0,21)	
	A(60/1/1,6)	1	4,0	170	2,6	0,18	11,17
	IS	3,2	110	3,5	0,09 (0,27)		
	C(60/3)	1	3,2	110	3,3	0,09	
2 e 3	4,0	170	3,4	0,28 (0,37)	14,85		
E7018	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	105	2,6	0,13	8,49
		2	4,0	180	8,0	0,08 (0,28)	
	A(60/1/1,6)	1	4,0	145	3,7	0,13	10,33
	2	4,0	180	12,6	0,05		
	IS	3,2	110	3,7	0,10 (0,28)		
	C(60/3)	1	3,2	120	4,4	0,09	11,36
2 e 3	4,0	180	4,4	0,28 (0,37)			

* Referente à Fig. 4.22.

Tabela 4.22 - Eletrodo Revestido - Junta a Topo - Posição Vertical Ascendente - Espessura 6 mm

Classe (AWS)	Junta (a/r/n/c/d)*	Passe	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passe (mm/s)	Metal de Adição (Total - kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
E6011	A(60/1,6/1,6)	1 a 3	3,2	100	4,5	0,22	11,11
		1 e 2	3,2	100	3,6	0,18	15,00
	IR	3,2	80	2,9	0,10(0,28)		
	C(60/3)	1	3,2	100	9,7	0,04	20,24
2		3,2	80	0,9	0,34(0,38)		
E6012 ou E6013	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	110	1,1	0,22	15,15
		IS	3,2	110	2,1	0,12(0,33)	23,09
E7014	A(60/1,6/1,6)	1 e 2	3,2	110	1,2	0,37	27,78
		1	4,0	140	0,8	0,37	20,83
		IS	3,2	120	3,1	0,11(0,29)	13,71
E7016	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	110	1,5	0,22	11,11
		IS	3,2	110	3,0	0,11(0,29)	14,33
		1 e 2	3,2	110	1,8	0,37	18,52
E7018	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	110	1,6	0,22	10,42
		IS	3,2	110	2,8	0,13(0,31)	14,28
		1 e 2	3,2	110	2	0,37	16,67

* Referente à Fig. 4.22.

Tabela 4.23 - Eletrodo Revestido (Junta a Topo - Posição Vertical Descendente - Espessura 6 mm)

Classe (AWS)	Junta (a/r/n/c/d)*	Passe	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passe (mm/s)	Metal de Adição (Total - kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
E7016	A(60/1,6/1,6)	1	3,0	140	3,0	0,13	8,16
		2	6,4	170	6,4	0,08(0,21)	
		IS	4,3	170	4,3	0,12(0,33)	10,82
	C(60/3)	1	2,4	170	2,4	0,21	13,05
		IS	4,3	170	4,3	0,12(0,33)	
		1	4,4	140	4,4	0,09	
		2 e 3	3,6	170	3,6	0,28(0,37)	
1 a 3	3,9	170	3,9	0,37	12,82		

* Referente à Fig. 4.22.

Tabela 4.24 - Eletrodo Revestido (Junta a Topo - Posição Sobrecabeça - Espessura 6 mm)

Classe (AWS)	Junta (a/r/n/c/d)*	Passe	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passe(mm/s)	Metal de Adição (Total - kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
E6011	A(60/1,6/1,6)	1 e 2	3,2	80	2,2	0,22	15,15
	C(60/3)	1 e 2	3,2	80	2,8	0,19	21,71
		3 e 4	4,0	110	3,4	0,19 (0,38)	
E6012 ou E6013	A(60/1,6/1,6)	1 e 2	3,2	110	2,2	0,22	15,15
	C(50/3)	1 e 2	3,2	110	2,6	0,19	22,08
		3	4,0	150	1,8	0,19 (0,38)	
E7014	A(60/1,6/1,6)	1 e 2	3,2	120	3,2	0,22	10,42
	C(60/3)	1 e 2	3,2	120	2	0,37	16,67
E7016	A(60/1,6/1,6)	1 e 2	3,2	120	2,4	0,22	13,89
	C(60/3)	1 a 4	3,2	120	2,8	0,37	23,81
E7018	A(60/1,6/1,6)	1 e 2	3,2	110	5,2	0,13	9,01
		3	4,0	150	6,4	0,08 (0,21)	
	C(60/3)	1	3,2	110	3,8	0,09	13,64
		2	4,0	150	3,6	0,28 (0,37)	

* Referente à Fig.4.22.

CÓPIA AUTORIZADA PELO AUTOR
 DISTRIBUIÇÃO GRATUITA
 PROIBIDA A COMERCIALIZAÇÃO EM QUALQUER FORMATO

Tabela 4.25 - Eletrodo Revestido (Junta a Topo - Posição Plana - Espessura 12 mm)

Classe (AWS)	Junta (a/r/n/c/d)*	Passe	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade Soldagem/Passe (mm/s)	Metal de Adição (Total - kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)	
E6011	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	80	1,9	0,13	25,13	
		2	4,0	145	4,6	0,09		
		3	5,0	200	4,8	0,12		
		4	6,3	275	1,8	0,14 (0,48)		
	A(60/1/1,6)	1 e 2	4,0	145	3,8	0,22	25,95	
		3	5,0	200	4,8	0,12		
		4	6,3	275	2,0	0,39		
	1S	3,2	95	3,1	0,10 (0,83)	23,48		
		3	5,0	200	2,2		0,40 (0,69)	
	E6012 ou E6013	A(60/1,6/1)	1	3,2	110	1,9	0,13	29,74
			2	4,0	180	4,3	0,09	
			3	5,0	210	3,9	0,12	
4 a 6			6,3	290	3,9	0,50 (0,84)		
A(60/1/1,6)		1 e 2	5,0	210	2,8	0,35	32,12	
		3 e 4	6,3	290	3,4	0,39		
		1S	3,2	110	1,6	0,15 (0,89)		
C(30/6)		1 e 2	4,0	180	4,0	0,20	31,48	
		3	5,0	210	1,8	0,26		
		4 e 5	6,3	290	2,4	0,53 (0,99)		
		1 e 2	5,0	210	2,0	0,47		
3 e 4		6,3	290	2,4	0,53 (1,00)	30,55		
	3	5,0	210	1,8	0,26			
E7014	A(60/1,6/1)	1	3,2	130	3,3	0,13	14,59	
		2	4,0	220	4,0	0,22		
		3	5,0	285	5,1	0,23		
		4	6,3	460	7,9	0,27 (0,85)		
	A(60/1,6/1,6)	1	4,0	220	2,5	0,35	15,27	
		2	5,0	285	5,1	0,23		
		3	6,3	460	10,2	0,21		
		1S	3,2	150	4,5	0,11 (0,90)		
	C(30/60)	1	3,2	150	5,4	0,09	17,91	
		2	4,0	220	2,3	0,37		
		3 e 4	5,0	285	4,4	0,53 (0,99)		
	E7024	A(60/1,6/1)	1	3,2	125	4,0	0,13	13,61
2			4,0	200	4,1	0,22		
3			5,0	275	5,5	0,23		
4			6,3	390	7,1	0,27 (0,85)		
A(1,6/1,6)		1	4,0	180	7,1	0,11	15,32	
		2	4,0	220	4,2	0,24		
		3	5,0	275	5,5	0,23		
		4	6,3	390	9,2	0,21		
1S		3,2	150	4,0	0,16 (0,95)	17,22		
		3	5,0	275	4,8		0,53 (0,99)	
E7016		A(60/1,6/1)	1	3,2	110	2,2	0,13	25,27
			2	4,0	175	2,3	0,22	
	3		5,0	215	2,7	0,23		
	4		6,3	330	3,9	0,27 (0,85)		
	A(60/1/1,6)	1	5,0	190	1,6	0,35	24,02	
		2	5,0	215	2,7	0,23		
		3	6,3	330	6,6	0,16		
		1S	3,2	120	3,4	0,09 (0,83)		
	C(30/8)	1 e 2	3,2	125	5,2	0,12	30,32	
		3 e 4	5,0	215	2,0	0,64		
		5	6,3	330	2,3	0,44 (1,20)		
		1 e 2	5,0	215	1,6	0,76		
3	6,3	330	2,3	0,44 (1,20)	28,08			
	3	5,0	215	1,6		0,76		
E7018	A(60/1,6/1)	1	3,2	100	2,2	0,13	20,74	
		2	4,0	190	3,0	0,22		
		3	5,0	250	3,9	0,23		
		4	6,3	350	5,0	0,27 (0,85)		
	A(60/1/1,6)	1	5,0	190	1,9	0,35	18,71	
		2	5,0	250	3,9	0,23		
		3	6,3	350	8,5	0,16		
		1S	3,2	130	4,5	0,09 (0,83)		
	C(30/8)	1 e 2	3,2	130	6,4	0,12	22,67	
		3 e 4	5,0	250	2,8	0,64		
		5 e 6	6,3	350	6,0	0,44 (1,20)		
		1 e 2	5,0	250	2,4	0,76		
3 à 5	6,3	350	9,0	0,44 (1,20)	19,44			

* Referente à Fig. 4.22.

Tabela 4.26-Eletrodo Revestido (Junta a Topo - Posição Horizontal - Espessura 12mm)

Classe (AWS)	Junta (a/r/n/c/d)*	Passe	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passe(mm/s)	Metal de Adição (Total - kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
E6011	D(45/1,6/1,6)	1	3,2	80	2,4	0,12	34,72
		2a4	4,0	120	3,0	0,41	
		5e6	5,0	150	3,0	0,32(0,85)	
	D(45/1/1,6)	1a3	4,0	120	2,1	0,53	39,56
		4e5	5,0	150	3,4	0,27	
		1S	3,2	80	2,8	0,10(0,90)	
E(45/3)	1a3	4,0	120	2,4	0,49	44,64	
	4a8	5,0	150	3,5	0,70(1,19)		
E6012 ou E6013	D(45/1,6/1)	1a3	3,2	120	2,4	0,31	45,24
		4e5	4,0	170	3,6	0,21	
6a8		5,0	190	3,3	0,38(0,90)		
E6013	D(45/1/1,6)	1a4	4,0	170	2,8	0,53	41,47
		5a7	5,0	190	4,8	0,27	
		1S	3,2	120	2,3	0,11(0,91)	
	E(45/3)	1a4	4,0	170	3,2	0,49	48,61
		5a11	5,0	190	3,6	0,70(1,19)	
	E7014	D(45/1,6/1,6)	1	3,2	120	3,0	0,12
2a4			4,0	190	3,3	0,64	
5			3,2	120	4,1	0,09(0,85)	
1			3,2	150	4,3	0,12	
2a4			4,0	190	3,6	0,59	
5			3,2	120	4,1	0,09	
E(45/3)		1S	3,2	120	3,1	0,11(0,91)	27,12
		1	3,2	150	6,2	0,08	
		2a4	4,0	190	3,3	0,68	
		5e6	5,0	220	5,2	0,34	
		7	3,2	150	5,8	0,09(1,19)	
		1	3,2	150	6,2	0,08	
E7016	D(45/1,6/1,6)	1	3,2	110	2,5	0,12	30,36
		2a4	4,0	170	3,6	0,41	
		5a7	5,0	190	5,1	0,32(0,85)	
	D(45/1/1,6)	1a4	4,0	170	3,6	0,53	31,61
		5e6	5,0	190	4,0	0,27	
		1S	3,2	110	3,5	0,09(0,89)	
E(45/3)	1	3,2	110	3,6	0,08	39,35	
	2a4	4,0	170	3,6	0,41		
	5a9	5,0	190	4,0	0,70(1,19)		
E7018	D(45/1,6/1,6)	1	3,2	105	2,8	0,12	24,31
		2a4	4,0	180	4,5	0,41	
		5a7	5,0	210	6,9	0,32(0,85)	
	D(45/1/1,6)	1	4,0	145	4,0	0,12	25,04
		2e3	4,0	180	3,2	0,41	
		4e5	5,0	210	5,6	0,27	
		1S	3,2	110	3,7	0,10(0,90)	
	E(45/3)	1	3,2	120	4,8	0,08	29,73
		2a4	4,0	180	4,5	0,41	
		5a8	5,0	210	4,4	0,70(1,19)	

* Referente à Fig.4.22.

Tabela 4.27 - Eletrodo Revestido (Junta a Topo - Posição Vertical Ascendente - Espessura 12 mm)

Classe (AWS)	Junta (a/r/n/c/d)*	Passe	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passe(mm/s)	Metal de Adição (Total - kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)				
E6011	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	100	6,6	0,05	39,07				
		2 e 3	3,2	80	1,2	0,53					
		4	4,0	120	1,9	0,21 (0,79)					
	A(60/1/1,6)	1	3,2	100	8,8	0,04		46,94			
		2 e 3	3,2	80	1,0	0,54					
		4	4,0	120	2,5	0,16					
	IS	3,2	100	3,3	0,10 (0,84)	53,3					
		1	3,2	100	9,7				0,04		
		2 e 3	3,2	80	1,2				0,51		
C(60/3)	4 e 5	4,0	120	1,4	0,57 (1,12)		51,47				
	1 e 2	3,2	110	1,4	0,35						
	3	4,0	140	0,7	0,44 (0,79)						
E6012 ou E6013	A(60/1/1,6)	1 a 3	4,0	140	1,2			0,74	51,47		
		IS	3,2	110	1,7			0,14 (0,88)			
	C(60/3)	1 a 3	4,0	140	1,2			0,83		53,57	
		4	5,0	170	1,4	0,28 (1,11)					
	E7014	A(60/1,6/1,6)	1 a 3	3,2	120	1,2		0,84			41,67
		A(60/1/1,6)	1 a 3	3,2	120	1,5		0,74			
IS			3,2	120	3,1	0,11 (0,85)					
C(60/3)	1 e 3	3,2	120	1,2	0,28	50,92					
	4	4,0	150	1,8	0,83 (1,11)						
E7016	A(60/1,6/1,6)	1 e 2	3,2	110	1,2	0,58	35,35				
		3	4,0	140	2,2	0,21 (0,79)					
	A(60/1/1,6)	1 e 2	4,0	140	1,2	0,74		34,72			
		IS	3,2	110	2,4	0,14 (0,88)					
	C(60/3)	1 e 2	3,2	110	1,2	0,54			48,61		
		3	4,0	140	0,8	0,57 (1,10)					
	E7018	A(60/1,6/1,6)	1 e 2	3,2	110	1,2				0,58	35,02
			3	4,0	140	2,3				0,21 (0,79)	
		A(60/1/1,6)	1 e 2	4,0	140	1,4				0,74	
IS			3,2	110	2,3	0,16 (0,90)					
C(60/3)		1 e 2	3,2	110	1,4	0,54	44,64				
		3	4,0	140	0,8	0,57 (1,11)					

* Referente à Fig.4.22.

Tabela 4.28 - Eletrodo Revestido (Junta a Topo - Posição Vertical Descendente - Espessura 12 mm)

Classe (AWS)	Junta (a/r/n/c/d)*	Passo	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passo (mm/s)	Metal de Adição (Total - kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
E7016	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	140	3,1	0,13	26,21
		2 a 6	4,0	170	4,0	0,66 (0,79)	
		1	3,2	140	3,1	0,13	
		2 a 6	4,0	170	4,0	0,66	
	C(60/3)	1S	3,2	140	3,4	0,12 (0,91)	37,12
		1	3,2	140	4,4	0,09	
		2 a 9	4,0	170	4,0	1,02 (1,11)	
		1 a 8	4,0	170	3,2	1,11	

* Referente à Fig.4.22.

Tabela 4.29 - Eletrodo Revestido (Junta a Topo - Posição Sobrecabeça - Espessura 12 mm)

Classe (AWS)	Junta (a/r/n/c/d)*	Passo	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passo (mm/s)	Metal de Adição (Total - kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)		
E6011	A(60/1,6/1,6)	1 e 2	3,2	80	2,2	0,23	42,93		
		3 a 7	4,0	110	3,0	0,56 (0,79)			
	C(30/6)	1 a 3	3,2	80	1,8	0,40			
		4 e 5	4,0	110	2,2	0,29 (0,69)			
E6012 ou E6013	A(60/1,6/1,6)	1 e 2	3,2	110	2,2	0,23	42,44		
		3 e 4	4,0	150	1,8	0,35			
		5 e 6	5,0	170	3,8	0,21 (0,79)			
E7014	A(60/1,6/1,6)	C(30/8)	1 e 2	3,2	110	2,6	0,19	55,15	
			3 e 4	4,0	150	1,8	0,35		
		5 e 6	5,0	170	1,4	0,57 (1,11)			
E7016	A(60/1,6/1,6)	C(30/8)	1 a 3	3,2	120	3,0	0,35	30,55	
			4 e 5	4,0	150	2,4	0,44 (0,79)		
		1	3,2	120	1,4	0,26			
E7018	D(45/1,6/1,6)	C(30/8)	2 a 5	4,0	150	2,0	0,94 (1,20)	45,24	
			1 e 2	3,2	120	1,2	0,42		
		3 e 4	4,0	150	2,0	0,37 (0,79)			
E7016	A(60/1,6/1,6)	C(30/8)	1 a 3	3,2	120	1,8	0,42	61,11	
			4 a 6	4,0	150	1,5	0,79 (1,21)		
		C(30/8)	1 e 2	3,2	110	5,2	0,13		27,24
			3 a 7	4,0	150	4,0	0,66 (0,79)		
E7018	D(45/1,6/1,6)	C(30/8)	1 a 3	3,2	110	2,4	0,42	48,61	
			4 a 8	4,0	150	3,0	0,79 (1,21)		

* Referente à Fig.4.22.

Tabela 4.30 - Eletrodo Revestido (Junta a Topo - Posição Plana - Espessura 20 mm)

Classe (AWS)	Junta (a/r/n/c/d)*	Passo	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passo (mm/s)	Metal de Adição (Total - kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)	
E6011	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	80	1,9	0,13	49,2	
		2	4,0	145	4,6	0,09		
		3	5,0	200	4,8	0,12		
		4 a 7	6,3	275	2,0	1,58 (1,92)		
	(a)	1 e 2	1	4,0	145	4,6	0,19	46,14
			3	5,0	200	4,8	0,12	
		4 e 5	4	6,3	275	1,8	0,93	
			1S	3,2	95	2,3	0,13	
		2S	4,0	145	4,6	0,09		
		3S	5,0	200	4,8	0,12		
	C(30/3)	1 e 2	1	4,0	145	2,2	0,40	37,88
			3	5,0	200	2,2	0,26	
		4 e 5	4	6,3	275	2,2	0,73 (1,39)	
	E6012 ou E6013	A(60/1,6/1)	1	3,2	110	1,9	0,13	58,59
			2	4,0	180	4,3	0,09	
3			5,0	210	3,9	0,12		
4 a 9			6,3	290	2,4	1,67 (2,01)		
(a)		1	1	3,2	110	2,6	0,09	60,72
			2	4,0	180	4,3	0,09	
		4 a 7	3	5,0	210	3,9	0,12	
			4	6,3	290	2,8	0,93	
		1S	3,2	110	1,5	0,16		
		2S	4,0	180	4,3	0,09		
C(30/6)		1 e 2	1	4,0	180	4,0	0,20	50,93
			3	5,0	210	1,8	0,26	
		4 a 9	4	6,3	290	3,0	1,42 (1,88)	
E7014		A(60/1,6/1)	1	3,2	130	3,3	0,13	23,53
			2	4,0	220	4,0	0,22	
	3		5,0	285	5,2	0,23		
	4 a 7		6,3	460	6,0	1,44 (2,02)		
	(a)	1	1	4,0	220	2,8	0,31	24,64
			2	5,0	285	5,2	0,23	
		3 e 4	3	6,3	460	6,0	0,69	
			1S	3,2	150	4,1	0,13	
		2S	4,0	220	4,0	0,22		
		3S	5,0	285	9,8	0,12 (1,70)		
	C(30/6)	1	1	3,2	150	5,4	0,09	24,52
			2	4,0	220	2,3	0,37	
		3 e 4	3	5,0	285	4,8	0,50	
			5 e 6	6,3	460	4,6	0,92 (1,88)	
	E7024	A(60/1,6/1)	1	3,2	125	4,0	0,13	24,08
2			4,0	200	4,1	0,22		
3			5,0	275	5,5	0,23		
4 a 7			6,3	390	5,2	1,44 (2,02)		
(a)		1	1	4,0	180	11,0	0,07	21,82
			2	4,0	220	4,2	0,24	
		4 e 5	3	5,0	275	5,5	0,23	
			4	6,3	390	5,4	0,69	
		1S	4,0	220	5,1	0,20		
		2S	5,0	275	6,0	0,22		
C(30/6)		1	1	3,2	150	3,1	0,20	24,63
			2	4,0	200	3,4	0,26	
		3 e 4	3	5,0	275	5,2	0,50	
E7016		A(60/1,6/1)	1	3,2	110	2,2	0,13	44,8
			2	4,0	175	2,3	0,22	
	3		5,0	215	2,7	0,23		
	4 a 7		6,3	330	2,8	1,44 (2,02)		
	(b)	1	1	5,0	190	1,7	0,33	44,07
			2	5,0	215	2,7	0,23	
		3 e 4	3	6,3	330	3,6	0,58	
			1S	3,2	120	1,6	0,19	
		2S	4,0	175	11,3	0,04		
		3S	5,0	190	2,4	0,23 (1,60)		
	C(30/8)	1 e 2	1	5,0	215	1,6	0,76	44,64
			3 a 6	6,3	330	2,8	1,44 (2,20)	
	E7018	A(60/1,6/1)	1	3,2	100	2,2	0,13	35,92
			2	4,0	190	3,0	0,22	
			3	5,0	250	3,9	0,23	
4 a 8			6,3	350	4,5	1,44 (2,02)		
(b)		1	1	5,0	190	2,0	0,33	34,73
			2	5,0	250	3,9	0,23	
		3 e 4	3	6,3	350	4,6	0,58	
			1S	3,2	130	2,1	0,19	
		2S	4,0	190	9,6	0,07		
		3S	5,0	190	3,2	0,20 (1,60)		
C(30/8)		1 e 2	1	5,0	250	2,4	1,44	32,41
			3 a 7	6,3	350	4,5	0,76 (2,20)	

* Referente à Fig.4.22. Notas: (a) Junta tipo F(60/3/0) com c e d iguais à 2/3 e 1/3 da espessura da chapa, respectivamente; (b) Junta tipo F(60/3/1,6), com c e d iguais à 2/3 e 1/3 da espessura da chapa, respectivamente.

Tabela 4.31 - Eletrodo Revestido (Junta a Topo - Posição Horizontal - Espessura 20 mm)

Classe (AWS)	Junta (a/r/n/c/d)*	Passo	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passo (mm/s)	Metal de Adição (Total - kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)	
E6011	D(45/1,6/1,6)	1	3,2	80	2,4	0,12	79,74	
		2 a 4	4,0	120	2,9	0,41		
		5 a 11	5,0	150	2,1	1,56 (2,09)		
	(a)		1 a 3	4,0	120	2,2	0,54	70,24
			4 a 7	5,0	150	2,7	0,69	
			1S	3,2	80	2,0	0,15	
			2S e 3S	4,0	120	2,3	0,34 (1,72)	
	E(45/3)		1 a 3	4,0	120	2,4	0,49	98,21
			4 a 16	5,0	150	2,8	2,14 (2,63)	
	E6012 ou E6013	D(45/1,6/1)	1 a 3	3,2	120	2,5	0,31	93,36
			4 e 5	4,0	170	3,6	0,21	
6 a 15			5,0	190	2,6	1,66 (2,18)		
(a)			1 a 4	4,0	170	2,8	0,54	82,57
			5 a 11	5,0	190	4,3	0,69	
			1S a 3S	3,2	120	1,9	0,41	
			4S a 6S	4,0	170	9,4	0,12 (1,76)	
E(45/3)			1 a 4	4,0	170	3,1	0,49	104,84
			5 a 21	5,0	190	3,4	2,14 (2,63)	
E7014		D(45/1,6/1,6)	1	3,2	120	3,0	0,12	48,5
			2 a 4	4,0	190	3,2	0,68	
			5 a 10	5,0	220	4,3	1,20	
	11		3,2	120	4,1	0,09 (2,09)		
	(a)		1	3,2	120	4,7	0,09	47,08
			2 a 4	4,0	190	2,9	0,74	
			5 e 6	5,0	220	5,6	0,31	
			7	3,2	120	4,1	0,09	
			1S	3,2	120	2,9	0,13	
			2S e 3S	4,0	190	5,7	0,25	
			4S	3,2	120	4,1	0,09 (1,70)	
	E(45/3)		1	3,2	150	6,2	0,08	55,5
			2 a 4	4,0	190	3,2	0,68	
			5 a 11	5,0	220	3,4	1,78	
			12	3,2	150	5,8	0,09 (2,63)	
	E7016	D(45/4,6/1,6)	1	3,2	110	2,5	0,12	
			2 a 4	4,0	170	3,5	0,41	
5 a 13			5,0	190	3,1	1,56 (2,09)		
(a)			1 a 4	4,0	170	3,5	0,54	
			5 a 9	5,0	190	3,9	0,69	
			1S	3,2	110	1,8	0,17	
			2S e 3S	4,0	170	2,8	0,34 (1,74)	
E(45/3)			1	3,2	110	3,6	0,08	85,58
			2 a 4	4,0	170	3,5	0,41	
			5 a 16	5,0	190	3,0	2,14 (2,63)	
E7018		D(45/1,6/1,6)	1	3,2	105	2,8	0,12	51,7
			2 a 4	4,0	180	4,6	0,41	
	5 a 13		5,0	210	4,3	1,56 (2,09)		
	(a)		1	4,0	145	5,2	0,10	47,56
			2 e 3	4,0	180	2,8	0,45	
			4 a 7	5,0	210	4,3	0,69	
			1S	3,2	110	2,1	0,17	
			2S e 3S	4,0	180	3,7	0,34 (1,75)	
	E(45/3)		1	3,2	120	4,8	0,08	61,96
			2 a 4	4,0	180	4,6	0,41	
			5 a 14	5,0	210	3,5	2,14 (2,63)	

* Referente à Fig.4.22. Nota: (a) Junta do tipo F(60/3/0), com c e d iguais à 2/3 e 1/3 da espessura da chapa, respectivamente.

Tabela 4.32 - Eletrodo Revestido (Junta a Topo - Posição Vertical Ascendente - Espessura 20 mm)

Classe (AWS)	Junta (a/r/n/c/d)*	Passo	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passo (mm/s)	Metal de Adição (Total - kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)	
E6011	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	100	6,6	0,05	88,38	
		2 e 3	3,2	80	1,1	0,53		
		4 e 5	4,0	120	1,2	0,65		
		6	5,0	140	0,6	0,70 (1,93)		
	(a)	1 a 3	3,2	80	1,6	0,54	89,33	
		4 e 5	4,0	120	1,1	0,69		
		1S e 2S	3,2	80	1,2	0,47 (1,70)		
	C(60/3)	1	3,2	100	9,7	0,04	107,42	
		2 e 3	3,2	80	1,1	0,51		
		4 e 5	4,0	120	1,2	0,65		
		6 e 7	5,0	140	0,7	1,25 (2,45)		
	E6012 ou E6013	A(60/1,6/1,6)	1 e 2	3,2	110	1,4	0,35	97,04
3 e 4			4,0	140	1,2	0,53		
5 a 7			5,0	170	1,1	1,05 (1,93)		
(a)		1 a 3	4,0	140	1,1	0,83	100,94	
		4	5,0	170	0,9	0,40		
		1S e 2S	3,2	110	1,1	0,46		
		3S	4,0	140	2,5	0,12 (1,81)		
C(60/3)		1 a 3	4,0	140	1,1	0,83	116,88	
		4 a 6	5,0	170	0,7	1,61 (2,44)		
E7014		A(60/1,6/1,6)	1 a 3	3,2	120	1,2	1,05	75
			4 e 5	4,0	150	1,0	0,88 (1,93)	
		(a)	1 a 3	3,2	120	1,3	0,83	72,11
	4 e 5		4,0	150	2,6	0,40		
	1S e 2S		3,2	120	1,6	0,47 (1,70)		
	C(60/3)	1 a 3	3,2	120	1,3	0,83	88,46	
		4 a 6	4,0	150	1,0	1,61 (2,44)		
	E7016	A(60/1,6/1,6)	1 e 2	3,2	110	1,2	0,58	77,78
			3 e 4	4,0	140	0,8	1,06	
			5	5,0	170	2,0	0,28 (1,92)	
		(a)	1 a 3	4,0	140	1,1	1,23	73,23
			1S	3,2	110	0,6	0,57 (1,80)	
C(60/3)		1 e 2	3,2	110	1,3	0,54	91,12	
		3 e 4	4,0	140	0,8	1,06		
		5	5,0	170	0,7	0,83 (2,43)		
E7018		A(60/1,6/1,6)	1 e 2	3,2	110	1,2	0,58	72,06
			3 e 4	4,0	140	0,9	1,06	
			5	5,0	185	2,3	0,28 (1,92)	
		(a)	1 a 3	4,0	140	0,8	1,23	69,44
	1S		3,2	110	0,6	0,57 (1,80)		
	C(60/3)	1 e 2	3,2	110	1,3	0,54	83,51	
		3 e 4	4,0	140	0,9	1,06		
		5 e 6	5,0	185	1,6	0,83 (2,43)		

* Referente à Fig.4.22. Nota: (a) Junta tipo F(60/3/0) com c e d iguais à 2/3 e 1/3 da espessura da chapa, respectivamente.

Tabela 4.33 - Eletrodo Revestido (Junta a Topo - Posição Vertical Descendente - Espessura 20 mm)

Classe (AWS)	Junta (a/r/n/c/d)*	Passo	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passo (mm/s)	Metal de Adição (Total - kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
E7016	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	140	3,1	0,13	64,52
		2 a 12	4,0	170	3,1	1,79 (1,92)	
	(a)	1	3,2	140	4,4	0,09	57,77
		2 a 10	4,0	170	4,0	1,14	
		1S	3,2	140	3,1	0,13	
		2S e 3S	4,0	170	3,0	0,34 (1,70)	
		1 a 10	4,0	170	4,1	1,23	
		1S e 2S	4,0	170	2,2	0,47 (1,70)	
	C(60/3)	1	3,2	140	4,4	0,09	81,91
		2 a 16	4,0	170	3,0	2,35 (2,44)	
		1 a 16	4	170	3,3	2,44	

* Referente à Fig.4.22. Nota: (a) Junta tipo F(60/3/0), com c e d iguais à 2/3 e 1/3 da espessura da chapa, respectivamente.

Tabela 4.34 - Eletrodo Revestido (Junta a Topo - Posição Sobrecabeça - Espessura 20 mm)

Classe (AWS)	Junta (a/r/n/c/d)*	Passo	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passo (mm/s)	Metal de Adição (Total - kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
E6011	A(60/1,6/1,6)	1 e 2	3,2	80	2,3	0,23	104,78
		3 a 15	4,0	110	2,4	1,70 (1,93)	
	C(30/6)	1 a 3	3,2	80	1,9	0,40	77,6
		4 a 11	4,0	110	2,6	1,00 (1,40)	
E6012 ou E6013	A(60/1,6/1,6)	1 e 2	3,2	110	2,1	0,23	92,94
		3 e 4	4,0	150	1,9	0,35	
E6013	C(30/8)	5 a 9	5,0	170	1,4	1,34 (1,92)	113,7
		1 e 2	3,2	110	2,6	0,19	
		3 e 4	4,0	150	1,9	0,35	
E7014	A(60/1,6/1,6)	5 a 11	5,0	170	1,4	1,90 (2,44)	66,13
		1 a 3	3,2	120	3,1	0,35	
	4 a 9	4,0	150	2,0	1,58 (1,93)		
E7014	C(30/8)	1	3,2	120	1,4	0,26	75,4
		2 a 9	4,0	150	2,1	1,95 (2,21)	
		3 e 4	4,0	150	1,6	0,46	
E7016	A(60/1,6/1,6)	5 a 11	5,0	170	2,9	1,05 (1,93)	88,84
		1 e 2	3,2	120	1,2	0,42	
		3 e 4	4,0	150	1,6	0,46	
E7016	C(30/8)	5 a 11	5,0	170	2,9	1,05 (1,93)	101,06
		1 a 3	3,2	120	1,9	0,42	
		4 a 7	4,0	150	1,5	0,98	
E7018	D(45/1,6/1,6)	8 a 11	5,0	170	2,2	0,81 (2,21)	66,47
		1 e 2	3,2	110	5,3	0,13	
	3 a 15	4,0	150	3,6	1,79 (1,92)		
E7018	C(30/8)	1 a 3	3,2	110	2,5	0,42	79,14
		4 a 14	4,0	150	3,1	1,79 (2,21)	

* Referente à Fig.4.22.

Tabela 4.35 - Eletrodo Revestido (Junta a Topo - Posição Plana - Espessura 25 mm)											
Classe (AWS)	Junta (a/r/n/c/d)*	Passe	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passe (mm/s)	Metal de Adição (Total - kg/m)	Tempo Arco	Total de (min/m)			
E6011	A(60/1,6/1,6)	1	3,2	80	1,9	0,13					
		2	4,0	145	4,6	0,09					
		3	5,0	200	4,8	0,12				71,42	
		4 a 11	6,3	275	2,4	2,62 (2,96)					
	(a)	1 e 2	1	4,0	145	4,7	0,19				
			3	5,0	200	4,8	0,12				
		4 a 7	1	6,3	275	2,1	1,48				
			1S	3,2	95	2,3	0,13				62,6
		2S	1	4,0	145	4,6	0,09				
			3S	5,0	200	4,8	0,12				
	4S	1	6,3	275	2,8	0,29 (2,42)					
		3	5,0	200	2,2	0,40					
C(30/3)	1 e 2	1	4,0	145	2,2	0,26					
		3	5,0	200	2,2	0,26				50,5	
	4 a 7	6,3	275	2,4	1,34 (2,00)						
E6012 ou E6013	A(60/1,6/1)	1	3,2	110	1,9	0,13					
		2	4,0	180	4,3	0,09					
3		5,0	210	3,9	0,12				85,1		
4 a 12		6,3	290	2,2	2,73 (3,07)						
(a)	1	1	3,2	110	2,6	0,09					
		2	4,0	180	4,3	0,09					
	3	1	5,0	210	3,9	0,12					
		4 a 9	6,3	290	2,7	1,48					
	1S	1	3,2	110	1,5	0,16				77,95	
		2S	4,0	180	4,3	0,09					
	3S	1	5,0	210	3,9	0,12					
		4S e 5S	6,3	290	4,7	0,29 (2,44)					
	C(30/6)	1 e 2	1	5,0	210	2,0	0,47				
			3 a 11	6,3	290	2,8	2,14 (2,61)				70,24
E7014	A(60/1,6/1)	1	3,2	130	3,3	0,13					
		2	4,0	220	4,0	0,22					
		3	5,0	285	5,1	0,23				32,26	
		4 a 10	6,3	460	5,9	2,50 (3,08)					
	(a)	1	1	4,0	220	2,8	0,31				
			2	5,0	285	5,2	0,23				
		3 a 5	1	6,3	460	5,0	1,25				
			1S	3,2	150	4,1	0,13				31,35
		2S	1	4,0	220	4,0	0,22				
			3S	5,0	285	4,2	0,29 (2,43)				
	C(30/6)	1	1	3,2	150	5,4	0,09				
			2	4,0	220	2,3	0,37				
3 e 4		1	5,0	285	4,8	0,50				30,3	
		5 a 9	6,3	460	6,4	1,64 (2,61)					
E7024	A(60/1,6/1)	1	3,2	125	4,0	0,13					
		2	4,0	200	4,1	0,22					
		3	5,0	275	5,5	0,23					
		4 a 1	6,3	390	6,0	2,50 (3,08)				33,48	
	(a)	1	1	4,0	180	11,0	0,07				
			2	4,0	220	4,2	0,24				
		3	1	5,0	275	5,5	0,23				
			4 a 7	6,3	390	5,8	1,25				
		1S	1	4,0	220	5,1	0,20				
			2S	5,0	275	6,0	0,22				
	3S	1	6,3	390	6,6	0,29 (2,50)					
		2	4,0	200	3,1	0,20					
C(30/6)	1 e 2	1	4,0	200	3,4	0,26					
		3 e 4	5,0	275	5,1	0,50				31,43	
	5 a 9	1	6,3	390	5,7	1,64 (2,60)					
		2	4,0	200	3,1	0,13					
E7016	A(60/1,6/1)	1	3,2	110	2,2	0,13					
		2	4,0	175	2,3	0,22					
		3	5,0	215	2,7	0,23					
		4 a 11	6,3	330	3,3	2,50 (3,08)				61,4	
	(b)	1	1	5,0	190	1,7	0,32				
			2	5,0	215	2,7	0,23				
		3 a 6	1	6,3	330	3,5	0,18				
			1S	3,2	120	1,7	0,18				58,21
		2S	1	4,0	175	11,3	0,04				
			3S	5,0	190	1,4	0,42 (2,37)				
	C(30/8)	1 e 2	1	3,2	125	5,3	0,12				
			3 e 4	5,0	215	2,0	0,64				59,99
5 a 10		1	6,3	330	2,7	2,24(3,00)					
		1 e 2	5,0	215	1,7	0,76					
3 a 9	1	6,3	330	3,2	2,24 (3,00)				56,07		
	2	4,0	190	2,2	0,13						
E7018	A(60/1,6/1)	1	3,2	100	2,2	0,13					
		2	4,0	190	3,0	0,22					
		3	5,0	250	3,9	0,23					
		4 a 12	6,3	350	4,8	2,50 (3,08)				48,65	
	(b)	1	1	5,0	190	2,1	0,32				
			2	5,0	250	3,9	0,23				
		3 a 6	1	6,3	340	4,5	1,18				
			1S	3,2	130	2,2	0,18				44,67
		2S	1	4,0	190	9,6	0,07				
			3S	5,0	190	2,0	0,40 (2,38)				
	C(30/8)	1 e 2	1	3,2	130	6,5	0,12				
			3 e 4	5,0	250	2,8	0,64				45,49
5 a 11		1	6,3	350	4,1	2,24 (3,00)					
		1 e 2	5,0	250	2,4	0,76					
3 a 10	1	6,3	350	4,7	2,24 (3,00)				42,26		

* Referente à Fig.4.22. Notas: (a) Junta tipo F(60/3/0) com c e d iguais à 2/3 e 1/3 da espessura da chapa, respectivamente; (b) Junta tipo F(60/3/1,5) com c e d iguais à 2/3 e 1/3 da espessura da chapa, respectivamente.

Tabela 4.36 - Eletrodo Revestido (Junta de Filete - Posição Plana)

Tamanho da Perna (mm)	Classe (AWS)	Passe	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passe (mm/s)	Metal de Adição (kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
5	E6011	1	4	120	2,5	0,153	6,67
		1	5	160	3,5	0,153	4,76
	E6012 ou E6013	1	4	180	3,6	0,116	4,63
		1	5	220	4,4	0,116	3,79
	E7014	1	4	255	5,9	0,114	2,82
		1	5	300	7,6	0,114	2,19
	E7024	1	4	245	5,9	0,114	2,82
		1	5	280	7,3	0,114	2,28
	E7016	1	4	150	3,2	0,146	5,21
		1	5	190	3,9	0,146	4,27
	E7018	1	4	180	3,6	0,152	4,63
		1	5	230	4,7	0,152	3,55
10	E6011	1	5	160	1	0,508	16,67
		1	6,3	230	1,6	0,508	10,42
	E6012 ou E6013	1	5	220	1,2	0,443	13,89
		1	6,3	300	1,6	0,443	10,42
	E7014	1	5	300	2	0,441	8,33
		1	6,3	370	2,6	0,441	6,41
	E7024	1	5	280	1,9	0,441	8,77
		1	6,3	360	2,7	0,441	6,17
	E7016	1	5	190	1,2	0,494	13,89
		1	6,3	260	1,6	0,494	10,42
	E7018	1	5	230	1,4	0,5	11,9
		1	6,3	300	1,9	0,5	8,77
15	E6012 ou E6013	1 e 2	6,3	300	1,5	0,976	22,22
		1 a 3	6,3	370	3,5	0,977	14,28
	E7024	1 a 3	6,3	360	3,7	0,977	13,51
	E7016	1 a 3	6,3	260	2,2	1,041	22,73
	E7018	1 a 3	6,3	300	2,8	1,042	17,86
20	E6012 ou E6013	1 a 6	6,3	300	2,5	1,713	40
		1 a 5	6,3	370	3,3	1,719	25,25
	E7024	1 a 5	6,3	360	3,5	1,719	23,81
	E7016	1 a 6	6,3	260	2,6	1,784	38,46
	E7018	1 a 6	6,3	300	3,3	1,78	30,3
25	E6012 ou E6013	1 a 10	6,3	300	2,7	2,654	61,73
		1 a 7	6,3	370	3	2,666	38,89
	E7024	1 a 7	6,3	360	3,2	2,666	36,46
	E7016	1 a 9	6,3	260	2,6	2,724	57,69
	E7018	1 a 9	6,3	300	3,2	2,712	46,87

Tabela 4.37 - Eletrodo Revestido (Junta de Filete - Posição Horizontal)

Tamanho da Perna (mm)	Classe (AWS)	Passo	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passo (mm/s)	Metal de Adição (kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)	
5	E6011	1	4	110	2,2	0,153	7,57	
		1	5	160	3,5	0,153	4,76	
	E6012 ou E6013	1	4	180	3,6	0,116	4,63	
		1	5	220	4,4	0,116	3,79	
	E7014	1	4	245	5,6	0,114	2,98	
		1	5	270	6,5	0,114	2,56	
	E7024	1	4	235	5,5	0,114	3,03	
		1	5	270	6,9	0,114	2,41	
	E7016	1	4	150	3,2	0,146	5,21	
		1	5	190	3,9	0,146	4,27	
	E7018	1	4	170	3,4	0,152	4,9	
		1	5	220	4,5	0,152	3,7	
	10	E6011	1 a 3	4	110	2	0,508	25
			1 a 3	5	160	3,1	0,508	16,13
E6012 ou E6013		1 a 4	4	180	3,7	0,443	18,02	
		1 a 3	5	220	3,5	0,443	14,28	
E7014		1	5	270	1,7	0,441	9,8	
		1	6,3	305	2	0,441	8,33	
E7024		1 a 4	4	235	5,7	0,441	11,69	
		1 a 3	5	260	5	0,441	10	
E7016		1 a 4	4	150	3,7	0,494	18,02	
		1 a 3	5	190	3,5	0,494	14,28	
E7018		1 a 4	4	170	4,1	0,5	16,26	
		1 a 3	5	220	4,1	0,5	12,19	
15		E6012 ou E6013	1 a 5	6,3	275	3,3	0,976	25,25
			1 a 4	6,3	305	3,6	0,977	18,52
	E7024	1 a 5	5	260	3,8	0,977	21,93	
	E7016	1 a 5	6,3	260	3,7	1,041	22,52	
	E7018	1 a 5	6,3	270	4,1	1,042	20,32	
20	E6012 ou E6013	1 a 10	6,3	275	3,8	1,713	43,86	
		E7014	1 a 8	6,3	305	4,1	1,719	32,52
	E7024	1 a 9	5	260	3,9	1,719	38,46	
	E7016	1 a 9	6,3	260	3,9	1,784	38,46	
	E7018	1 a 9	6,3	270	4,4	1,78	34,09	
25	E6012 ou E6013	1 a 15	6,3	275	3,7	2,654	67,56	
		E7014	1 a 14	5	260	4,7	2,666	49,64
	E7024	1 a 14	5	260	3,9	2,666	59,83	
	E7016	1 a 13	5	260	3,7	2,724	58,56	
	E7018	1 a 13	6,3	270	4,1	2,712	52,84	

Tabela 4.38 - Eletrodo Revestido (Junta de Filete - Posição Vertical Descendente)

Tamanho da Perna (mm)	Classe (AWS)	Passe	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passe (mm/s)	Metal de Adição (kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
5	E6011	1	4	160	4,3	0,123	3,88
		1	5	190	5,2	0,123	3,2
	E7016	1	4	180	3,9	0,122	4,27
		1	5	245	5,6	0,122	2,98
10	E7016	1 a 4	4	180	4,8	0,408	13,89

Tabela 4.39 - Eletrodo Revestido (Junta de Filete - Posição Vertical Ascendente)

Tamanho da Perna (mm)	Classe (AWS)	Passe	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passe (mm/s)	Metal de Adição (kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
5	E6011	1	3,2	85	1,3	0,185	12,82
		1	4	110	1,9	0,185	8,77
	E6012 ou E6013	1	3,2	115	1,7	0,148	9,8
		1	4	145	2,2	0,148	7,58
	E7014	1	4	150	1,4	0,173	11,90
	E7016	1	3,2	100	1,7	0,183	9,8
		1	4	130	2,2	0,183	7,58
	E7018	1	3,2	110	1,8	0,17	9,26
		1	4	140	2,4	0,17	6,94
	10	E6011	1 e 2	3,2	85	1	0,52
1 e 2			4	110	1,3	0,52	25,64
E6012 ou E6013		1 a 3	3,2	115	1,5	0,498	33,33
		1 e 2	4	145	1,3	0,498	25,64
E7014		1 e 2	4	150	1	0,488	33,33
E7016		1 a 3	3,2	100	1,8	0,529	27,78
		1 e 2	4	130	1,5	0,529	22,22
E7018		1 a 3	3,2	110	1,7	0,518	29,41
		1 e 2	4	140	1,6	0,518	20,83
15		E6012 ou E6013	1	4	145	1,5	0,211
	2 e 3		5	170	0,9	0,835 (1,046)	71,43
	E7014	1 a 3	4	150	0,7	0,992	45,45
	E7016	1 a 3	4	130	1,1	1,061	45,45
	E7018	1 a 3	4	140	1,1	1,057	45,45
20	E6012 ou E6013	1	4	145	1,5	0,211	94,44
		2 a 6	5	170	1	1,933 (2,144)	111,11
	E7014	1 a 4	4	150	0,6	1,688	66,24
	E7016	1 a 3	4	130	1,3	0,95	97,98
	4 e 5	5	160	1,2	0,834 (1,784)	75,75	
25	E6012 ou E6013	1	4	145	1,5	0,211	117,17
		2 a 8	5	170	1,1	2,521 (2,732)	166,67
	E7014	1 a 6	4	150	0,6	2,577	97,98
	E7016	1 a 3	4	130	1,3	0,95	111,11
	4 a 8	5	160	1,4	1,750 (2,700)	111,11	
E7018	1 a 8	4	140	1,2	2,713	111,11	

Tabela 4.40 - Eletrodo Revestido (Junta de Filete - Posição Sobrecabeça)

Tamanho da Perna (mm)	Classe (AWS)	Passe	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem/Passe (mm/s)	Metal de Adição (kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)	
5	E6012 ou E6013	1	4	170	2,6	0,148	6,41	
		1	5	200	3,1	0,148	5,38	
	E7014	1	4	150	1,5	0,163	11,11	
		1	5	200	2,8	0,163	5,95	
	E7016	1 e 2	3,2	120	4,6	0,165	7,25	
		1	4	150	2,8	0,165	5,95	
		E7018	1	4	150	2,7	0,163	6,17
			1	5	190	3,6	0,163	4,63
10	E6012 ou E6013	1 a 4	4	170	3,1	0,498	21,5	
		1 a 3	5	200	2,8	0,498	17,86	
	E7014	1 a 4	4	150	1,7	0,576	39,21	
		1 a 3	5	200	2,3	0,576	21,74	
	E7016	1 a 5	3,2	120	3,6	0,523	23,15	
		1 a 3	5	170	3	0,523	16,67	
		E7018	1 a 5	4	150	4,2	0,528	19,84
			1 a 3	5	190	3,3	0,528	15,15
15	E6012 ou E6013	1 a 9	5	200	4	1,046	37,50	
		E7014	1 a 8	5	200	3	1,22	44,44
	E7016	1 a 8	5	170	3,9	1,074	34,19	
	E7018	1 a 8	5	190	4,3	1,092	31,01	
20	E6012 ou E6013	1 a 15	5	200	3,9	1,791	64,10	
		E7014	1 a 14	5	200	3	2,087	77,78
	E7016	1 a 15	5	170	4,3	1,826	58,14	
	E7018	1 a 15	5	190	4,7	1,853	53,19	
25	E6012 ou E6013	1 a 27	5	200	4,6		97,83	
		E7014	1 a 19	5	200	2,7	3,174	117,28
	E7016	1 a 24	5	170	4,5	2,761	88,89	
	E7018	1 a 24	5	190	5	2,811	80,00	

**C
A
P
Í
T
U
L
O

05**

**SOLDAGEM POR
ARCO SUBMERSO**

INTRODUÇÃO	136
PRINCÍPIOS E EQUIPAMENTO	137
CONSUMÍVEIS	138
VARIÁVEIS DE PROCEDIMENTO	142
TÉCNICAS OPERACIONAIS	144
Introdução	144
Variantes do Processo	145
Posicionamento Peça/Cabeçote	149
PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM	151

INTRODUÇÃO

Em torno de 1935 foi desenvolvido um processo de soldagem, o qual revolucionou os conceitos de produtividade até então existentes, sendo o mesmo intensivamente utilizado até hoje. O Arco Submerso consiste em um arame (eletrodo) nu, continuamente alimentado, o qual produz o arco elétrico com a peça, formando assim a poça de fusão, sendo ambos recobertos por uma camada de fluxo granular fusível, que protege o metal da contaminação atmosférica e possui outras funções metalúrgicas. Portanto, o arco e a poça de fusão não são visíveis - o arco permanece “submerso” - dispensado o operador de utilizar filtro nos óculos de proteção para os olhos.

A **Fig. 5.1** ilustra uma seção longitudinal através da poça de fusão, mostrando que em torno do arame se forma uma cavidade ôca preenchida por gases. Geralmente se denomina cavidade do arco, àquele espaço sob a superfície da peça, enquanto à parte encoberta pelo fluxo na parte superior é chamada de “caverna”. Como pode-se ver nessa figura, parte do fluxo não funde e sobrenada a porção fundida.

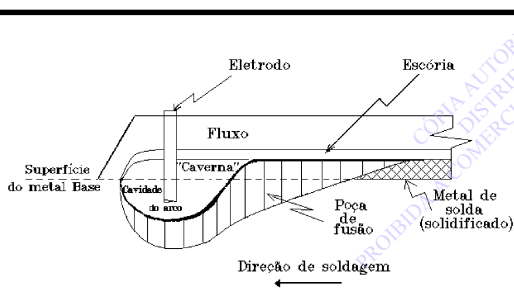


Figura 5.1 - Seção Longitudinal da Poça de Fusão no Arco Submerso.

Certos fluxos fundidos são condutores de eletricidade. Por isso, durante muitos anos se acreditou que o calor gerado para a soldagem nesse processo, fosse somente devido à resistência elétrica entre o fluxo e o arame. Radiografias e análise do registro da variação da tensão, entretanto, mostram que realmente ocorre um arco elétrico durante a soldagem.

O fluxo, além de proteger o arco, deve desoxidar e retirar impurezas do metal fundido, através de reações químicas com o mesmo, além de adici-

onar elementos de liga. Intensidades de corrente de até 2000 A são empregadas, com arames maciços de diâmetros entre 1,6 e 6,4 mm. Portanto, a densidade da corrente é alta e o rendimento térmico próximo de 100% (pois o arco está isolado do ambiente). Como resultado, o processo apresenta muito alta taxa de deposição - de até 20 kg/h, com um único arame - e grande penetração, não sendo recomendado para soldar espessuras menores do que 6 mm. Para uma mesma corrente, o arame de menor diâmetro causará maior penetração, devido a intensificação da força do arco, com conseqüente aceleração do modo de transferência do metal desde o eletrodo para a peça. No arco submerso, essa transferência depende, principalmente, da densidade de corrente. Com baixa corrente, se forma uma gota na ponta do eletrodo e a mesma é atraída pela parede da caverna, deslizando até a poça de fusão. Aumentando a corrente, a gota se desloca diretamente da ponta do arame em direção à poça.

Além de um único arame, será visto que também podem ser utilizadas variações, como múltiplos arames, ou fitas. Os materiais soldados são praticamente todos os metais ferrosos e alguns não-ferrosos, incluindo revestimentos protetores; ligas de níquel; cobre e outras. Metais com muito baixo ponto de fusão, ou altamente reativos, não podem normalmente ser soldados por arco submerso, mas há situações em que esse processo já foi empregado com sucesso, como sobre ligas de titânio, por exemplo.

O modo de operação do arco submerso pode ser automático, ou (raramente) semi-automático, apresentando alguns limitações (nem sempre intransponíveis) como, por exemplo, em soldar fora das posições plana, ou horizontal pois, caso contrário, não há sustentação para o fluxo. Outrossim, deve ser prevenida a contaminação do fluxo durante seu manuseio, ou estocagem, contra umidade, óleos, etc., pois isto poderá causar defeitos na junta soldada.

Esse processo, apesar de algumas limitações operacionais, produz um metal de solda com excepcionais características mecânico/metalúrgicas e é o preferido em várias situações, que deverão se tornar claras durante o transcorrer desse Capítulo.

PRINCÍPIOS E EQUIPAMENTO

A Fig. 5.2 ilustra esquematicamente o equipamento para arco submerso. O arame nu maciço, fornecido em bobinas, é tracionado por rolos e energizado quando passa pelo tubo de contato. Antecipando-se ao arco, um tubo de alimentação deposita fluxo desde um reservatório sobre a junta, sendo usual que um aspirador retire a porção não fundida desse material, após a solda ocorrer. A máquina

deve possuir, ainda, um conjunto de controles, compreendendo regulagem da tensão e corrente, com voltímetro/amperímetro acoplados; um sistema para início do arco e regulagem da velocidade de deslocamento. Algumas máquinas possuem, também, indicador da existência ou não de um perfeito contato elétrico arame/peça antes do início do arco.

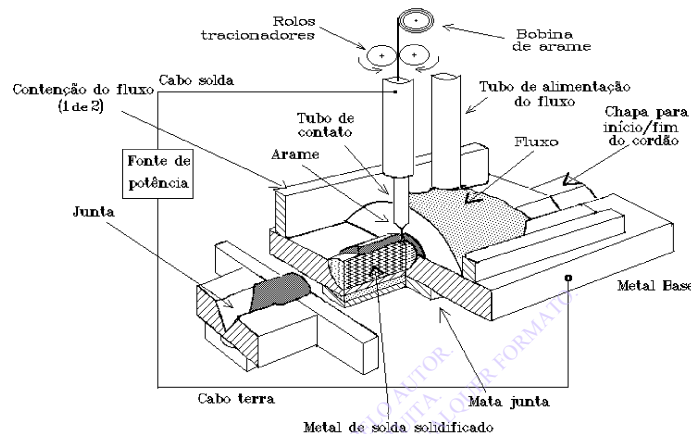


Figura 5.2 - Equipamentos e acessórios (cabecote) Básicos para a Soldagem por Arco Submerso.

As fontes utilizadas são dos tipos transformador-retificador ou motor-gerador, fornecendo corrente contínua (CC); ou transformador para corrente alternada (CA). As mesmas geralmente apresentam curvas características tensão constante (“plana”), ou corrente constante (“tombante”), respectivamente.

Empregando CA com fonte convencional e curva característica tombante, a tensão de saída é senoidal e uma tensão de circuito aberto superior a 80 V deve ser utilizada, para se assegurar re-ignição do arco a cada inversão do ciclo. Assim mesmo, o arco pode se tornar instável com certos fluxos e o sistema de alimentação do arame deve ser “tensão-sensitivo”, com velocidade variável para manter constante o comprimento do arco (e tensão). Uma outra solução, é o emprego de um sistema de alimentação constante do arame; fonte com curva característica plana e CA com onda retangular na saída, tanto da tensão, quanto da corrente. Como há quase instantânea inversão da polaridade com esse tipo de onda, é minimizado o problema da re-ignição do arco.

Fontes que fornecem CC e curva característica plana, se utilizam do fenômeno de “auto-ajustagem” do comprimento do arco, o qual foi analisado no Capítulo 2. O mesmo consiste em manter

a velocidade de alimentação do arame constante, mas se ocorrer aumento, ou diminuição da corrente (devido à alteração da tensão), por decorrência da própria curva característica ocorre uma proporcional variação na taxa de fusão do arame se estabilizando, conseqüentemente, o comprimento do arco. Esses são os equipamentos mais empregados no arco submerso, podendo operar estavelmente em até cerca de 1000 A, ou em mais alta corrente.

O uso de fontes em CC e curva característica tombante, implica no emprego de um sistema “tensão-sensitivo”. Esse é um equipamento mais caro, mas que em geral apresenta melhor desempenho com arames de maior bitola, do que quando é utilizada CC e curva característica plana.

Portanto, a seleção da fonte de potência e controles mais convenientes depende do intervalo de corrente; diâmetro do arame; velocidade de soldagem; tipo do fluxo e aplicação específica. Dessa forma, os seguintes pontos devem ser considerados:

- Em geral, a corrente contínua (CC) permite um melhor controle da geometria do cordão; fá-

cil início do arco e acurado controle do comprimento do mesmo; soldas sobre contornos complicados e alta velocidade;

- A corrente contínua eletrodo positivo (CCEP) fornece o arco mais estável; melhor controle da geometria do cordão e maior penetração;

- A corrente contínua eletrodo negativo (CCEN) resulta na maior taxa de deposição, com a menor penetração;

- A corrente alternada (CA) produz penetração intermediária entre CCEP e CCEN; minimiza a deflexão magnética; é utilizada preferencialmente em correntes acima de 1000 A e nos arames secundários em soldas multi-arames (veja mais adiante), devido ao campo magnético formado e deflexão resultante;

- O sistema de “auto-ajustagem” é tanto mais efetivo, quanto menor for a bitola do arame pois, assim, a resposta é mais rápida. Com arames de diâmetro maior do que 4 mm, pode ser mais vantajoso o uso do sistema “tensão-sensitivo”. Entretanto, em fonte cujos componentes não são de estado sólido, há flutuações na corrente e tensão, devido à inércia do sistema.

Uma importante operação é aquela do início

do arco, sendo mais difícil sua realização com fontes de corrente alternada e com curva característica do tipo tombante. Geralmente são empregados os seguintes artificios: (a) Formar uma pequena bola de “palha de aço”; baixar o arame até que o mesmo comprima a bola pela metade; aplicar o fluxo e energizar; (b) Cortar a ponta do arame de forma aguda; colocar o arame em contato com a peça; aplicar o fluxo e energizar; (c) Simplesmente baixar o arame até o mesmo manter leve contato com a peça; aplicar o fluxo e energizar; este método é grosseiro e nem sempre funciona; (d) Existindo uma poça de fluxo ainda no estado fundido, basta colocar o arame na mesma e energizar; em geral, na solda com múltiplos arames, os secundários são energizados desta forma; (e) Quando o equipamento é especificamente projetado para a aplicação pretendida, pode-se utilizar o método de “retração” do arame, ou seja, o mesmo é posto em contato com a peça e coberto com fluxo; quando o arame funde, automaticamente o sistema retrai o eletrodo e a soldagem inicia; (f) Utilização de uma fonte de alta frequência e tensão-similar àquela empregada em TIG (Capítulo 7); com a simples aproximação do arame à peça ($\pm 1,5$ mm), o arco inicia.

CONSUMÍVEIS

Os **arames** para arco submerso podem ser fabricados com todos os materiais citados na Introdução e classificados no livro “Sistemas de Especificação dos Consumíveis para Soldagem e Braçagem” dessa série. Aqueles de aço ao carbono e baixa liga são geralmente recobertos com um fino revestimento de cobre, exceção feita para os destinados a aplicações na indústria nuclear. O cobre facilita o contato elétrico; diminui o desgaste do tubo de contato e aumenta a resistência à corrosão do arame.

Na **Tab. 5.1** são apresentados os intervalos típicos de corrente, recomendados para diferentes bitolas de eletrodos de aço ao carbono e baixa liga.

O arame é fornecido em bobinas, cujo peso varia normalmente entre 10 e 200 kg. As especificações geralmente determinam o diâmetro mais recomendado para estas bobinas, em função da bitola e do material do mesmo. Como mostrado na **Tab. 5. 1**, cada bitola de arame pode operar num intervalo de centenas de Amperes e, para uma mesma corrente, o menor diâmetro provocará maior penetração e apresentará maior taxa de deposição.

Tabela 5.1 - Intervalos de Corrente Típicos do Arco Submerso para Diferentes Bitolas de Eletrodos (Aços ao Carbono e Baixa Liga)

Diâmetro (mm)	Intervalo de Corrente (A)	Diâmetro (mm)	Intervalo de Corrente (A)
1,6	150-400	4,0	400-1000
2,0	200-600	4,8	500-1100
2,4	250-700	5,6	600-1200
3,2	300-900	6,4	700-1600

Os principais **fluxos** utilizados em Arco Submerso podem ser dos tipos fundidos, aglomerados, ou sinterizados. Os mesmos são compostos por minerais fusíveis, cujos tipos e proporções dependem do método de fabricação e finalidade, sendo que a Tab. 4.1 do **Capítulo 4** indicou os minerais mais utilizados e o livro acima citado apresenta suas classificações. A granulometria do fluxo é um fator importante, seja qual for seu tipo, ou método de fabricação, sendo que a mesma influi diretamente sobre a máxima intensidade de cor-

rente permitida. De forma geral, fluxos compostos por maior parte de grãos pequenos, permitem maior corrente do que com grãos grosseiros. O uso de corrente muito alta com essa última granulometria predominando, provocaria instabilidade do arco e variação na geometria do cordão.

A seguir são apresentadas as principais características dos fluxos, sob o ponto de vista do processo de fabricação dos mesmos.

❑ Fluxos Fundidos

Esses fluxos são fabricados através da mistura a seco dos compostos e, então, fundidos (geralmente num forno a arco). Numa temperatura em torno de 1600 °C, o banho é vazado na água, ou sobre uma superfície metálica. Esse choque térmico reduz o fluxo a partículas de tamanhos variados, que são peneiradas e classificadas em intervalos tais como 12 x 150 (12 “mesh” por 150 “mesh”), ou seja, todas as partículas passam por peneira com abertura de 1,4 mm e as restantes são retidas naquela com 0,1mm. Dependendo do caso, essas partículas são, ainda, moídas para alcançar as granulometrias desejadas.

As mais importantes propriedades desses fluxos são:

- Não são higroscópicos e, portanto, requerem menores cuidados com sua estocagem, além de praticamente não introduzirem hidrogênio no metal de solda;
- Possuem muito boa homogeneidade química;
- Podem ser utilizados com a menor velocidade de soldagem;
- Permitem a retirada dos finos (partículas muito pequenas), sem alteração significativa na granulometria, ou composição;
- Como importante desvantagem, estes fluxos não permitem adições de compostos desoxidantes durante sua fabricação.

❑ Fluxos Aglomerados

Também são fabricados através da mistura a seco dos compostos, os quais devem estar na forma de pó fino. Em seguida, é adicionada uma solução aquosa de silicato de potássio; ou de silicato de sódio; ou de ambos. A massa resultante é pelletizada; seca à temperaturas de até 800 °C; reduzida mecanicamente à partículas que são, então, peneiradas e classificadas.

As principais propriedades desses fluxos são as seguintes:

- Os mesmos são altamente higroscópicos e, portanto, a estocagem e ressecagem antes do uso é crítica, sob pena da introdução de hidrogênio no

metal de solda;

- Os finos não podem ser retirados sem causar alguma alteração na composição, bem como existe a possibilidade de segregação de compostos durante a fabricação;
- Como importante vantagem, se encontra a de que desoxidantes e elementos de liga podem ser adicionados, pois a temperatura da fabricação dos mesmos é relativamente baixa;
- A escória solidificada é, em geral, facilmente destacada da superfície do cordão;
- Sendo sua densidade menor, é possível utilizar uma camada mais espessa de fluxo, permitindo uma melhor proteção da poça de fusão.

❑ Fluxos Sinterizados

São fabricados de maneira similar aos aglomerados, com a diferença de que um aglomerante cerâmico é utilizado. Após a peletização, o fluxo é sinterizado em temperaturas da ordem de 1400 °C, sendo muito limitado o uso de desoxidantes, à exemplo dos fluxos fundidos. Provavelmente por esta razão, esse método de fabricação não é muito difundido.

Uma outra metodologia para classificar os fluxos utilizados na soldagem dos aços, é aquela adotada pela AWS.

Esta classificação baseia-se no princípio, de que a tensão de soldagem é diretamente proporcional à largura da poça de fusão e, conseqüentemente, provoca modificações na interação do fluxo com a mesma, resultando alterações na composição química do metal de solda. Deve-se salientar, que esse método de classificação não fornece informações diretas sobre a tenacidade do metal de solda. Portanto, segundo a AWS os fluxos também podem ser classificados como:

❑ Fluxos Neutros

São aqueles que não provocam alteração nos teores de manganês e silício do metal de solda, mesmo ocorrendo modificação da tensão, sendo próprios para soldagem multipasse sobre chapas espessas.

Um fluxo é considerado neutro, quando o “Número de Neutralidade de Wall (N)” é igual ou menor do que 40. Para o cálculo do “N” devem ser confeccionados dois corpos de prova para análise química (ou “almofadas”) com 4 camadas, sendo que no primeiro os cordões são depositados com as condições de soldagem próprias para a aplicação proposta e no segundo a soldagem é realizada com a tensão 8 V maior. O “N” resulta,

então, da variação em módulo (ou seja, do valor absoluto, não importando os sinais) da porcentagem dos elementos silício e manganês, conforme resultado das análises químicas efetuadas sobre o material da última camada em ambos os casos.

A fórmula utilizada é a seguinte:

$$N = 100(|\Delta Si| + |\Delta Mn|) \quad [5.1]$$

Apesar deste ser o comportamento para a maioria dos fluxos neutros e os mesmos não possuem adições intencionais de manganês e silício (na forma de ferro liga, ou metálica), alguns tipos contêm compostos químicos que se decompõem e afetam a composição química do metal de solda.

Nesse caso, poderão ser alterados os teores dos elementos citados, além do carbono (reduzido, devido ao oxigênio livre liberado por compostos do fluxo) e dos elementos de liga, notavelmente o cromo.

Por outro lado, como os fluxos neutros praticamente não possuem desoxidantes, os mesmos devem ser utilizados sobre metal base livre de oxidação, sob pena de se formar intensa porosidade e/ou trincas longitudinais no centro do cordão de solda.

❑ Fluxos Ativos

Nesse caso, a alteração da tensão resulta na modificação do conteúdo de silício e manganês do metal de solda, pois estes fluxos contêm tais elementos. Dessa forma, os mesmos são recomendados para passe único e o metal base pode se encontrar oxidado. Entretanto, caso sejam utilizados para multipasse, a tensão deve ser rigidamente controlada.

❑ Fluxos Ligados

Esses fluxos contêm elementos de liga e desoxidantes, podendo ser utilizados com arame de aço ao carbono para produzir metal de solda com a composição química desejada. Em consequência, a variação da tensão afeta profundamente o resultado final, bem como deve ser avaliado o efeito da possível heterogeneidade que o metal de solda venha a apresentar.

A composição dos fluxos depende, entre outros, de fatores relacionados com o método de fabricação empregado; propriedades mecânico/metálicas desejadas para o metal de solda e procedimentos de soldagem utilizados. A **Tab. 5.2** mostra várias formulações típicas para os fluxos empregados em arco submerso, segundo o IIW.

Tabela 5.2 - Tipos de Fluxos para Arco Submerso, Classificados por seus Principais Compostos Químicos (International Institute of Welding - IIW)

Designação	Compostos (%)							
	SiO ₂	TiO ₂	ZrO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	CaF ₂
Silicato de Cálcio (Ácido)	50-60	-	-	3-5	-	25-30	8-12	2
Silicato de Cálcio (Neutro)	30-40	-	-	10-15	0-5	25-30	10-15	5-10
Silicato de Cálcio (Básico)	30-40	-	-	3-5	-	35-45	0-5	10-15
Totalmente Básico	5-12	-	-	10-15	-	10-15	30-40	20-30
Alumina (Básico)	5-15	0-5	0-5	20-50	5-15	0-5	5-15	5-15
Alumina-Rutílico (Neutro)	10-20	5-15	0-15	20-50	10-20	0-5	-	0-10
Rutílico (Neutro)	5-20	5-25	-	0-10	5-10	10-20	-	0-20
Silicato de Manganês (Ácido)	30-40	-	-	0-10	35-45	0-10	-	0-10

Outrossim, ocorrem intensas reações metal/es-cória durante a soldagem e elementos químicos são transferidos em ambos os sentidos. A exemplo do que se passa com os eletrodos revestidos, a tenacidade diminui com a acidez do fluxo e aumenta com sua basicidade.

Sobre aços, fluxos com alto teor de sílica (ácidos) transferem oxigênio para o metal de solda,

enquanto que os básicos produzem soldas com pequena população de inclusões e, conseqüentemente, maior tenacidade. Apesar de não ser o propósito aprofundar o estudo desse assunto nesse volume, é interessante saber que na soldagem se utiliza um “Índice de Basicidade” (**IB**) para os fluxos, no sentido metalúrgico, à exemplo daquele empregado pelos aciaristas, tal como o seguinte:

$$IB = \frac{CaO + CaF_2 + MgO + BaO + SrO + Li_2O + K_2O + Na_2O + (MnO + Fe)/2}{SiO_2 + (Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)} \quad [5.2]$$

Esta fórmula (desenvolvida empiricamente) não é aplicável para todos os fluxos existentes. Entretanto, a mesma é largamente empregada, pelo menos para os fluxos classificados pelo IIW. Aproximadamente, se o IB for menor do que 1, o fluxo é ácido; neutro entre 1,5 e 2 e básico acima desse valor.

Em geral, os fabricantes não fornecem a de-

talhada composição dos fluxos que produzem (fato compreensível por se tratar de segredo industrial). Entretanto, seria desejável que, pelo menos, uma classificação como a do IIW fosse indicada, pois a mesma, combinada com o IB e as informações constantes na **Tab. 5.3**, em muito auxiliaria o usuário a melhor escolher o produto que mais lhe convém.

Tabela 5.3 - Tipos de Fluxos para Arco Submerso (IIW) e Aplicações

Característica†	Silicato de Cálcio (Ácido)	Silicato de Cálcio (Neutro)	Silicato de Cálcio (Básico)	Totalmente Básico	Alumina (Básico)	Alumina Rutilico (Neutro)	Rutilico (Neutro)	Silicato de Manganês (Ácido)
Corrente (máxima)	Alta (2500A)	Média	Média	Média	Alta (1200A)	Alta	Média	Alta (1100A)
Tolerância à Oxidação	Sim	Sim	Não	Não	Não	Sim	Não	Sim
Tenacidade	Baixa	Média	Alta	Alta	Alta	Baixa	Alta	Média
Resistência à Tração	Média	Média	Média	Alta	Alta	Média	Alta	Média
Velocidade	Média	Média	Alta	Média	Alta	Alta	Alta	Alta
Passes	Único	Múltiplos	Múltiplos	Múltiplos	1 e 2	1 e 2	Múltiplos	Único
Fabricação	Aglomerado ou Fundido	Aglomerado ou Fundido	Aglomerado ou Fundido	Aglomerado	Aglomerado	Aglomerado ou Fundido	Aglomerado	Fundido
Aumento‡	Si	Não*	Não	Não*	Mn	Não*	Não*	Mn, Si
Decréscimo‡	C, Mn	Não*	Não	S, Si, Mn	Não*	Não*	S, Si, Mn	C

† As propriedades se referem ao metal de solda; ‡ Aumento, ou decréscimo de elemento químico no metal de solda; * Pode existir muito pequena variação em todos os casos

Para atender os objetivos de proteger a poça de fusão da atmosfera; fornecer em grande parte as propriedades mecânicas do metal de solda e satisfazer necessidades operacionais, o fluxo deve possuir uma série de características físico-químicas, entre outras as seguintes: densidade aparente (no estado sólido); intervalo de fusão; expansão térmica; tensão superficial; condutividade elétrica (no estado líquido); viscosidade.

Em síntese, nesse estágio é importante se entender que o fluxo é um consumível extremamente complexo, cujas interações com o meio são complicadas e ainda não completamente entendidas.

Portanto, além do seu preço, diversos fatores devem, ainda, ser considerados na seleção de um fluxo, se destacando:

- O conhecimento da sua composição química, ou, pelo menos, do seu Índice de Basicidade;
- A previsão das mais importantes interações que os seus compostos realizam entre si e com os metais envolvidos;
- O conhecimento de algumas das suas ca-

racterísticas físico-químicas e, também, da escória;

- A facilidade de operação que o mesmo apresenta e sua higroscopia;
- A sua tendência em transferir oxigênio para o metal de solda;
- A possibilidade do mesmo conter elementos desoxidantes e de liga;
- A influência geral desse consumível, sobre as propriedades mecânicas do metal de solda;

Como acima mencionado, uma detalhada descrição dos fluxos e arames se encontra no livro dessa série “Sistemas de Especificação dos Consumíveis para Soldagem e Brasagem”. Entretanto, por conveniência é aqui apresentada a classificação AWS A5.17, cuja simbolização resumida é a seguinte:

AWS FUXY-EZZZ

O primeiro bloco (FUXY) é relativo à classificação do fluxo, enquanto o segundo (EZZZ) ao eletrodo (arame).

Para o fluxo: (a) F, designa fluxo; (b) U, a mínima resistência à tração, em incrementos de 10.000 psi (69 MPa), do metal de solda que esse fluxo deposita com certos arames; (c) X, as condições de tratamento térmico após a soldagem, que o metal de solda sofreu antes dos ensaios mecânicos, sendo “A” para “como soldado” (sem tratamento térmico) e “P” quando ocorreu algum tipo (detalhado na especificação); (d) Y, a menor temperatura que o metal de solda resiste ao impacto e alcança, ou excede 20 ft.lb (27 J).

Com relação ao arame: (a) E, para eletrodo maciço e EC para compósito; (b) ZZZ, podendo conter mais de três dígitos, especifica a composi-

ção química do arame, sendo típicos as combinações EL12, EM12K, EH14.

Por exemplo, F6A2-ELK8 especifica um fluxo que combinado com o arame ELK8, deve depositar um metal de solda com resistência mínima à tração de 60.000 psi (414 MPa) no estado “como soldado”, possuindo uma resistência ao impacto igual, ou maior, do que 20 ft.lb (27 J) à 20 °F (-29 °C).

O sistema de classificação dos consumíveis de arco submerso para aços baixa liga inclui, ainda, sufixos indicando o conteúdo de hidrogênio difusível do metal de solda, numa escala similar àquele para eletrodos revestidos (Capítulo 4).

VARIÁVEIS DE PROCEDIMENTO

É essencial (em qualquer processo de soldagem) que se conheça os efeitos das variáveis operacionais, sobre as características da junta soldada. No arco submerso, o domínio dessas relações assume grande importância, pois a poça de fusão não é visível e o processo é geralmente empregado em produções elevadas.

Entre as variáveis mais importantes, encontram-se:

□ Variáveis Pré-Selecionadas

Como já visto em Eletrodos Revestidos (Capítulo 4), são aquelas escolhidas antes da realização da solda e não podem ser alteradas de forma simples após seu início, consistindo em:

▪ Tipo de Eletrodo

A composição química do arame deve ser cuidadosamente escolhida e considerando-se o fluxo que será utilizado. Como mostrado na **Tab. 5.3**, alguns fluxos provocam ganho/perda de elementos químicos no metal de solda, principalmente C, Si e Mn. Outrossim, a produção de defeitos no cordão pode ser resultado da falta de elementos desoxidantes, tal como o manganês, o qual também atua sobre as propriedades mecânicas do metal de solda;

▪ Diâmetro do Eletrodo

Depende diretamente da aplicação e do equipamento disponível. No caso da utilização semi-automática desse processo, a bitola do arame deve ser no máximo cerca de 2,0 mm, pois não seria prático manejar a tocha com maiores diâmetros devido à rigidez do cabo. Quando não existir um bom ajuste da junta, eletrodos de maior diâmetro facilitam a realização da solda e foi mostra-

do na **Tab. 5.1** os intervalos de corrente recomendados para cada bitola;

▪ Tipo de Fluxo

Os fluxos devem ser escolhidos com base na aplicação específica da solda; condições do metal base; propriedades mecânico/metálicas desejadas (conforme **Tab. 5.3**) e combinação com o arame. Para aplicações que requerem alta tenacidade no metal de solda, fluxos básicos devem ser preferidos;

▪ Granulometria do Fluxo

Essa propriedade do fluxo deve ser selecionada, considerando a intensidade da corrente; a velocidade de soldagem; tipo de fluxo e geometria do cordão de solda, além das condições da superfície do metal base. Uma proporção muito alta de finos no fluxo, faz com que os gases produzidos escapem com mais dificuldade e esse fato pode provocar uma superfície irregular (“corcovas”) no cordão. Outrossim, com altas correntes (>1000 A) devem ser utilizados fluxos com granulometria mais fina, pois produzem um cordão mais largo e plano. O emprego de granulometrias muito grandes com altas correntes, pode provocar instabilidade do arco e diminuir a qualidade superficial do cordão. Para soldas sobre superfícies oxidadas, se recomenda o uso de fluxo com maior granulometria, pois os gases serão mais facilmente liberados. Note-se que o tamanho das partículas de um fluxo corresponde às malhas por poadas linear numa peneira (1 poadada = 25,4 mm). Tamanhos de partículas iguais ou menores do que 250 são muitas vezes referidas como finos e utilizada a letra “D” para representá-las. Dessa forma, 48 x 270 (ou 48 x D) indica que 90 a 95% das partículas passarão por peneira que tem 48 aberturas.

turas por polegada linear e que somente 2 a 5% passarão por outra que possui 270 aberturas por polegadas linear.

A **Tab. 5.4** apresenta as intensidades de corrente recomendadas em função da distribuição granulométrica dos fluxos.

Tabela 5.4 - Intensidades de Corrente Usuais em Função da Granulometria dos Fluxos

Distribuição Granulométrica	Intervalo de Corrente (A)
8 x 48; 14 x 48; 12 x 65; 10 x 150	Até 1100
12 x 150	600 à 1100
12 x 200	600 à 1750
20 x 200; 35 x 200	600 à >1750

□ Variáveis Ajustáveis

Essas são aquelas que podem ser alteradas de forma rápida e até durante a soldagem, pelo próprio operador, constando de:

▪ Corrente de Soldagem

Esse parâmetro possui extrema importância, pois é diretamente proporcional à penetração e taxa de fusão. A **Fig. 5.3** mostra a relação entre intensidade de corrente; bitola de arame e variantes do processo (as quais serão explanadas mais adiante), com a taxa de fusão. Como foi anteriormente mencionado, o processo opera com qualquer tipo de corrente. A CCEP é largamente utili-

zada, sendo indicada para solda de grande penetração e alta velocidade, com menor tendência a porosidade (exceto em aço com altos conteúdos de P e S). A CCEN oferece uma taxa de deposição cerca de 1/3 maior do que CCEP, com menor penetração e aumento da tensão para uma mesma geometria de cordão. A CA é indicada para eletrodos múltiplos e onde exista problemas de “sopro” magnético, apresentando taxa de deposição e penetração intermediárias entre as polaridades da CC;

▪ Tensão de Soldagem

Esse outro parâmetro, diretamente proporcional ao comprimento do arco, é o principal responsável pela largura do cordão de solda. Mantidas as outras condições inalteradas, um aumento da tensão produz cordão mais largo e plano e, adicionalmente, resultam os seguintes efeitos: (a) O consumo de fluxo aumenta; (b) Diminui a porosidade causada por oxidação ou carepa sobre a superfície da chapa; (c) A soldagem de juntas mal posicionadas é facilitada; (d) Aumenta a transferência de elementos de liga desde o fluxo para o metal de solda;

▪ Velocidade de Soldagem

Mantido os outros parâmetros constantes, com o aumento da velocidade de soldagem ocorre uma redução geral das dimensões do cordão de solda (pois é diminuída a energia de soldagem) bem como da penetração. Uma velocidade excessiva pode provocar defeitos, como porosidade e mordedura, além de produzir cordões convexos (os quais são mais suscetíveis a trincas);

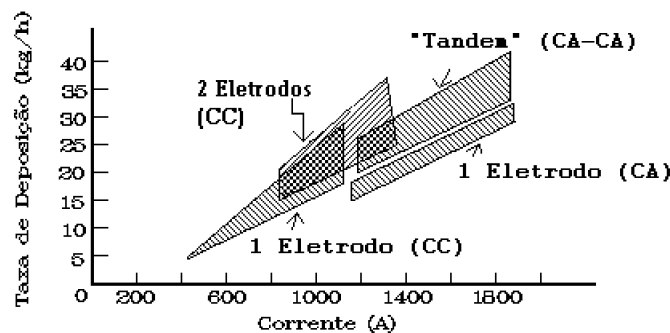


Figura 5.3-Influência da corrente sobre a taxa de fusão, para diferentes configurações de soldagem.

▪ Extensão do Eletrodo

O comprimento do eletrodo após o bico de contato afeta a taxa de deposição e a geometria do cordão. Quanto maior for essa extensão, mais quente fica o eletrodo antes de formar o arco, através do “efeito Joule” (I^2R), resultando numa maior taxa

de fusão do arame. Com o aumento da resistência, há uma queda da tensão no arco e aumenta a convexidade do cordão. Desta forma, um aumento da extensão deve ser seguido de ajuste para maior tensão. A extensão do eletrodo normalmente utilizada como ponto de partida, é cerca de 8 vezes o

seu diâmetro, sendo que não devem ser ultrapassados os seguintes valores: (a) Para diâmetros de arame entre 2,0 e 3,2 mm, extensão máxima de 70 mm; (b) Para diâmetros de arame entre 4,0 e 6,4 mm, extensão máxima de 120 mm. Com um arame somente, sem alterar a corrente, é possível obter aumentos de até 50% na taxa de deposição, através de maior extensão;

- **Largura e Altura da Camada de Fluxo**
A altura de fluxo sobre a poça de fusão afeta

profundamente a qualidade da solda obtida. Se a mesma for muito pequena, o arco ficará exposto, ou semi-exposto à atmosfera, com salpicos ocorrendo, resultando num metal de solda oxidado; com tendência a trinca induzida pelo hidrogênio; fragilizado pelo nitrogênio e com poros. O excesso de altura do fluxo provoca confinamento do arco e cria dificuldade para o escape dos gases produzidos. Isto resulta num cordão irregular e com possibilidade de conter porosidades.

TÉCNICAS OPERACIONAIS

INTRODUÇÃO

O arco submerso alcançará um nível ótimo de estabilidade, se operar num intervalo de tensão adequado para cada intensidade de corrente determinada. A **Fig. 5.4** mostra esse intervalo, para soldas de aços ao carbono e baixa liga realizadas a topo (T) e filete (F), sendo a mesma somente um guia, pois o diâmetro do arame influi na tensão, apesar que de forma não muito significativa.

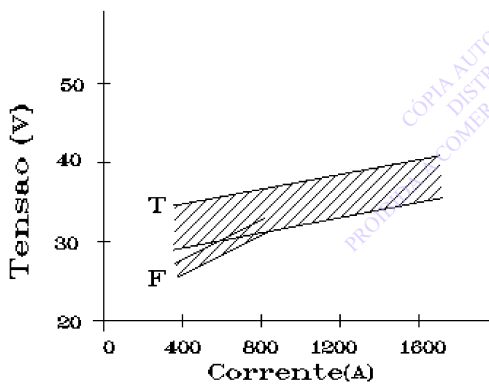


Figura 5.4 - Relação entre Corrente e Tensão para a Soldagem sobre Juntas a Topo (T) e Filete (F).

Devido às características desse processo, seria interessante prever a geometria do cordão, uma vez estabelecido o tipo da junta a ser utilizada, sendo possível, assim, pré-selecionar os parâmetros de soldagem. Várias equações foram propostas para realizar essa previsão, porém nenhuma reflete com exatidão o que ocorre na prática.

Por outro lado, a taxa de deposição (TD) pode aproximadamente ser estimada através da seguinte equação:

$$TD = A \times (B + C) \quad (\text{kg/h}) \quad [5.3]$$

onde:

$$A = I \times 4,5359 \times 10^{-7}$$

$$B = 0,35 + \frac{d^2}{645}$$

$$C = 2,08 \times 10^{-7} \times \left(\frac{I \times E \times 25,4}{d^2} \right)^{1,22}$$

sendo:

E = extensão do eletrodo (mm) após o bico de contato;

I = corrente de soldagem (A);

d = diâmetro do eletrodo (mm);

Diversos métodos são utilizados para suportar o metal de solda fundido na raiz da junta, já que esse é um processo de alta penetração e o presente problema típico para o mesmo. Bastante difundido é o emprego de fluxo sob a raiz do cordão, ou suportes cerâmicos. Por outro lado, o uso de um cobrejunta não fusível (geralmente de cobre, devido à sua alta condutividade térmica), conforme indicado na **Fig. 5.5**, permite obter penetração completa num passe somente.

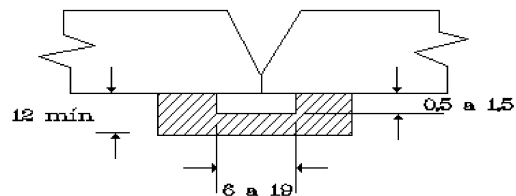


Figura 5.5 - Cobrejunta não Fusível para Suportar o Passe de Raiz em Arco Submerso.

Uma outra técnica largamente empregada, é aquela em que o passe de raiz é realizado com, por exemplo, eletrodo revestido, podendo esse

passar ser efetuado no mesmo lado ou no outro lado da junta (“selagem”). O passe de raiz pode fazer parte da junta no final, ou ser removido por goivagem após realizado o cordão com arco submerso.

Por outro lado, o cobrejunta fusível é um clássico recurso para este caso, com o inconveniente de permanecer soldado, ou ter que ser retirado (com custos adicionais) após a operação. Uma importante precaução, é aquela de que o metal do mesmo seja compatível com o metal de solda, pois há de se considerar a diluição.

VARIANTES DO PROCESSO

O arco submerso é um dos processos que apresenta o maior número de variações nas técnicas para sua aplicação. As mesmas possibilitam aumentar significativamente a taxa de deposição, ou empregos específicos (tal como recobrimento protetor), sendo os seguintes mais importantes:

▪ Adição de Pó de Ferro

Essa é uma técnica relativamente simples e não exige alteração do equipamento já existente. Ela consiste em adicionar pó de ferro ao metal de solda, aumentando sensivelmente a taxa de deposição (em até 77% com um único arame). O pó normalmente utilizado contém cerca de 85-95% de ferro; elementos de (baixa) liga e potentes desoxidantes (Al, Ca, Zr, etc.). Aquele de granulometria fina pode ser empregado em juntas mal preparadas, enquanto o de maior granulação encontra uso geral, sendo operado preferencialmente em CCEP.

Diversas são as formas que o pó de ferro pode ser adicionado, sendo as três seguintes mais usuais: (a) À frente do fluxo, pelo mesmo sistema em que este é depositado, com o reservatório do pó antecedendo o mesmo; (b) Através do arame, utilizando a atração do campo eletro magnético gerado no mesmo; (c) Misturado com o fluxo (raramente).

Saliente-se que a adição de pó de ferro altera a distribuição da energia do arco, pois parte da mesma é utilizada para fundi-lo. Outrossim, deve ser levado em consideração, que a composição química do metal de solda sofre grande influência com essa adição. Como conseqüência, a geometria e propriedades mecânicas da junta são modificadas

▪ Chanfro Estreito (“Narrow-Gap”)

Essa técnica utiliza juntas com ângulos do

chanfro extremamente pequenos, conforme ilustrado na **Fig. 5.6**. Suas principais vantagens, com relação ao arco submerso convencional são: (a) Menor massa de metal de solda depositado; (b) Menor distorção e tensão residual; (c) Maior economia de tempo e consumível. Algumas desvantagens normalmente observadas, resumem-se à facilidade com que defeitos podem ocorrer e à dificuldade de removê-los. As razões para esses prós e contras ficarão claras a seguir.

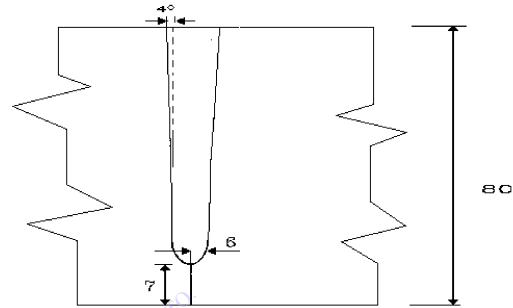


Figura 5.6 - Junta Típica para Soldagem em Chanfro Estreito (“Narrow-Gap”) com Arco Submerso.

Os diâmetros dos eletrodos normalmente utilizados variam entre 2 e 5 mm. Um diâmetro menor do que 2 mm causa oscilação do arco, resultando falta de fusão na parede do chanfro e variação da largura do cordão. Por outro lado, diâmetros maiores do que 5 mm levam à excessivo desgaste do bico de contato, afetando a estabilidade do arco e o posicionamento do eletrodo. De maneira geral, se recomenda os seguintes diâmetros de arame, em função da espessura da chapa: (a) Espessura de até 140 mm: bitola de 3 mm; (b) Espessura entre 140 e 400 mm: bitola de 4 mm; (c) Espessura entre 400 e 700 mm: bitola de 5 mm.

O chanfro que será realizado depende de critérios relacionados com a tendência à trinca de solidificação do metal de solda; facilidade de remoção da escória e taxa com que se deseja preencher a junta. Para evitar trinca de solidificação, é importante que o fator de forma (ou seja, a razão entre a altura e a largura do cordão) mantenha-se pequeno, o que também facilita a remoção de escória. Para que isso seja alcançado, a abertura de raiz deve ser compatível, dependendo do número de passes por camada e espessura da chapa soldada.

A soldagem em passe único por camada é especialmente sensível ao problema da destacabilidade da escória; requer acurado posicionamento

do eletrodo; sofre grande alteração geométrica do cordão, com relativamente pequenas alterações dos parâmetros (principalmente tensão) e é mais suscetível à trinca de solidificação.

O uso de dois passes oferece maior flexibilidade na escolha das variáveis, requerendo que a abertura seja de 4,5 a 6,5 vezes o diâmetro do eletrodo. Soldas realizadas com três passes por camada se justificam somente para chapas com espessura maior do que 300 mm e, nesse caso, a distância de raiz geralmente utilizada é 35 mm.

Há de ser considerado, ainda, a distância do centro do arame à face dos chanfros. A mesma precisa permitir penetração lateral no chanfro; formar um ângulo obtuso, que permita fácil retirada da escória e não ser tão pequena, a ponto de ocorrer arco acidental entre o bico de contato e a parede do chanfro. Outrossim, quanto menor esta distância, mais grosseiros serão os grãos da ZAC.

Por outro lado, o cabeçote utilizado em Chanfro Estreito deve ser especialmente projetado para esse fim, sendo um exemplo aquele desenvolvido no Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas (LS&TC) e mostrado na Fig. 5.7.

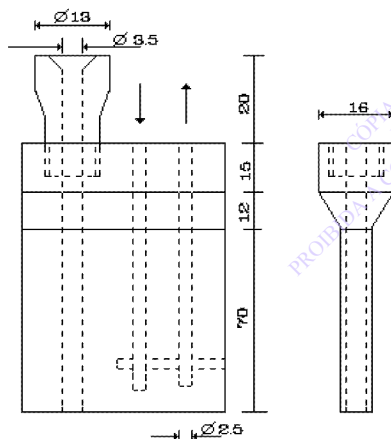


Figura 5.7 - Cabeçote para Soldagem por Chanfro Estreito Desenvolvido no LS&TC (dimensões em mm).

Por sua vez, a taxa de deposição no arco submerso também pode sofrer grande aumento, através do emprego de eletrodos múltiplos. Os sistemas empregados se diferenciam pelo número de eletrodos; tipo de conexão da(s) fonte(s) de potência e posição dos eletrodos com relação à direção de soldagem.

As seguintes variantes são normalmente utilizadas:

❑ Adição de Arame Auxiliar Sem Conexão Elétrica (“Arame Frio”)

Esse arame adicional não conduz corrente elétrica e é alimentado continuamente sob a escória fundida, na lateral do arco, podendo ser maciço ou tubular. O aumento da taxa de deposição alcança até cerca de 40%, com pequeno acréscimo de fluxo fundido. Além disso, as propriedades mecânicas em geral do metal de solda são melhoradas, podendo ser um valioso recurso na eliminação de trincas de solidificação. O tubo de alimentação deve manter um ângulo próximo de 20° com a junta e situar-se em torno de 20 mm de distância do arco;

❑ Adição de Arame Auxiliar Aquecido Resistivamente (“Arame Quente”)

Nesse caso, o arame auxiliar é conectado eletricamente, mas não forma arco, sendo aquecido resistivamente (I^2R) entre o bico de contato e a peça. Normalmente a fonte auxiliar é CA, para evitar “sopro” magnético, com curva característica levemente tombante e máxima tensão de circuito aberto de 15 V. O arame auxiliar é alimentado na poça de fusão cerca de 15 mm à frente do arame principal, num ângulo aproximado de 50° com a junta, sendo seus parâmetros ajustados antes da soldagem iniciar. O arame quente permite grandes aumentos na taxa de deposição, com pequena redução da penetração;

❑ Arames em Paralelo, com Fonte de Potência Única

Nesse sistema, dois ou mais arames são conectados na mesma fonte de potência, utilizando um único sistema de alimentação e, portanto, com a mesma tensão. Tipicamente, os diâmetros de eletrodos utilizados variam entre 1,6 e 3,2 mm, espaçados de 7 a 15 mm. O uso de CC faz com que seja provocada convergência do arco, enquanto ocorre divergência com CA, valendo os mesmos conceitos de taxa de deposição, estabilidade do arco e penetração do arco submerso convencional. Essa variante permite aumentos da taxa de deposição em até 50%. Desejando-se realizar revestimentos, é conveniente utilizar CCEN, enquanto que juntas normalmente são soldadas com CCEP. A operação pode se desenrolar com os dois arames posicionados transversalmente ao cordão de solda, com pequena penetração e baixa diluição, ou com os dois na direção da solda (em “tandem”), resultando em maior penetração e diluição, além de permitir mais alta velocidade de soldagem;

□ Arames em Série, com Fonte de Potência Única

Dirigido principalmente para aplicações de revestimento protetor, esse sistema utiliza arames alimentados individualmente e conectados aos pólos opostos de uma mesma fonte de potência. Dessa forma, a corrente circula de um eletrodo para o outro através da poça de fusão e metal base adjacente, com arcos entre cada eletrodo e a peça. Os eletrodos são posicionados num ângulo relativo de 45°, podendo operar transversalmente à direção de soldagem, com baixa penetração e diluição, ou em “tandem”, com maior dificuldade para se obter reduzida penetração. Em CC os arcos tendem a se repelir, com o eletrodo conectado ao pólo positivo provocando maior penetração do que o negativo. A CA fornece uma geometria do cordão constante, sendo preferida para a soldagem dos metais ferrosos;

□ Sistemas com Arames Alimentados Independentemente e Fontes Múltiplas

Vários arames conectados a fontes de potência independentes podem operar simultaneamente, sendo geralmente em número máximo de quatro, limitação essa relativa ao investimento de capital necessário. Para uma melhor avaliação do efeito sobre a produtividade desses sistemas, é necessário reconhecer que quatro arames podem depositar até 95 kg/h a 38 mm/s (!), enquanto um arame somente deposita em média 12 kg/h a 7 mm/s. Portanto, a instalação de equipamentos deste tipo pode causar impacto na linha de produção e deve ser efetuada uma detalhada análise de sua real necessidade e conseqüências.

Um sistema de dois arames, com distintas fontes de potência, apresenta as opções de ambos eletrodos serem CC, ou CA, ou, ainda, um CC e o outro CA. A primeira possibilidade, em que os dois são CCEP, é raramente utilizada, já que provoca intenso “sopro” magnético, sendo as configurações usuais descritas abaixo:

▪ CC/CA

Um arranjo bastante utilizado é aquele em que o arame principal (ou seja, o primeiro) é conectado em CCEP e o secundário em CA. O CCEP opera em alta corrente fornecendo a penetração desejada, enquanto o CA, com menor corrente, ajusta a geometria do cordão;

▪ CA/CA

Outra opção bastante popular, por ser econômica e simples, é aquela em que os dois eletrodos são conectados em CA. Essa solução pode re-

sultar em deflexão dos arcos, dependendo da diferença de fase entre os mesmos, a qual deve se situar no intervalo de 60° a 140°, preferencialmente próximo do valor médio (100°).

Os transformadores padronizados em soldagem são, em geral, de dois tipos: (a) Aqueles nos quais se ajusta a corrente através de reatores variáveis em série com os cabos de conexão; (b) Os que permitem o ajuste da corrente pela variação do acoplamento magnético entre os enrolamentos primário e secundário. Qualquer um desses tipos podem ser empregados na conexão à rede trifásica, através da configuração denominada Scott, exibida na **Fig. 5.8(a)**. Se for requerida maior potência, outros transformadores são adicionados em paralelo, o que está ilustrado na **Fig. 5.8(b)**.

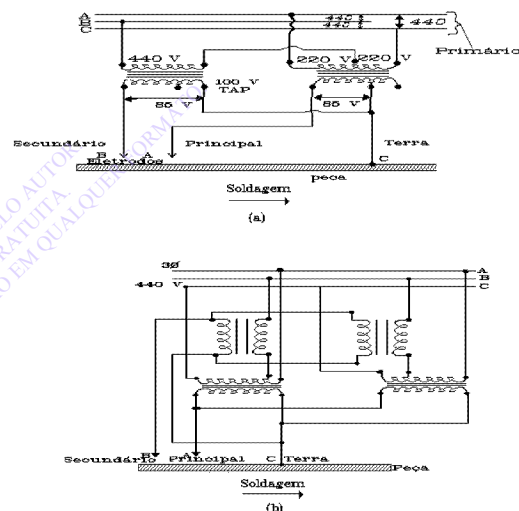


Figura 5.8 - Sistema de Fontes Múltiplas CA/CA. Configurações: (a) Scott; (b) Em Paralelo.

Esse tipo de conexão apresenta uma série de vantagens, pois transformadores padronizados com 220/440 V nos primários podem ser conectados com facilidade, resultando corrente com até 86% do rendimento original. Outrossim, o ângulo de fase entre o eletrodo principal e o auxiliar é satisfatório para um grande número de aplicações, apesar do mesmo apresentar algum desvio dos 90° teóricos. Além disso, essa conexão não necessita dos ajustes de corrente no cabo terra, sendo conveniente para soldas de passe único em chapas relativamente espessas e multi-passes em chanfros profundos, tais como aqueles encontrados na fabricação de vasos de pressão. Entretanto, a eliminação do ajuste da corrente no cabo terra diminui as relações que podem ser obtidas entre as correntes do arame principal e secundário. Isso pode di-

facultar a obtenção de soldas de boa qualidade, resultando numa menor velocidade de soldagem, em relação a outro tipo de conexão, conhecido como delta fechado.

Nesse sistema delta fechado, apresentado na **Fig. 5.9**, os transformadores devem possuir a mesma tensão de circuito aberto, com reatores em cada arame para controle da corrente, através da variação da impedância. Esses ajustes são interdependentes, sendo que se deve realizar várias tentativas, de forma que a relação entre as três correntes proporcione um ângulo de fase entre o eletrodo principal e o secundário, no intervalo de 80° a 110° . Esta configuração é mais flexível que a anterior (Scott), mas necessita três transformadores e, portanto, maior investimento de capital.

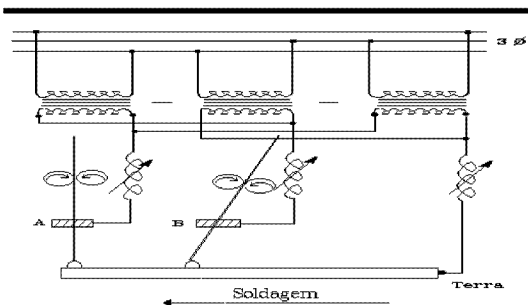


Figura 5.9 - Sistema Trifásico Delta Fechado.

A alimentação independente dos arames e o uso de fontes múltiplas com dois arames apresenta, ainda, os seguintes aspectos gerais:

- O eletrodo secundário deve operar com cerca de 85% da corrente do principal, sendo essa uma relação empírica. Em baixas velocidades de soldagem, essa regra não apresenta a mesma importância que possui em altas, quando então a geometria do cordão é profundamente afetada por esse parâmetro;
- Como na conexão Scott não é possível o ajuste individual da corrente terra, ela sempre será maior do que a do arame principal e do auxiliar;
- Seja qual for a conexão utilizada, a relação entre as correntes do arame principal; auxiliar e (cabo) terra, bem como o ângulo entre as fases (A), é definida num triângulo (de fases), tal qual aquele apresentado na **Fig. 5.10**;
- A rotação, ou seqüência das fases, tem pronunciado efeito sobre a qualidade da solda em altas velocidades. Este fator influencia a deflexão do arco e o ângulo da fase, regulando a relação tempo/polaridade das correntes envolvidas. A **Fig.**

5.11 ilustra uma rotação de fase utilizada com sucesso, na qual o ângulo de fase é 85° , ou seja, a corrente do arame secundário está defasada do arame principal nesse ângulo (em a). Ocorrendo uma inversão entre os arames, por exemplo na barra coletora, esse ângulo de fase passa (em b) a ser de 275° ($120^\circ + 155^\circ$).

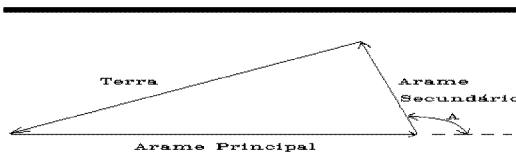


Figura 5.10 - Triângulo de Fases para um Sistema com Dois Arames.

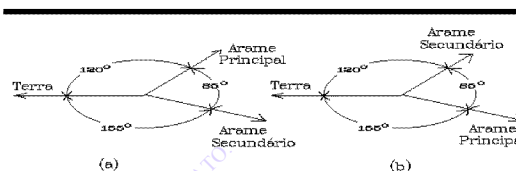


Figura 5.11 - Rotação de Fase num Sistema com Dois Arames.

Por sua vez, o emprego de três arames, numa combinação CC/CA/CA, ou CA/CA/CA, pode ser utilizado satisfatoriamente, por exemplo, na fabricação de navios; vasos de pressão e soldagem em espiral de tubos com grandes diâmetros em alta velocidade, no intuito de aumentar a produtividade. Os dois casos possíveis são, então:

▪ CA/CA/CA

Com o propósito de diminuir a incidência de problemas causados por sopro magnético e a inversão de capital, o sistema CA/CA/CA pode ser utilizado. No mesmo, os arames principal e intermediário são conectados em transformadores numa configuração Scott, enquanto a corrente do último arame é colocada em fase com a do principal, conforme mostrado na **Fig. 5.12**.

▪ CC/CA/CA

O eletrodo principal é CCEP, devido à melhor estabilidade do arco e alta penetração. Os outros dois eletrodos são conectados à transformadores, numa configuração do tipo Scott e possuem a função de realizar passes de enchimento. O eletrodo principal opera num ângulo de 90° com a junta; o central é levemente inclinado, com o último mais inclinado ainda, ambos na direção contrária à da soldagem. A grande vantagem desse sistema, é a habilidade de soldar um intervalo relativamente grande de espessuras (6 a 30 mm),

alterando somente a velocidade de soldagem;

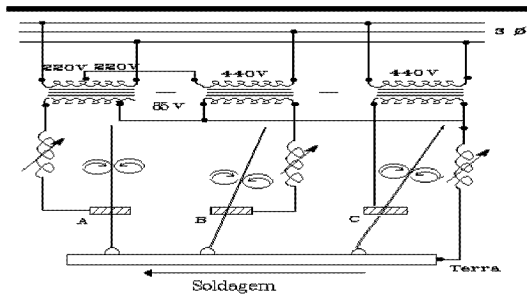


Figura 5.12 - Sistema com Três Arames CA/CA/CA.

□ Fitas

Uma operação de muito interesse para indústrias tais como química; petrolífera; petroquímica; nuclear, etc., é revestir grandes superfícies com um material protetor, utilizando como base outro tipo de menor custo. O revestimento de superfícies de aço ao carbono com aços inoxidável é uma aplicação típica.

Apesar desse revestimento poder ser realizado através do arco submerso convencional, ou com múltiplos arames, a utilização de fitas finas e

relativamente largas apresenta grandes vantagens, tal como depositar camadas com baixa penetração (e diluição), em grandes áreas num curto período de tempo. Conforme mostrado na Fig. 5.13(a), a fita é normalmente conectada em CCEN, pois essa polaridade possui as vantagens acima citadas, além de maior taxa de deposição. Outra variante é aquela ilustrada na Fig. 5.13(b), na qual uma fita sem conexão elétrica alguma (“fria”) é adicionada, o que decresce a diluição e aumenta ainda mais a taxa de deposição.

As fitas geralmente variam deste 25 a 100 mm de largura, sendo a de 60 mm mais utilizada e com espessura de 0,5 mm. A relação entre a massa de fluxo e massa da fita fundida é tipicamente 0,4. O arco não existe em toda a extensão da fita, mas oscila irregularmente, além de ocorrer em mais de um ponto ao mesmo tempo. Outrossim, a composição química do revestimento deve ser mantida dentro de limites aceitáveis, o que também é influenciado pelo tipo de fluxo utilizado. Tipicamente, a perda de cromo é de 30% com fluxo ácido e de 10% com um de basicidade elevada, levando ao uso de fitas com maior teor de elementos de liga do que normalmente empregado em arames.

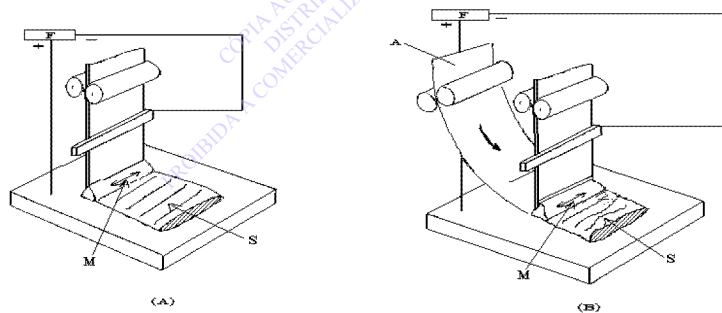


Figura 5.13 - Soldagem por Arco Submerso com Fita: (a) Com Conexão Elétrica; (b) Sem Conexão Elétrica (“fria”).

POSICIONAMENTO PEÇA/CABECOTE

Assim como ocorre com os outros processos de soldagem, o arco submerso requer uma correta preparação da junta antes da operação iniciar, além das medidas de praxe com relação ao alinhamento; constrição; limpeza e outras.

A inclinação da junta afeta a geometria do cordão de solda. Para chapas relativamente finas, pode ser de interesse inclinar a peça cerca de 15° e soldar no sentido descendente, já que a penetração

diminuirá. O inverso ocorrerá se a solda for realizada no sentido ascendente, agora com ângulo máximo de inclinação de 6° operando a 800 A, por exemplo. Para maiores correntes esse ângulo deve diminuir, pois o arco pode se tornar incontrolável e o metal de solda líquido escorrer a frente do mesmo, tomando o aspecto de um “cacho de uva”.

O tamanho máximo usual da perna do cordão de filete, na posição horizontal, com um único eletrodo, é cerca de 10 mm, já que um maior pode provocar mordeduras. Utilizando eletrodos múltiplos, pernas com até 16 mm podem ser realizadas

num só passe.

Como esse é, inerentemente, um processo de alta penetração, deve ser tomada precaução para que a razão entre a altura do cordão e sua largura seja menor do que 1,25 (sendo preferível 1). Uma maior razão entre essas duas dimensões aumenta em muito a tendência de ocorrer trinca de solidificação no metal de solda.

Por outro lado, a posição relativa do arame e da junta é da maior importância, para a obtenção de um cordão geometricamente aceitável, sendo fatores decisivos o alinhamento e o ângulo de deslocamento. De forma geral, um ângulo de deslocamento agudo com o cordão já soldado, reduz a penetração e aumenta a largura da solda. O ângulo de deslocamento positivo, ou aquele no qual o eletrodo mantém um ângulo obtuso com o cordão soldado, aumenta a penetração e reduz a largura da solda. Na soldagem de juntas a topo, a linha central do arame deve coincidir com o centro da junta. Eventualmente, na soldagem de juntas entre metais dissimilares, ou de diferentes espessuras, o arame deve ser deslocado no sentido da peça mais espessa, ou que possui maior condutividade térmica. Essas juntas são normalmente soldadas com o arame na vertical, num ângulo de deslocamento negativo de 25° a 45° no caso de chapas muito finas.

As juntas de filete podem ser soldadas nas posições horizontal e plana, com distintas características de posicionamento, as quais são:

▪ Posição Horizontal

O alinhamento eletrodo/junta deve ser aquele mostrado na **Fig. 5.14**. A linha central (L_c) do arame é mantida deslocada no sentido da chapa horizontal, cerca de 0,25 a 0,5 vezes o diâmetro do arame. Um maior deslocamento pode provocar a produção de perna muito pequena na chapa vertical. Soldando com o arame excessivamente deslocado no sentido da chapa vertical, ocorre mordedura na mesma.

Por sua vez, o ângulo de trabalho deve ser cerca de 20° a 45° com a chapa vertical, dependendo do acesso existente e das espessuras das chapas envolvidas. Caso possa ocorrer furo na chapa mais fina devido à excessiva penetração, o eletrodo deve ser dirigido em direção àquela mais espessa. O ângulo de deslocamento empregado pode ser vertical; positivo ou negativo, somente assumindo importância seu efeito em soldas de alta velocidade sobre chapas muito finas quando, en-

tão, deve ser positivo com 25° a 45°, o que melhora a estabilidade do arco;

▪ Posição Plana

O eletrodo deve ser alinhado à 45° com as chapas. O ângulo de trabalho é normalmente zero (vertical). Caso seja necessário penetração completa, esse ângulo pode ser alterado, conforme ilustrado na **Fig. 5.15**. O ângulo de deslocamento é o mesmo que para soldas de filete na posição horizontal.

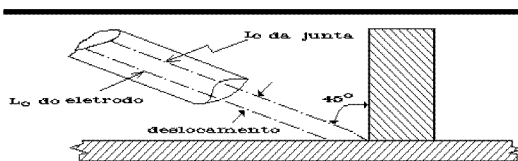


Figura 5.14 - Alinhamento entre o Eletrodo e a Junta.

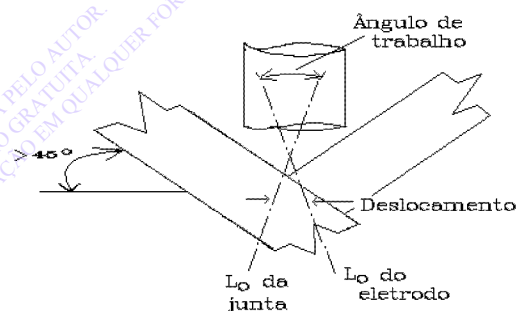


Figura 5.15 - Alinhamento do Eletrodo na Posição Plana.

Uma aplicação de grande interesse do arco submerso, é realizar soldas circunferenciais de baixo custo e alta qualidade, em componentes que sofrem rotação durante a operação. Nesse caso, a linha central do arame deve coincidir com os centros da junta e de rotação da peça, além do ângulo de trabalho ser normalmente zero (ou o arame na vertical). O eletrodo é posicionado conforme ilustrado na **Fig. 5.16**, para soldas nas partes interna e externa da peça. O deslocamento do arame em relação à linha vertical deve seguir os valores relacionados na **Tab. 5.5**, em função do diâmetro do componente. Deslocamentos diferentes dos propostos podem provocar cordão com inadequada geometria, além de ocorrer falta de suporte para o fluxo, ou metal de solda fundido.

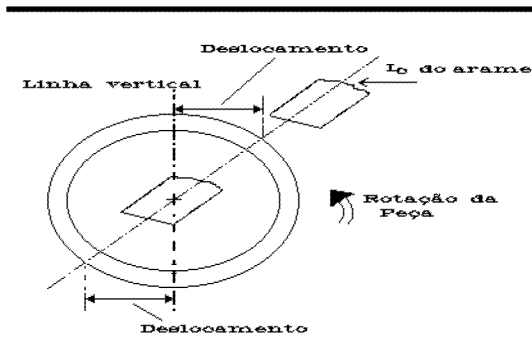


Figura 5.16 - Solda Circunferencial (veja Tab. 5.5).

Tabela 5.5 - Soldagem Circunferencial de Tubos por Arco Submerso

Diâmetro* (mm)	Deslocamento (mm)	Diâmetro* (mm)	Deslocamento (mm)
25 à 75	10 à 20	1100 à 1200	45 à 50
75 à 450	20 à 25	1200 à 1800	50 à 60
450 à 900	30 a 40	>1800	75
900 à 1100	40 à 45		

* Diâmetro do Componente

PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

Os procedimentos de soldagem apresentados a seguir, representam situações típicas e não esgotam todas as possibilidades existentes. Como nos outros processos de soldagem, experiências preliminares sempre devem ser realizadas, com o objetivo de alcançar condições ótimas de operação. No caso particular do arco submerso, além da seleção do arame, o usuário deverá escolher (principalmente) o tipo e a granulometria do fluxo, que sejam os mais adequados para as condições de soldagem e a obtenção das propriedades mecânicas necessárias no metal de solda. Como o fluxo também exerce influência sobre a geometria do cordão, é provável que os parâmetros de soldagem abaixo mencionados necessitem ajustes.

Nesse processo, a eficiência de deposição é muito próxima de 100%. O consumo do fluxo se situa normalmente entre 60 e 100% da massa do metal depositado. Entretanto, perdas na estocagem, transporte e manuseio, fazem com que essa proporção possa alcançar até 200%, sendo crítico (em altas produções) o método de recuperação do fluxo. Deve-se considerar, ainda, que há diferença entre os consumos dos fluxos fundidos e aglomerados, sendo que a mesma depende da intensidade da corrente. Por exemplo, a 400 A, o consumo do

fluxo do tipo fundido é cerca de 15% maior do que o aglomerado, aumentando para 30% a 600 A e podendo atingir 50% a 800 A. Por outro lado, os fluxos do tipo aglomerado tendem a produzir escória excessivamente fluida em altas correntes (menores do que os fundidos), o que é prejudicial à qualidade do metal de solda.

Portanto, a seguir são sugeridos os seguintes procedimentos para os aços ao carbono e baixa liga, além daqueles que podem ser desenvolvidos a partir dos mesmos para soldagem em múltiplos passes:

▪ Juntas a Topo

As **Tab. 5.6** e **5.7** apresentam parâmetros para soldagem de chapas com espessuras entre 4 e 40 mm, com os tipos de juntas referidos nas mesmas ilustrados na **Fig. 5.17**;

▪ Juntas em Ângulo

As **Tab. 5.8** e **5.9** mostram os parâmetros para as posições plana e horizontal, respectivamente.

Na **Tab. 5.10** estão ilustradas condições de soldagem para dois eletrodos na posição plana.

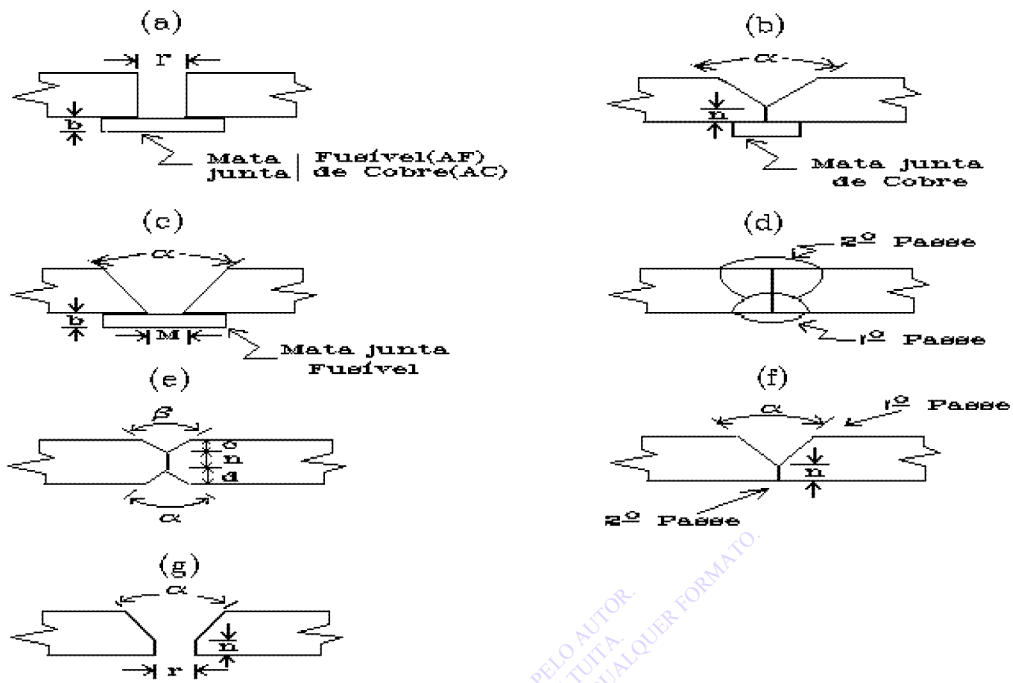


Figura 5.17 - Juntas a Topo para os Procedimentos de Soldagem descritos nas Tabelas 5.6 e 5.7.

CÓPIA AUTORIZADA PELO AUTOR.
DISTRIBUIÇÃO GRATUITA.
PROIBIDA A COMERCIALIZAÇÃO EM QUALQUER FORMATO.

Tabela 5.6 - Procedimentos Típicos para Soldagem por Arco Submerso (Aços ao Carbono e Baixa Liga - Junta a Topo - Um Eletrodo)

Espessura (mm)	Junta* (a/b/r/b/n/c/d)	Passe	Corrente* (A)	Tensão (V)	Velocidade Soldagem/Passe (mm/s)	Eletrodo		Tempo Total de Arco (min/m)
						Diâmetro (mm)	Fundido (kg/m)	
4,0	AC(0-2)	1	550	26	23	3,2	0,104	0,7246
6,0	AC(0-3)	1	800	28	14	4,0	0,275	1,1905
	B(60/3)	1	775	31	15	4,0	0,275	1,1111
	A(3/6)	1	850	27	11	4,0	0,282	1,5151
	C(45/3/6)	1	800	30	8	4,0	0,401	2,0833
	D	1	400	32	15	2,4 ou 3,2	0,149	2,2222
		2	500	30	15	3,2	0,178	
10,0	AF(3/6)	1	900	28	10	4,8	0,372	1,6667
	B(60/3)	1	950	34	11	4,8	0,468	1,5151
	C(45/3/6)	1	800	30	5	4,8	0,595	3,3333
	D	1	500	32	13	3,2 ou 4,0	0,208	2,6709
	E(10/3/0)(a)	1	550	33	9	4,0	0,595	3,9352
		2	600	33	8	4,0		
13,0	B(60/5)	1	1125	35	9	6,3	0,617	1,8518
	C(30/5/10)	1	975	30	7	4,8	0,818	2,3809
	D	1	650	33	9	3,2 ou 4,0	0,342	3,5185
		2	750	35	10	4,0	0,401	
	E(90/10/3/3)(b)	1	650	35	8	4,0	0,877	4,4643
		2	900	35	7	4,0		
16,0	B(45/5)	1	1200	37	7	6,3	0,803	2,3809
		1	1100	30	5	6,3	1,2399	3,3333
	D(c)	1	725	33	8	4,0 ou 4,8	0,416	2,0833
	E(90/90/6/5/5)	1	750	33	7	4,8	0,966	2,3809
	F(75/10)	1	900	33	8	4,8	0,654	3,9352
		2	700	33	9	4,8	0,312	
19,0	B(45/5)	1	1250	38	6	6,3	1,003	2,7778
	C(30/5/13)	1	1200	30	4	6,3	1,635	4,1667
	D(c)	1	960	38	5	4,8	0,669	6,6667
		2	1100	42	5	4,8	0,743	
	E(90/90/8/6/5)	1	850	33	7	6,3	1,189	5,1587
		2	1150	35	6	6,3	1,189	
	F(60/10)	1	950	33	7	4,8	0,743	4,4643
		2	750	33	8	4,8	0,372	
25,0	E(90/90/8/9/8)	1	1000	34	6	6,3	1,635	6,111
		2	1300	36	5	6,3	1,635	
	F(45/10)	1	1200	35	5	6,3	1,115	5,4167
		2	850	35	8	6,3	0,505	
	G(60/3/6)(d)	3 a 14	550	28	7	4,0	2,824	28,5714
40,0	E(60/70/11/17/12)	1	1300	35	4	6,3	2,914	8,3333
		2	1600	37	4	6,3	2,914	
	G(60/3/6)	3 a 28	550	28	7	4,0	6,140	61,9048

* Refere-se à Fig.5.17; ** CCEP; (a) O ângulo "OC" (passe de selagem) é zero nesse caso. O ângulo "B" é realizado somente após a solda de selagem ter sido realizada e é de 60º; (b) Com o ângulo "O" do passe de selagem igual à 90º, o ângulo "B" é realizado somente após esta solda ter sido realizada e é de 90º; (c) Antes do 2º passe, a raiz deve ser goivada; (d) Os passes 1 e 2 devem ser realizados com eletrodo revestido (preferencialmente AWS E7018). Após, a raiz deve ser goivada.

Tabela 5.7 - Procedimentos Típicos para Soldagem por Arco Submerso (Aços ao Carbono e Baixa liga - Juntas a Topo - Dois Eletrodos)

Espessura (mm)	Processo* - Junta** (a/b/r/b/n/c/d)	Passe	Corrente† (A)	Tensão (V)	Velocidade de Soldagem/Passe (mm/s)	Diâmetro (mm)	Tempo Total de Arco (min/m)	
8,0	D(a)	1	950(+)	35	34	4,8	0,9804	
			650(-)	38	34	4,0		
		2	1100(+)	35	34	4,8		
			700(-)	38	34	4,0		
10,0	D(a)	1	1150(+)	35	30	4,8	1,1728	
			750(-)	38	30	4,0		
		2	1200(+)	35	27	4,8		
			800(-)	38	27	4,0		
13,0	AF(5)(b)	1	1250(-)	44	13	2x2,0	1,2820	
	F(90/10)(a,c)	1	1100(+)	36	25	4,8	1,4603	
			650(-)	39	25	4,0		
		2	1200(+)	36	21	4,8		
650(-)	39		21	4,0				
19,0	E(90/90/10/3/6)(a)	1	1050(+)	35	17	5,6	2,2624	
			700(-)	40	17	4,8		
		2	1150(+)	36	13	5,6		
			800(-)	41	13	4,8		
25,0	E(80/80/10/6/9)(a)	1	1050(+)	36	11	5,6	3,3670	
			700(-)	41	11	4,8		
		2	1150(+)	38	9	5,6		
			800(-)	41	9	5,6		
30,0	E(60/60/4/17/9)(b)	1b	750(+)	33	8	2x2,4	5,8333	
		2b	850(+)	35	8	2x2,4		
		1a	900(+)	35	10	2x2,4		
	E(70/70/9/9/12)(a)	1	1050(+)	36	8	5,6		4,4643
			750(-)	42	8	4,8		
		2	1200(+)	38	7	5,6		
850(-)	43		7	4,8				
40,0	E(60/60/4/24/12)(b)	1b	750(+)	33	8	2x2,4	6,9318	
		2b à 4b	850(+)	35	10	2x2,4		
		1a	900(+)	35	11	2x2,4		
		2a	900(+)	35	10	2x2,4		

* Veja texto e itens (a) e (b) a seguir; ** Veja Fig. 5.17; † Símbolos (+) para CCEP, (-) para CCEN e (~) para CA. O eletrodo principal é CC; (a) Arame com Fontes individuais (CC/CA); (b) Dois arames em paralelo; (c) A seqüência dos passes deve ser inversa daquela mostrada em "F" na Fig. 5.17.

Tabela 5.8 - Procedimentos Típicos para Soldagem por Arco Submerso (Aços ao Carbono e Baixa Liga - Juntas de Filete - Um Eletrodo - Posição Plana)

Tamanho da Perna (mm)	Passe	Corrente* (A)	Tensão (V)	Velocidade de Soldagem/Passe (mm/s)	Eletrodo		Tempo Total de Arco (min/m)
					Diâmetro (mm)	Fundido (kg/m)	
3,0	1	425(+)	26	25	3,2	0,042	0,6667
5,0	1	525(-)	31	23	3,2	0,098	0,7250
	1	575(+)	28	18	4,0	0,094	0,9259
8,0	1	725(-)	34	11	4,8	0,267	1,5151
	1	775(+)	34	10	4,8	0,253	1,6667
10,0	1	800(-)	36	9	4,8	0,386	1,8518
	1	850(+)	35	8	4,8	0,372	2,0833
13,0**	1	875(-)	38	6	4,8	0,699	2,7778
	1	950(+)	36	5	4,8	0,669	3,3333
16,0**	1	925(-)	39	4	4,8	1,085	4,1667
	1	1000(+)	37	4	4,8	1,055	4,1667
19,0**	1	975(-)	40	3	4,8	1,561	5,5556
	1	1000(+)	38	3	4,8	1,501	5,5556
25,0	1	1000(-)	38	5	4,8		10
	2 e 3	900(-)	38	5	4,8	2,795	
40,0	1 e 2	1000(-)	39	4	4,8		20,8333
	3 a 5	900(-)	38	4	4,8	6,244	

* Símbolos (+) para CCEP e (-) para CCEN; ** Não recomendável num único passe e somente com um arame.

Tabela 5.9 - Procedimentos Típicos para Soldagem por Arco Submerso (Aços ao Carbono e Baixa Liga - Juntas de Filete - Um Eletrodo - Posição Horizontal)

Tamanho da Perna* (mm)	Passe	Corrente** (A)	Tensão (V)	Velocidade de Soldagem/Passe (mm/s)	Eletrodo		Tempo Total de Arco (min/m)
					Diâmetro (mm)	Fundido (kg/m)	
3,0	1	400(+)	24	23	3,2	0,043	0,725
	1	400(+)	25	20	2,4	0,089	0,8333
5,0	1	550(+)	28	15	3,2	0,098	1,1111
8,0	1	500(-)	30	8	4,0	0,268	2,0833
	1	575(+)	30	7	4,0	0,253	2,3809
	1	650(+)	28	9	4,0	0,297	1,8518
	1	520(+)	30	9	3,2		3,7037
	2	520(+)	30	9	3,2	0,461	
16,0	1	725(+)	33	8	4,0		4,4643
	2	850(+)	35	7	4,0	0,855	
19,0	1	800(+)	35	4	4,0		8,3333
	2	820(+)	33	4	4,0	1,665	

* Não é recomendável tamanho da perna superior à 10 mm, num único passe, nessa posição de soldagem; ** Símbolo (+) para CCEP e (-) para CCEN.

Tabela 5.10 - Procedimentos Típicos para Soldagem por Arco Submerso (Aços ao Carbono e Baixa Liga - Juntas de Filete - Dois Eletrodos - Posição Plana)

Tamanho da Perna (mm)	Passe-Técnica*	Corrente** (A)	Tensão (V)	Velocidade de Soldagem/Passe (mm/s)	Diâmetros (mm)	Tempo Total de Arco (min/m)
6,0	1-(a)	900(+)	35	23	2*2,4	0,7246
	1-(b)	750(+)	28	29	4,8	0,5747
		550(-)	30	29	4,8	
8,0	1-(a)	1050(+)	35	17	2*2,4	0,9804
	1-(b)	825(+)	30	21	4,8	0,7936
		600(-)	33	21	4,8	
10,0	1-(a)	1200(+)	37	16	2*2,4	1,0417
	1-(b)	900(+)	32	17	4,8	0,9804
		700(-)	34	17	4,8	
13,0	1-(a)	1350(+)	39	11	2*2,4	1,5151
	1-(b)	1075(+)	34	12	4,8	1,3889
		750(-)	36	12	4,8	
16,0	1-(a)	1400(+)	40	8	2*2,4	2,0833
	1-(b)	1100(+)	37	9	4,8	1,8518
		850(-)	39	9	4,8	
19,0	1-(a)	1500(+)	40	5	2*2,4	3,3333
	1-(b)	1100(+)	37	6	4,8	2,7778
		850(-)	39	6	4,8	

* Veja texto e itens (a) e (b) a seguir; ** Símbolos (+) para CCEP e (-) para CA. O eletrodo principal é CCEP; (a) Dois arames em paralelo; (b) Arame com fontes individuais (CC/CA).

CÓPIA APROPRIADA PELO AUTOR.
DISTRIBUIÇÃO GRATUITA.
PROIBIDA A COMERCIALIZAÇÃO EM QUALQUER FORMATO.

**C
A
P
Í
T
U
L
O

06**

SOLDAGEM A ARCO COM ELETRODO TUBULAR

INTRODUÇÃO	158
CARACTERÍSTICAS GERAIS	158
Equipamentos	158
Consumíveis	160
CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS	163
Fatores Econômicos	163
Técnicas e Variáveis de Procedimento	164
PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM	166

INTRODUÇÃO

Nesse processo, o arco elétrico se forma entre a peça e um tubo metálico - cujo interior é preenchido por fluxo fusível - o qual é continuamente alimentado desde uma bobina. A poça de fusão assim produzida, é envolvida por escória e gases resultantes da decomposição do fluxo, sendo que a **Fig. 6.1** ilustra esquematicamente esse conjunto. Adicionalmente, pode ser empregado gás de proteção, o qual flui pelo bocal da tocha.

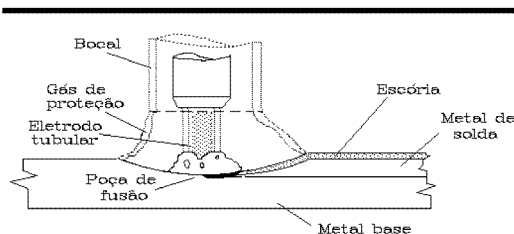


Figura 6.1 - Soldagem com Eletrodo Tubular.

Portanto, são realizadas pelo fluxo benéficas reações metalúrgicas no metal de solda - o que não ocorre nos processos TIG e MIG, como será visto nos capítulos subseqüentes - sem as inconveniências operacionais apresentadas pelo Arco Submerso.

A exploração comercial deste processo remonta à 1920, sendo que antes de 1930 várias estruturas de grande porte foram construídas na Alemanha através de sua utilização. Porém, naquela época ainda não era usual a fabricação de tubos com o (reduzido) diâmetro e espessura de parede exigidos para serem enrolados em bobinas, sendo o con-

sumível fabricado, portanto, em pequenas extensões. Entretanto, o problema não se resumia a esse fato. A maior dificuldade a ser contornada, se refere à proteção que a escória líquida deve fornecer ao metal, quando esse é transferido desde o eletrodo para a poça de fusão. Isto requer um preciso controle da viscosidade da escória, de forma que a mesma envolva completamente a gota, no exíguo tempo disponível para a transferência.

Estes problemas impediram uma maior popularização desse processo, até que o advento do MIG (cerca de 1950) fez renascer o interesse pelo mesmo, além do uso de constituintes pré-fundidos e adição de compostos básicos em fluxo rutilico.

O arame Tubular enfrentou ainda, durante muitos anos, dificuldades para alcançar o nível de tenacidade exigido no metal de solda pelas modernas estruturas. Há cerca de dez anos, finalmente, alguns fabricantes resolveram os inconvenientes existentes, sendo que este processo se apresenta atualmente como uma excelente alternativa para alta produtividade, com qualidade.

A taxa de deposição do Eletrodo Tubular é elevada. Comparando com o Eletrodo Revestido, a mesma é cerca de duas vezes maior na posição vertical e seis vezes na horizontal/plana, alcançando até 11 kg/h.

Os materiais normalmente soldados por este processo são os aços ao carbono; baixa liga; inoxidáveis e ligados, além de diversos tipos de revestimentos protetores, de maneira semi-automática, a mais usual, ou completamente mecanizada.

CARACTERÍSTICAS GERAIS

EQUIPAMENTOS

Existem duas opções básicas para soldar com Arame Tubular. No modo denominado auto-protetido, somente a escória e os gases produzidos pela decomposição de alguns dos seus compostos protegem o metal de solda da atmosfera (principalmente do O_2 e N_2). Outro método utiliza um gás de proteção adicional, geralmente CO_2 puro, ou misturas desse gás com argônio e, algumas vezes, também com oxigênio.

A **Fig. 6.2** mostra esquematicamente o equipamento necessário, ressaltando-se a diferença do tipo de tocha, quando gás de proteção é utilizado. A fonte de energia pode ser do tipo corrente cons-

tante (“tombante”) necessitando, então, de um controle tensão-sensitivo externo para estabilizar o comprimento do arco. Entretanto, para arames com pequenos diâmetros (como de 0,8 a 1,2 mm já existentes atualmente) geralmente é empregada uma fonte com curva característica tensão constante (“plana”), a qual permite a estabilização do comprimento do arco sem nenhum equipamento adicional (veja “auto-ajustagem” do arco-Capítulo 3).

A AWS classifica Eletrodos Tubulares para serem utilizados em corrente contínua eletrodo positivo (CCEP) e corrente contínua eletrodo negativo (CCEN), raramente sendo empregada corrente alternada (CA) neste processo. A exceção existe, no momento, para alguns consumíveis de

procedência japonesa.

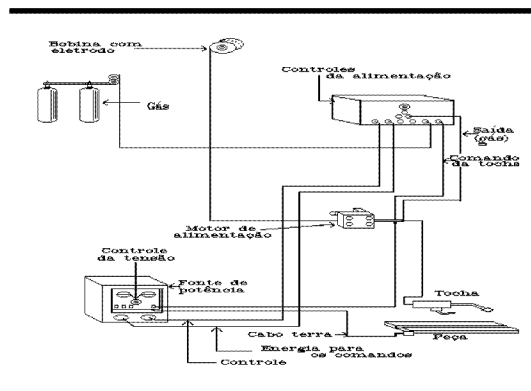


Figura 6.2 - Sistema Esquemático para Soldagem com Eletrodo Tubular.

Importantes diferenças operacionais e de acessórios são ditadas pelo uso, ou não do gás de proteção auxiliar.

No passado, devido aos grandes diâmetros, o eletrodo tubular com gás de proteção somente podia operar nas posições plana e horizontal. Com o advento de arames tubulares de reduzidos diâmetros, o processo se tornou aplicável em todas as posições, sendo possível obter modos de transferência do metal para a peça do tipo curto-circuito, globular e aerossol (“spray”), dependendo da ajustagem dos parâmetros de soldagem.

O eletrodo tubular auto-protegido utiliza uma tocha mais simples. Isto é devido ao fato de que a penetração é normalmente reduzida, quando comparado com aquele que utiliza CO_2 como gás auxiliar. Como a proteção é realizada somente pela escória, não é recomendável que esse tipo opere em aerossol, pois a área externa total das gotas aumenta muito e pode não correr proteção das mesmas. Portanto, curto-circuito e globular são os modos de transferência usuais. Outrossim, de um modo geral, a qualidade das soldas realizadas por este método é inferior àquela quando gás auxiliar é empregado, devido principalmente à contaminação atmosférica. Claramente esse método apresenta a vantagem adicional de poder operar em local com deslocamento de ar; sobre juntas mal posicionadas e é possível, também, soldar em todas as posições, quando um arame fino é utilizado.

Conforme ilustrado nas Figs. 6.3(a,b), o comprimento do eletrodo após o bico de contato deve ser maior no auto-protegido, do que naquele com proteção por gás. A tocha utilizada neste processo é similar à do MIG, mas mais robusta porque em geral a intensidade de corrente empregada é mai-

or, podendo ser resfriada por ar, ou água (necessário acima de 500 A).

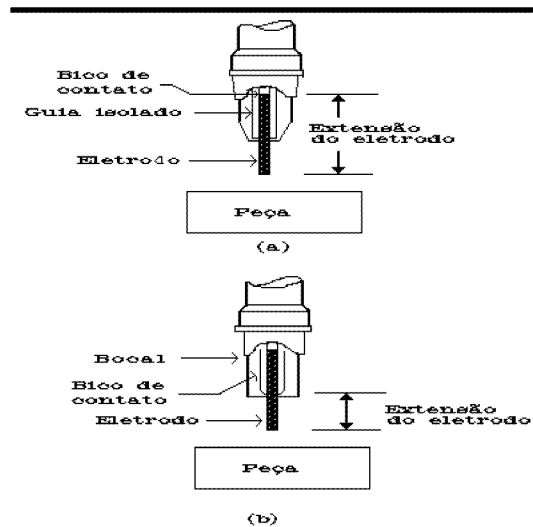


Figura 6.3 - Bocal para Eletrodo Tubular Auto-Protegido (a) e com Proteção por Gás (b).

Em soldas realizadas com correntes de até 800 A, é possível que o alimentador do eletrodo tubular necessite operar com velocidades maiores do que 25 m/min. Além disso, deve-se prestar especial atenção ao sistema dos rolos de alimentação, pois os eletrodos não devem ser amassados. Portanto, a pressão entre estes rolos deve ser cuidadosamente aplicada. A Fig. 6.4 mostra três diferentes tipos de rolos, indicados para: (a) Eletrodos com diâmetros médio/grande; (b) Eletrodos pouco resistentes; (c) Arames de pequeno diâmetro.

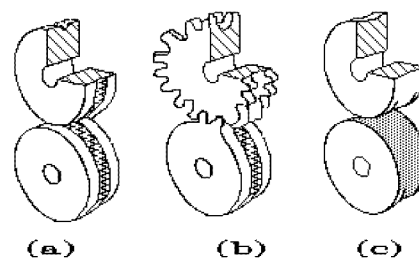


Figura 6.4 - Tipos de rolos de alimentação (vide texto).

Além de operar com fontes de potência convencionais, o arame tubular também pode soldar com corrente pulsada, sendo que no LS&TC foram estabelecidos parâmetros fundamentais de pulso para consumíveis do tipo rutilico e básico. A técnica da corrente pulsada foi descrita no Ca-

pítulo 3 e será apresentada com mais detalhes no Capítulo 8 (MIG/MAG). Quando a mesma é aplicada ao eletrodo tubular, os seguintes benefícios são notáveis: (a) Arco mais estável; (b) Possibilidade de soldar em todas as posições; (c) Maior taxa de deposição para mesma energia equivalente à convencional; (d) Melhor controle da geometria do cordão.

CONSUMÍVEIS

As Classificações para eletrodos tubulares são apresentadas no livro dessa série sobre “Sistemas de Especificação dos Consumíveis para Soldagem e Brasagem”. Esses eletrodos podem ser fabricados com uma fita de aço baixo carbono conformada em torno do fluxo, nas geometrias mostradas na **Fig. 6.5**, conforme classificação do IIW. Note-se que o Tipo 1 (sem costura) é fabricado através do preenchimento com fluxo de um tubo de diâmetro bem maior, que é então trefilado para a bitola desejada. O mesmo apresenta a vantagem de minimizar o contato de umidade com o fluxo e, portanto, deposita metal de solda com muito baixo hidrogênio. Os tubos com formas mais complexas apresentam efeitos secundários, ou seja, os mesmos provocam início do arco em vários pontos e pré-aquecem mais eficientemente o fluxo, de forma que esse é fundido numa maior taxa, sendo o arco mais suave. Os eletrodos para soldagem de aço não são geralmente recobertos com cobre (como no MIG) e, portanto, devem ser tomados cuidados especiais no seu armazenamento.

Estes consumíveis geralmente são disponíveis em bitolas de 0,8-1,0-1,2-1,6-2,0-2,4-3,2 e 4,0 mm, sendo aqueles com menores diâmetros mais difíceis de fabricar e, portanto, os últimos que foram comercializados.

Neste processo, o fluxo tem funções similares à que possui nos eletrodos revestidos (Capítulo 4), ou seja:

- Desoxidar o metal de solda;
- Transferir elementos de liga;
- Aumentar a taxa de deposição, através do pó de ferro;
- Formar escória e gás de proteção produzido pela decomposição de alguns dos seus compostos;
- Estabilizar o arco;
- Estabelecer uma conveniente geometria para o cordão.

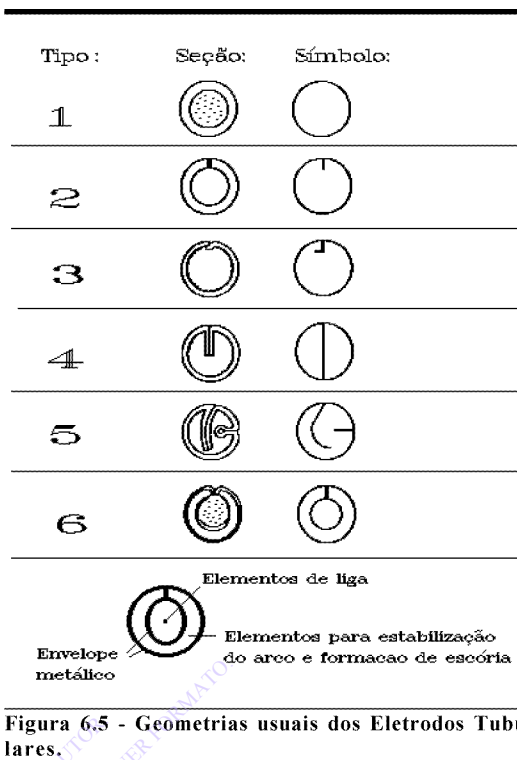


Figura 6.5 - Geometrias usuais dos Eletrodos Tubulares.

A razão entre as massas do fluxo e do metal do tubo depende da espessura da parede do mesmo (ou fita que forma o tubo), sendo usual que se encontre entre 0,15 e 0,30.

Por outro lado, os eletrodos tubulares auto-protetidos não podem utilizar tão efetivamente a decomposição do fluxo para formar gás de proteção, como no caso dos eletrodos revestidos. Se assim fosse, como o fluxo se encontra no interior do tubo, seria provocada alta produção de salpicos, além do metal fundido manter contato com a atmosfera. Como é inevitável alguma absorção de oxigênio e nitrogênio do ambiente, torna-se necessário que o fluxo contenha fortes desoxidantes e formadores de nitretos, como alumínio. Uma das vantagens do arame tubular auto-protetido, é a possibilidade de seu uso onde ocorra ventos laterais. Entretanto, isto acarreta pouca tolerância do processo, existindo casos em que soldagem realizada na posição vertical requer que a tensão permaneça num intervalo tão pequeno quanto ± 1 V daquele recomendado, para que a porosidade seja prevenida e as propriedades mecânicas desejadas alcançadas.

A **Tab. 6.1** apresenta algumas composições típicas de fluxos utilizados no método auto-protetido, os quais são agrupados em:

- Tipo I, ou Fluorita (fluoreto de cálcio)-Alumínio.

- Tipo II, ou Fluorita-Titânia.
- Tipo III, ou Fluorita-Óxido de Cálcio-Titânia.

Apesar do custo específico adicional, o método com gás auxiliar de proteção é utilizado com frequência, pois aumenta muito a tolerância do processo e, em geral, as propriedades mecânicas do metal de solda, reduzindo o custo total final.

A **Tab. 6.2** mostra composições típicas de fluxos, quando utilizam gás auxiliar de proteção CO_2 , nos seguintes grupos:

- Tipo I, ou Alto em Titânia (não básico).
- Tipo II, ou Óxido de Cálcio-Titânia (básico ou neutro).
- Tipo III, ou Óxido de Cálcio (básico).

Neste caso, sob o arco ocorre a seguinte reação com o CO_2 :



O ferro no estado fundido também reage:



Parte do monóxido de carbono se dissocia:



Enquanto outra grande parcela de CO pode permanecer livre.

Portanto, quando CO_2 é utilizado como gás de proteção, devem ser considerados os seguintes fatores, na formulação do fluxo e composição dos metais envolvidos:

- A sua tendência oxidante: isso acarreta diminuição da tenacidade do metal de solda, sendo que elementos desoxidantes devem ser adicionados. Entretanto, no arame tubular o nível de oxigênio do metal de solda é, via de regra, maior do que nos processos por eletrodo revestido e arco submerso, sendo necessário a utilização de elementos de liga, tal como níquel, para alcançar ótima tenacidade;
 - A possibilidade do CO provocar porosidade: equilibrada pela adição de desoxidantes ao fluxo, de forma que oxigênio forme compostos sólidos que sobrenadem o metal fundido, no lugar de reagir com o carbono;
 - A variação de carbono no metal de solda: a qual depende do carbono original do metal base e aquele do eletrodo. Se seu conteúdo for menor do que cerca de 0,05%, o metal de solda tende a absorver carbono. Entretanto, se o carbono for maior do que aproximadamente 0,10%, o metal de solda tende a perder carbono.

Tabela 6.1 - Composições Típicas dos Fluxos para Três Tipos de Eletrodos Tubulares Auto-Protegidos

Composto ou Elemento	Composição (%)		
	Fluorita-Alumínio	Fluorita-Titânia	Fluorita-CaO-Titânia
SiO_2	0,5	3,6	4,2
Al	15,4	1,9	1,4
TiO_2	-	20,6	14,7
CaO	-	-	4,0
MgO	12,6	4,5	2,2
K_2O	0,4	0,6	-
Na_2O	0,2	0,1	-
C	1,2	0,6	0,6
CO_2	0,4	0,6	2,1
Fe	4,0	50,0	50,5
Mn	3,0	4,5	2,0
Ni	-	-	2,4
CaF_2	63,5	22,0	15,3
Fluxo (%)	18	18	26
Classificação AWS	T4	T3	T6

Tabela 6.2 - Composições Típicas dos Fluxos para Três Tipos de Eletrodos Tubulares que utilizam CO₂ como Gás de Proteção

Composto ou Elemento	Composição (%)		
	Alto Titânia (Não Básico)	CaO-Titânia (Básico/Neutro)	Óxido de Cálcio (Básico)
SiO ₂	21,0	17,8	7,5
Al ₂ O ₃	2,1	4,3	0,5
TiO ₂	40,5	9,8	-
ZrO ₂	-	6,2	-
CaO	0,7	9,7	3,2
Na ₂ O	1,6	1,9	-
K ₂ O	1,4	1,5	0,5
CO ₂	0,5	-	2,5
C	0,6	0,3	1,1
Fe	20,1	24,7	55,0
Mn	15,8	13,0	7,2
CaF ₂	-	18,0	20,5
Fluxo (%)	13	13	27
Classificação AWS	T-1 ou T-2	T-1	T-1 ou T-5

No Capítulo 8 são fornecidos os detalhes das implicações e mecanismos de ação das reações acima apresentadas, bem como uma discussão sobre o fenômeno do aumento e diminuição do carbono no metal de solda.

Outrossim, nesse processo a vazão do gás deve ser cerca de 14 l/min no mínimo, aumentando em torno de até 70% em locais com deslocamento de ar. Ressalte-se que a Especificação AWS pode alterar a classificação de um eletrodo tubular, através do uso, ou não, do gás de proteção e, também, pela adição de elementos tais como manganês e silício, sem modificar o tipo do fluxo empregado.

No “Sistemas de Especificação dos Consumíveis para Soldagem e Brasagem”, como já mencionado, são detalhadas as classificações para os Eletrodos Tubulares. Resumidamente, para aços ao carbono a mesma é composta na AWS A5.20 pelos seguintes dígitos:

AWS EXYT-Z

onde E, designa eletrodo; X, a mínima resistência à tração do metal de solda em 10.000 psi (69 MPa); Y, a posição de soldagem, sendo 0 para plana-horizantal e 1 para todas; T, indicando eletrodo tubular; Z, demais características de uso e operacionais, conforme indicado a seguir:

- Classificação T-1: CO₂ é o gás de proteção, mas podem ser utilizadas misturas argônio-CO₂ para melhorar a operacionalidade e a tenacidade. Uso em passe único ou multipasse em CCEP. Bitolas de 1,6mm e menores são empregadas em todas as posições, enquanto maiores soldam somente nas posições plana e filete na horizontal. Tipo de transferência em aerossol (quando com argônio-CO₂), pouco salpico e média produção de escória. Cordão com geometria plana a levemente convexa, apresentando boa tenacidade. A maioria dos eletrodos possui fluxo do tipo rutílico.

- Classificação T-2: proteção por gás, fluxo do mesmo tipo que o T-1, com mais altos conteúdos de manganês, ou silício, ou ambos. Utilizado principalmente para passe único na posição plana e filetes na horizontal em CCEP. Como possui alto conteúdo de desoxidantes, é possível empregar esse consumível sobre superfícies oxidadas ou corroídas. Pode também soldar com dois passes, desde que no último seja admitido maior conteúdo dos elementos químicos acima citados.

- Classificação T-3: esses são eletrodos do tipo auto-protégido, que podem soldar em alta velocidade nas posições plana descendente (20°) e horizontal em CCEP, em passe único, sobre cha-

pas relativamente finas (até cerca de 5 mm). Não devem ser utilizados na soldagem de seções espessas ou em multipasses.

- Classificação T-4: do tipo auto-protetido, para passe único ou multipasse nas posições plana e horizontal em CCEP, com modo globular de transferência. A taxa de deposição é bastante alta e o fluxo dessulfuriza o metal de solda a níveis muito baixos.

Combinado com esse fator, a pequena penetração que produz torna o metal de solda muito pouco suscetível à trincas de solidificação.

- Classificação T-5: com gás de proteção, utilizado em passe único, ou multipasse, nas posições plana ou de filete na horizontal em CCEP. O modo de transferência é globular, a penetração é média a alta, com um cordão levemente convexo. A escória formada é bastante fina, com o metal de solda apresentando melhor tenacidade e resistência à trincas do que aquele depositado pelo tipo rutílico.

- Classificação T-6: do tipo auto-protetido, com o modo de transferência podendo ser aerossol. O metal de solda apresenta alta tenacidade em baixas temperaturas, como consequência do fluxo utilizado, conforme apresentado na **Tab.6.1**. Empregado em passe único e multipasse nas posições plana e horizontal em CCEP, produz grande penetração e é fácil a remoção da escória em chanfros profundos.

- Classificação T-7: auto-protetido para passe único ou multipasse operando em CCEN. A composição do fluxo permite que grandes bitolas sejam utilizadas para altas taxas de deposição, enquanto eletrodos de pequeno diâmetro são aplicados em todas as posições. A escória é, também, muito efetiva na dessulfurização do metal de solda, reduzindo a suscetibilidade do mesmo à trincas de solidificação.

- Classificação T-8: auto-protetido para passe único ou multi-passe, operando em CCEN. O fluxo permite que a solda seja realizada em todas as posições, com o metal de solda apresentando enxôfre em níveis muito baixos e reduzindo, conseqüentemente, a sua tendência à trinca de solidificação. O metal de solda possui muito boa tenacidade em baixa temperatura.

- Classificação T-10: auto-protetido, para passe único nas posições plana, horizontal e vertical-descendente (até 20°) operando em CCEN. A soldagem pode ser realizada em alta velocidade.

- Classificação T-11: auto-protetido, para uso geral em passe único ou multipasse em todas as posições, operando em CCEN. O modo de transferência é aerossol, com arco suave e possibilidade de soldar em alta velocidade.

- Classificação T-G e T-GS: para novos eletrodos tubulares, que operam em passe único e multipasse, respectivamente, os quais não se enquadram nas classificações anteriores.

CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS

FATORES ECONÔMICOS

Quando comparado com os processos Eletrodo Revestido (**Capítulo 4**) e MIG (**Capítulo 8**), o eletrodo tubular apresenta uma muito maior taxa de deposição na posição plana, conforme mostrado na **Fig. 6.6**. Enfatize-se que a mesma sofre profunda influência da extensão do eletrodo após o bico de contato.

A razão entre a massa do metal depositado e a do eletrodo consumido, ou eficiência de deposição, se encontra geralmente entre 85-90% para o eletrodo protegido por gás, e 80-87% no caso do auto-protetido. Em consumíveis desenvolvidos recentemente, esse fator tem alcançado até 95%,

o qual é muito alto.

Por outro lado, o fator de operação (ou a razão entre o tempo de arco aberto e o tempo total de soldagem) alcança 50% em situações excepcionais, sendo usual 35%.

Outro ponto a ser considerado, é aquele relativo à possibilidade de reduzir a massa do metal de solda necessária para preencher uma junta. Devido a este consumível produzir alta penetração, na soldagem com proteção adicional de gás, o nariz da junta pode ser aumentado. Outrossim, uma junta em “V”, que para soldagem por eletrodo revestido geralmente teria um ângulo de 60°, no eletrodo tubular é de somente 45°, como consequência da mais longa extensão do eletrodo após

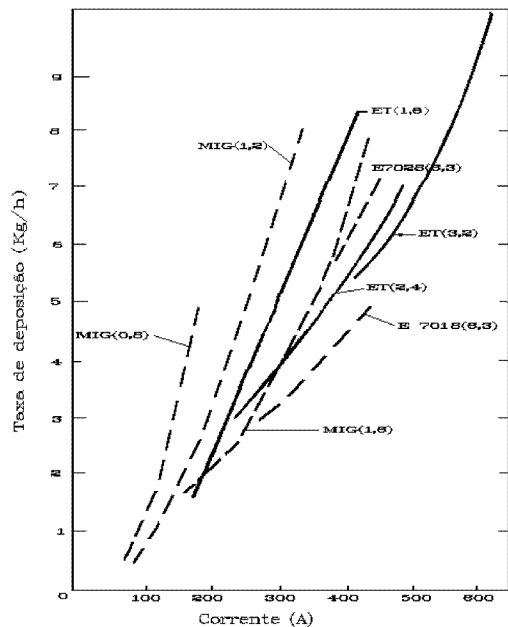


Figura 6.6 - Comparação entre as Taxas de Deposição dos Processos Eletrodo Tubular (ET); MIG e Eletrodo Revestido (diâmetro dos consumíveis).

o bico de contato. O mesmo ocorre, por exemplo, em soldas com penetração completa em filete, cujo ângulo do chanfro geralmente seria 50°; no caso do eletrodo tubular, é reduzido para 35°. Isto pode significar substanciais decréscimos nos custos diretos e tempo para realização do trabalho.

O eletrodo tubular é um processo bastante versátil, podendo ser empregado em soldas de aços com espessuras desde cerca de 2 até 75 mm, ou maiores, com velocidade de operação tão grande quanto 10 mm/s. Com o advento de eletrodos tubulares contendo fluxo básico e de pequenas bitolas (0,8-1,2 mm), é possível realizar soldas de alta qualidade em todas as posições. Outrossim, o uso cada vez maior da corrente pulsada e gases de proteção que permitem modo de transferência axial (como argônio; argônio-oxigênio e misturas argônio com menos de 18% CO₂), torna este processo um dos mais competitivos econômica e tecnicamente.

Como principais fatores negativos, deve ser considerada a relativamente alta vazão do gás (cerca de 40% maior do que no MIG); o preço atual do consumível (dependendo do país, em torno de 3 vezes aquele do MIG); além da presença de escória, a qual exige limpeza.

TÉCNICAS E VARIÁVEIS DE PROCEDIMENTO

Como em outros processos de soldagem ao arco elétrico, o eletrodo tubular apresenta diferentes modos de transferência, conforme os parâmetros são alterados. Na Fig. 6.7 é exemplificado esse fato, com curvas típicas relacionando corrente e taxa de deposição, para diversas bitolas de eletrodos da classe AWS T-1.

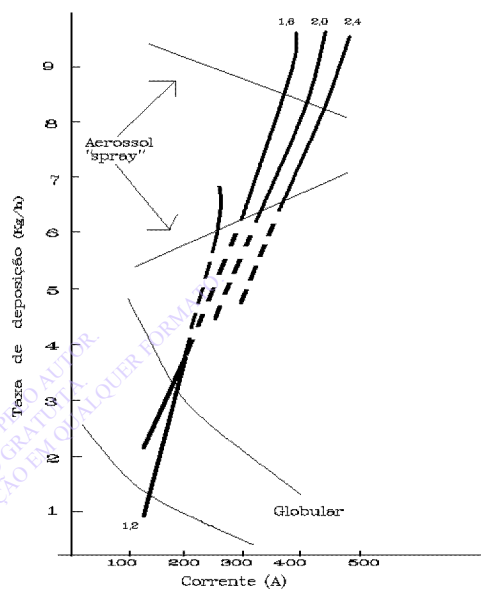


Figura 6.7 - Taxa de Deposição e Modos de Transferência para o Eletrodo Tubular Classe AWS T-1.

Outrossim, a manipulação e o posicionamento da tocha é de extrema importância nesse processo, sendo as seguintes técnicas recomendadas:

- Posições de Soldagem Plana e Horizontal

Para a realização de soldas em filete, a tocha deve ser posicionada num ângulo de trabalho de 45° e deslocada na distância de um diâmetro do eletrodo em direção a chapa inferior. Desta forma, o cordão será produzido com geometria simétrica no filete.

A máxima penetração é alcançada com deslocamento positivo da tocha (a mesma permanece num ângulo obtuso com o cordão). O ângulo de deslocamento em solda de junta a topo e posição plana é entre 70-80°, com ângulo de trabalho de 0°.

Soldas de filete, ou sobrepostas, são preferencialmente soldadas com deslocamento negativo, ou seja, ângulo agudo com o cordão. Isso reduz a penetração, mas permite um melhor controle sobre a geometria do cordão. O ângulo entre a tocha e o cordão deve ser cerca de 65° , enquanto o de trabalho 45° .

▪ Posição de Soldagem Vertical

Juntas a topo com nariz podem ser soldadas na posição vertical-ascendente, conforme mostra a Fig. 6.8(a), sendo o primeiro passe tecido em “chicote” e os seguintes em “zig-zag” (veja Capítulo 4).

Com preparação da junta a topo em “V simples”, deve ser preferida a posição vertical-descendente para o primeiro passe, conforme ilustrado na Fig. 6.8(b). Esse passe deve ser realizado sem oscilação da tocha, enquanto os cordões subsequentes são obtidos na posição vertical-ascendente, com o tecimento em “zig-zag”.

Juntas em filete, com espessuras menores do que 6 mm podem ser soldadas na posição vertical-descendente, com tecimento triangular. Chapas mais espessas são normalmente soldadas na posição vertical-ascendente, com tecimento similar ao anterior. Se forem necessários passes subsequentes, os mesmos podem ser do tipo “chicote”, com a Fig. 6.9(a,b) ilustrando esses dois casos.

A exemplo dos outros processos de soldagem, é necessário que o usuário domine perfeitamente a ação das variáveis de procedimento sobre o cor-

dão de solda que será produzido. As seguintes variáveis são determinantes, sendo considerado, na análise de cada uma, que os outros parâmetros são mantidos constantes:

▪ Tensão

Como a tensão é proporcional ao comprimento do arco, sendo esse excessivamente longo a atmosfera pode contaminar a poça de fusão. Nos aços ao carbono e baixa liga, isso provoca oxidação da poça; formação de nitretos e conseqüente redução de tenacidade da junta; além de porosidade. Nos aços inoxidáveis, o aumento do nitrogênio (proveniente do ar) pode provocar, ainda, redução no conteúdo de ferrita (δ) no metal de solda, o que aumenta a sua tendência à trinca de solidificação.

Um aumento da tensão resulta num cordão mais largo. Com a tensão excessivamente alta, pode ocorrer aumento do salpico e cordão irregular. A redução deste parâmetro altera a geometria do cordão, tornando-o convexo. Uma excessiva redução desse parâmetro pode extinguir o arco, ou permitir que o eletrodo “mergulhe” na poça de fusão, tocando o metal base não fundido sob a mesma, com graves conseqüências sobre as propriedades mecânico/metalúrgicas da junta e geometria do cordão.

▪ Corrente

A corrente de soldagem é diretamente proporcional e a principal responsável pela penetração. Também, preponderantemente, determina o

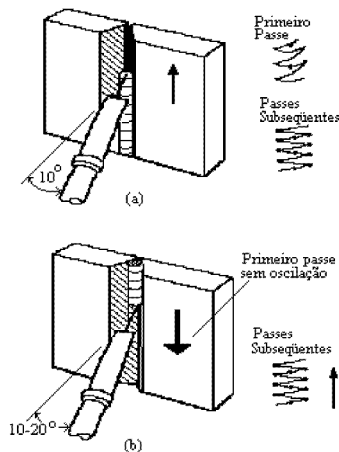


Figura 6.8 - Soldagem de Juntas a Topo: (a) “V” com nariz; (b) “V” simples.

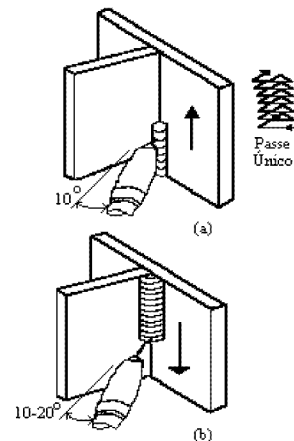


Figura 6.9 - Soldagem de Juntas de Filete: (a) Vertical-descendente; (b) Vertical-ascendente.

modo de transferência e a taxa de deposição, conforme mostrado na **Fig. 6.7**. Além disso, esse é o parâmetro que determina a velocidade de alimentação do arame e a **Fig. 6.10** ilustra essa relação para o AWS E70T-1, com diferentes bitolas e proteção com CO₂. Outrossim, excessiva intensidade de corrente produz um cordão convexo, enquanto que muito baixa resulta em grandes gotas sendo transferidas; alto nível de salpico e contaminação do metal de solda por nitrogênio do ar ambiente, quando são utilizados eletrodos auto-protegidos. Conforme esse parâmetro é alterado, a tensão deve ser simultaneamente ajustada, de modo a manter ótima a estabilidade do arco.

- Extensão de Eletrodo

A distância bico de contato/peça é uma variável de muita importância nesse processo. Essa extensão do eletrodo é aquecida por efeito Joule (I^2R), causando uma queda de tensão. Como consequência, há alteração na taxa de deposição; penetração e estabilidade do arco. A **Fig. 6.11** mostra como pode variar a corrente, em função da extensão do eletrodo, mantida constante a velocidade de alimentação. Como a corrente é ajustável, torna-se possível aumentos da ordem de 100% na



figura 6.11 - Alteração da Corrente com a Extensão do Eletrodo Após o Bico de Contato.

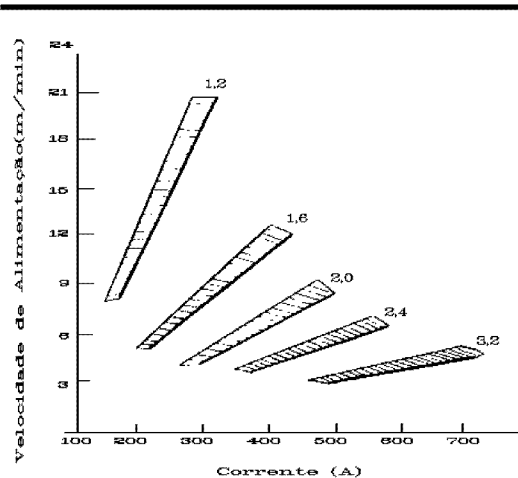


Figura 6.10 - Relação entre a Corrente e a Velocidade de Alimentação do Arame para o Eletrodo AWS E70T-1.

taxa de deposição, quando a extensão passa de 20 mm para 60 mm, por exemplo. O exato valor dessa extensão depende de condições específicas do trabalho e recomendações do fabricante do consumível. De forma geral, para eletrodos com proteção por gás, é recomendada uma extensão entre 20 e 40 mm, enquanto que para eletrodos auto-protegidos a mesma pode ser de 20 a 90 mm.

- Velocidade de Soldagem

Esse parâmetro influencia de forma geral a geometria do cordão. Quando excessivamente grande, torna o cordão convexo com bordas irregulares e diminui a penetração. Se a velocidade for muito pequena, há inclusão de escória e cordão irregular. Outrossim, é um importante fator na determinação da energia de soldagem, pois pode atuar num grande intervalo.

PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

Os seguintes procedimentos são típicos para a soldagem de aços ao carbono e baixa liga:

- Juntas a Topo

As **Tab. 6.3 e 6.4** apresentam condições para soldagem dessas juntas, as quais são descri-

tas na **Fig. 6.12**.

- Juntas de Filete

Nas **Tab. 6.5 à 6.8** são mostradas condições de soldagem para juntas de filete, com diferentes tamanhos (pernas) do cordão.

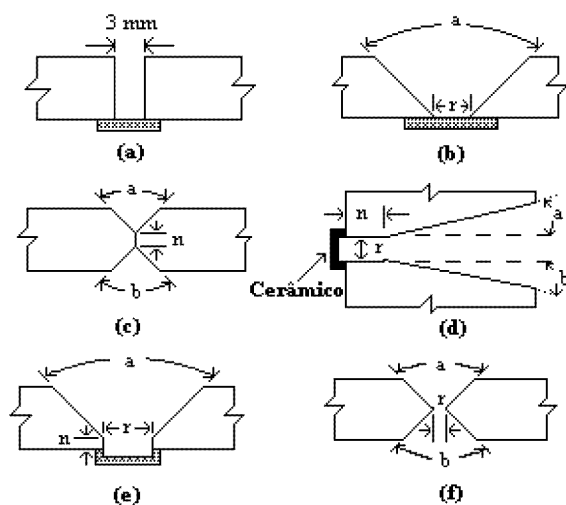


Figura 6.12 - Juntas Especificadas nas Tabelas 6.3 e 6.4.

Tabela 6.3 - Procedimentos Típicos de Soldagem com Eletrodo Tubular (Aços ao Carbono e Baixa Liga - Juntas à Topo - Posição Plana)

Espessura	Consumível Tipo/Diâmetro (mm)	Junta *(a/b/r/n)	Nº de Passes	Corrente (A)	Tensão (V)	Gás†	Massa de Consumível **(Kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
6	T-1/2,4	A	1	400	25	(a)	0,325	3,08
	T-1/2,4	B(50/3)	1 a 3	450	30	(a)	0,991	7,87
13,0	T-5/2,4	B(50/3)	1 a 3	450	28	(b)	0,982	7,48
		C(50/50/2)	1 e 1S	450	28	(b)	0,240	1,84
	T-4/2,4	B(30/6)	1 a 3	40	31	(c)	1,071	5,94
19,0	T-6/2,4	B(30/6)	1 a 3	350	22	(c)	1,128	11,97
	T-1/2,4	B(50/3)	1 a 4	450	30	(a)	2,165	17,85
		C(50/50/2)	1 e 1S	450	30	(a)	0,706	5,82
		T-5/2,4	B(50/3)	1 a 4	450	28	(b)	2,146
25,0	T-5/2,4	C(50/50/2)	1 e 1S	450	28	(b)	0,694	5,33
		T-4/2,4	B(30/6)	1 a 4	400	31	(c)	2,043
	T-1/2,4	B(50/3)	1 a 6	450	30	(a)	3,520	10,65
		C(50/50/2)	1, 2, 1S e 2S	450	30	(a)	1,292	10,65
		T-5/2,4	B(50/3)	1 a 5	450	28	(b)	3,485
	T-5/1,6	C(50/50/1)	1, 2, 1S e 2S	450	28	(b)	1,395	10,62
			1 a 3, 1S e 2S	350	30	(a)	1,458	13,23
T-4/2,4		B(30/6)	1 a 6	400	31	(c)	3,078	19,93
T-6/2,0	B(30/6)	1 a 9	350	22	(c)	3,241	34,41	

Notas: * Referente à Fig.6.12. ** Rendimentos Médios: T-1 de 89%; T-4 de 88%; T-5 de 90%; T-6 de 84%; T-8 de 83%. † Tipos dos Gases de Proteção (a) 100% CO₂; (b) 80% Argônio + 20% CO₂; (c) Nenhum (auto-protegido).

Tabela 6.4 - Procedimentos Típicos de Soldagem com Eletrodo Tubular (Aços ao Carbono e Baixa Liga - Juntas à Topo - Posições Horizontal-H e Vertical-V)

Espes-sura (mm)	Consumível Tipo/Diâmetro (mm)	Posição Junta *(a/b/r/n)	Nº de Passes	Corrente (A)	Tensão (V)	Gás †	Massa de Consumível **(Kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
13,0	T-1/1,2	H-D(30/15/3/2)	1 a 5	170	20	(b)	0,830	21,66
		V-E(60/3/2)	1 a 3	180	21	(b)	0,925	21,92
19,0	T-1/1,2	V-E(50/3/2)	1 a 5	180	21	(b)	1,892	44,87
		V-F(50/50/4)	1 a 5	190	22	(b)	2,670	57,50
25,0	T-1/1,6	H-D(30/15/3/2)	1	250	22	(b)		
			2 a 7	300	24	(b)	3,072	50,17
			8 a 12	250	22	(b)		
	T-1/1,2	V-E(50/3/2)	1 a 5	210	23	(b)	3,306	64,75
			6	180	21	(b)		
			1 a 7	190	22	(b)	1,740	37,48
	T-5/1,6	H-D(30/15/3/2)	1	200	21	(a)		
			2 a 7	250	23	(a)	3,04	42,56
			8 a 11	200	21	(a)		
	T-5/1,2	V-B(60/5)	1	150	17	(b)	5,09	129,0
			s/ mata junta	2 a 11	170	18	(b)	
	8T-8/2,0	H-D(30/15/3/1,5)	1	175	17	(c)	3,289	99,44
			s/ cerâmico	2 a 15	220	18	(c)	
		V-E(60/3/2)	1	150	17	(c)	3,95	127,47
s/ cerâmico			2 a 15	225	19	(c)		

Notas: * Referente à Fig.6.12. ** Rendimentos Médios: T-1 de 89%; T-5 de 90%; T-8 de 83%. † Tipos dos Gases de Proteção: (a) 100% CO₂; (b) 80% Argônio + 20% CO₂; (c) Nenhum (auto-protetido).

Tabela 6.5 - Procedimentos Típicos de Soldagem com Eletrodo Tubular (Aços ao Carbono e Baixa Liga - Juntas de Filete - Posição Plana)

Tamanho da Perna (mm)	Consumível Tipo/Diâmetro (mm)	Nº de Passes	Corrente (A)	Tensão (V)	Gás*	Massa de Consumível **(Kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
6,0	T-1/2,4	1	450	30	(a)	0,175	1,44
	T-1/1,6	1	350	27	(a)	0,187	2,18
	T-5/2,4	1	425	25	(b)	0,173	1,40
	T-6/2,0	1	350	22	(c)	0,186	1,97
13,0	T-1/2,4	1	450	30	(a)	0,697	5,75
	T-1/1,6	1 e 2	350	27	(a)	0,748	8,69
	T-5/2,4	1 e 2	425	25	(b)	0,692	5,58
	T-5/1,6	1 e 2	350	30	(a)	0,722	6,56
	T-4/2,4	1 e 2	400	31	(c)	0,704	4,59
	T-6/2,0	1 e 2	350	22	(c)	0,741	7,87
	T-1/2,4	1 a 4	450	30	(a)	1,750	14,42
19,0	T-4/2,4	1 a 4	400	31	(c)	1,766	11,51
	T-1/2,4	1 a 6	450	30	(a)	3,030	24,97
25,0	T-4/2,4	1 a 6	400	31	(a)	3,057	19,91

Notas: * Tipos dos Gases de Proteção: (a) 100% CO₂; (b) 80% Argônio + 20% CO₂; (c) Nenhum (auto-protetido). ** Rendimentos Médios: T-1 de 89%; T-4 de 88%; T-5 de 90%; T-6 de 84%.

Tabela 6.6 - Procedimentos Típicos de Soldagem com Eletrodo Tubular (Aços ao Carbono e Baixa Liga - Juntas de Filete - Posição Horizontal)

Tamanho da Perna (mm)	Consumível Tipo/Diâmetro (mm)	Nº de Passes	Corrente (A)	Tensão (V)	Gás*	Massa de Consumível **(Kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
6,0	T-1/2,4	1	400	28	(a)	0,175	1,63
	T-1/1,6	1	300	25	(a)	0,187	2,88
	T-5/2,4	1	425	25	(b)	0,173	1,40
	T-5/1,6	1	325	29	(a)	0,181	1,80
	T-6/2,0	1	350	22	(c)	0,186	1,97
	13,0	T-1/2,4	1 a 3	400	28	(a)	0,697
T-1/1,6		1 a 3	300	25	(a)	0,748	11,50
T-5/2,4		1 a 3	425	25	(b)	0,692	5,58
T-5/1,6		1 a 3	325	29	(a)	0,722	7,19
T-4/2,4		1 a 3	350	30	(c)	0,704	5,66
T-6/2,0		1 a 3	350	22	(c)	0,741	7,87
19,0	T-1/2,4	1 a 6	450	30	(a)	1,750	14,42
	T-4/2,4	1 a 6	400	31	(c)	1,766	11,51
25,5	T-1/2,4	1 a 12	450	30	(a)	3,030	24,97
	T-4/2,4	1 a 12	400	31	(c)	3,057	19,91

Notas: * Tipos dos Gases de Proteção: (a) 100% CO₂; (b) 80% Argônio + 20% CO₂; (c) Nenhum (auto-protetido). ** Rendimentos Médios: T-1 de 89%; T-4 de 88%; T-5 de 90%; T-6 de 84%.

Tabela 6.7 - Procedimentos Típicos de Soldagem com Eletrodo Tubular (Aços ao Carbono e Baixa Liga - Juntas de Filete - Posição Vertical)

Tamanho da Perna (mm)	Consumível Tipo/Diâmetro (mm)	Nº de Passes	Corrente (A)	Tensão (V)	Gás*	Massa de Consumível **(Kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
6,0	T-1/1,6	1	220	24	(a)	0,190	4,46
	T-1/1,2	1	200	23	(a)	0,187	3,82
	T-8/2,0	1	200	18	(b)	0,189	7,20
13,0	T-1/1,6	1 e 2	220	24	(a)	0,760	17,80
	T-1/1,2	1 e 2	200	23	(a)	0,748	15,26
	T-8/2,0	1 e 2	200	18	(b)	0,754	28,75

Notas: * Tipos dos Gases de Proteção: (a) 100% CO₂; (b) Nenhum (auto-protetido). ** Rendimentos Médios: T-1 de 89%; T-8 de 83%.

Tabela 6.8 - Procedimentos Típicos de Soldagem com Eletrodo Tubular (Aços ao Carbono e Baixa Liga - Juntas de Filete - Posição Sobrecabeça)

Tamanho da Perna (mm)	Consumível Tipo/Diâmetro (mm)	Nº de Passes	Corrente (A)	Tensão (V)	Gás*	Massa de Consumível **(Kg/m)	Tempo Total de Arco (min/m)
6,0	T-1/1,6	1	220	24	(a)	0,190	4,46
	T-1/1,2	1	200	23	(a)	0,187	3,82
	T-8/2,0	1	210	18	(b)	0,189	6,24
13,0	T-1/1,6	1 a 3	220	24	(a)	0,760	17,80
	T-1/1,2	1 a 3	200	23	(a)	0,748	15,26
	T-8/2,0	1 a 3	210	18	(b)	0,754	24,92

Notas: * Tipos dos Gases de Proteção: (a) 100% CO₂; (b) Nenhum (auto-protetido). ** Rendimentos Médios: T-1 de 89%; T-8 de 83%.

**C
A
P
Í
T
U
L
O**
07

**SOLDAGEM A ARCO COM
PROTEÇÃO POR GÁS E
ELETRODO NÃO CONSUMÍVEL
("TIG")**

INTRODUÇÃO	172
CARACTERÍSTICAS E ELETRODOS	172
Controles e Acessórios	176
GÁS DE PROTEÇÃO	177
Tipos	177
Vazão do Gás	178
OPERAÇÃO E VARIANTES DO PROCESSO	179
Técnicas	179
Arame Quente	181
Ação Sobre o Arco	181
TIG Ponto	182
TIG Pulsado	182
PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM	184
PROBLEMAS OPERACIONAIS	190

INTRODUÇÃO

Este processo de soldagem é provavelmente mais conhecido no Brasil pela sigla em inglês TIG (“Tungsten Inert Gas”). No mesmo, um eletrodo não consumível de tungstênio puro - ou composto com outros metais, ou óxidos - gera um arco elétrico com a peça, que juntamente com a poça de fusão assim formada, é protegido da atmosfera por um gás inerte (geralmente argônio), com a **Fig. 7.1** ilustrando esquematicamente o sistema.

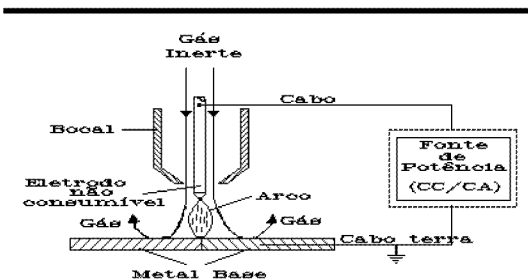


Figura 7.1 - Ilustração Esquemática do Processo TIG.

O modo de operação do TIG é geralmente manual, mas também encontra emprego nos modos semi-automático e automático, sendo utilizado para soldar juntas pela simples fusão dos materiais base envolvidos, ou, também, com a adição de consumível. Nesse caso, isso é realizado pelo soldador através de vareta, ou contínua e automati-

camente, com arame proveniente de uma bobina.

Apesar do conceito deste processo ser antigo (foram realizadas várias tentativas em 1919), o mesmo se desenvolveu somente em torno de 1940 nos EUA - em plena 2ª Grande Guerra Mundial, portanto - para realizar soldas de alta qualidade sobre ligas de alumínio; aço inoxidável e magnésio. Os problemas inicialmente enfrentados não foram poucos. O eletrodo utilizado era de carvão e operava em corrente contínua polaridade positiva (CCEP), sendo que ocorria superaquecimento da tocha e o gás de proteção era relativamente impuro.

As dificuldades iniciais foram resolvidas e o TIG está muito bem estabelecido, sendo utilizado geralmente para soldar juntas com espessuras de 0,2 a 8 mm, sobre materiais tais como aços inoxidáveis e refratários; alumínio, magnésio, cobre, níquel e suas ligas, além de ser uma excelente opção para titânio e zircônio.

Devido à sua pequena taxa de deposição - 0,2 a até 2 kg/h quando são usadas variantes - esse processo não é geralmente empregado para juntas espessas. Entretanto, existindo requerimento de alta qualidade (tais como estanqueidade; baixo hidrogênio, etc.), juntas de grande espessura podem ser soldadas completamente, ou somente o passe de raiz realizado por TIG.

CARACTERÍSTICAS E ELETRODOS

Quando o TIG é empregado manualmente, a curva característica da fonte deve ser do tipo corrente constante (“tombante”), operando em CC ou CA. O eletrodo não deve tocar a peça (em curto-circuito) para iniciar o arco, mas utilizar um dos métodos abaixo descritos ao efetuar tal operação. Isso é importante, pois o toque do eletrodo na peça pode provocar inclusões de tungstênio no metal de solda, além de diminuir (em muito) sua vida útil. Entretanto, há um específico sistema para abertura do arco - com toque do eletrodo na peça, mas sem curto-circuito - o qual será descrito mais adiante.

Em CA o TIG sofre os problemas descritos no Capítulo 3 e comuns aos outros processos a arco elétrico, com dificuldade de re-ignição quando a tensão passa do ciclo negativo para o positivo. Esse fenômeno pode ter graves conseqüências, princi-

palmente na soldagem de metais que formam óxidos refratários (como o alumínio) e os equipamentos devem ser especialmente projetados, com adição de injetor de sobretensão; alta freqüência, ou outros.

Quando a alta freqüência é empregada - provocada por um gerador de 2 a 50 MHz acoplado ao equipamento - a operação de abertura do arco é realizada através da quebra do dielétrico (ar), sendo que isso pode provocar interferência em equipamentos eletrônicos que se encontrem num raio de até 20 m.

Por sua vez, a polaridade da corrente afeta tanto a distribuição de calor entre o eletrodo e a peça, quanto a penetração, conforme ilustrado na **Fig. 7.2**, sendo muito importante verificar a conexão elétrica antes do arco ser iniciado.

As possíveis polaridades são, portanto:

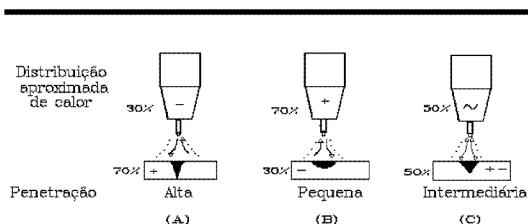


Figura 7.2 - Distribuição do Calor entre o Eletrodo e a Peça e Penetração, em Função da Polaridade.

❑ Corrente Contínua Eletrodo Polaridade Negativa (CCEN)

Esse é o tipo de corrente mais utilizado em TIG. Nesse caso, do calor total gerado, cerca de 30% é produzido no eletrodo e 70% na peça, ocorrendo a maior penetração entre as três polaridades. A poça formada é estreita e profunda, o que pode ser indesejável em peças muito finas. Diferentemente das outras polaridades, esta não provoca ação de limpeza de óxidos superficiais na poça de fusão. Outrossim, se o eletrodo for de tungstênio (W) puro, há oscilação de pontos catódicos sobre a superfície do mesmo, causando instabilidade do arco.

❑ Corrente Contínua Eletrodo Polaridade Positiva (CCEP)

Em torno de 70% do calor total é gerado no eletrodo e 30% na peça, resultando na menor penetração entre todos os casos, com a poça de fusão rasa e larga. Apesar de produzir um arco com a menor temperatura (mais “frio”), a CCEP pode ser de interesse naquelas situações em que se deseja pouca penetração e eficiente remoção dos óxidos superficiais que se formam sobre a poça de fusão, pois há oscilação de pontos catódicos sobre a mesma. Essa vantagem se aplica para poucos metais (como o alumínio) sendo geralmente preferível soldar em corrente alternada, que provoca efeito similar; requer menor treino do soldador e pode conduzir mais alta corrente para uma mesma bitola de eletrodo.

❑ Corrente Alternada (CA)

A distribuição do calor total é aproximadamente igual entre o eletrodo e a peça, com a penetração sendo intermediária entre CCEN e CCEP. Devido à variação da tensão entre máximos valores positivo e negativo durante cada ciclo, o arco se extingue toda vez que o ponto nulo é cruzado. Como um transformador convencional não produz suficientemente alta tensão para re-estabelecer o arco em atmosfera inerte (de negativo para positivo) deve ser sobreposta uma tensão de alta fre-

quência durante todo o tempo de soldagem. A CA produz uma excelente ação de limpeza dos óxidos superficiais na poça de fusão e é preferida na soldagem do alumínio, magnésio e cobre-berílio. Entretanto, a retificação é um problema que geralmente ocorre, sendo causado pela diferença de resistência ao fluxo de corrente durante os meio-ciclos negativo e positivo da tensão. A amplitude da corrente durante o meio-ciclo quando o eletrodo é negativo, é maior do que aquela do meio-ciclo positivo. Isso ocorre, porque o material do eletrodo emite elétrons muito mais facilmente do que o metal base, entre outras razões, devido ao mesmo se encontrar numa temperatura mais alta. Pode também ocorrer retificação completa, ou seja, anulação do meio-ciclo positivo do eletrodo.

Dessa forma, há um desequilíbrio da onda, que pode ser corrigido pela inserção de capacitores em série, ou uma fonte CC de tensão no circuito. A unidade pode possuir tensão de abertura do arco de 100 V (rms), com um injetor de alta frequência operando continuamente, ou planejado para operar quando a tensão do transformador cruza o zero.

A eficiência térmica desse processo é praticamente insensível à variação da velocidade de soldagem (quando a mesma está acima de 5 mm/s), situando-se entre 75% e 80%, ou seja, superior em cerca de 20% àquela do processo Plasma (veja Capítulo 9). Isso se deve ao fato, de que 89% da transferência de energia em TIG é realizada através dos elétrons. Entretanto, a eficiência de fusão (proporção do calor gerado no arco que é utilizado para fundir a peça) é função da velocidade de soldagem e, também, da potência elétrica do arco e coeficientes físicos do material. Em TIG, esta eficiência térmica oscila entre 15% e 45% (muito similar ao processo Plasma) estabilizando-se nesse patamar quando a velocidade de soldagem alcança (o alto valor) de 20 mm/s.

Num metal, a energia necessária para retirar elétrons da última camada do átomo (função trabalho), é proporcional à facilidade de se iniciar e manter um arco elétrico com o mesmo. Para o tungstênio puro (ponto de fusão 3410 °C), esta função trabalho é 4,4 eV, sendo esse o metal básico para os eletrodos, pois apresenta na atualidade a melhor relação custo benefício. Desta forma, se elementos com menor função trabalho forem adicionados ao tungstênio, estas propriedades operacionais podem ser melhoradas, destacando-se entre aqueles disponíveis: (a) Cério, com 2,6 eV; (b) Lantânio, com 3,3 eV; (c) Tório, com 3,4 eV; (d)

Zircônio, com 4,2 eV.

Industrialmente, adiciona-se ao tungstênio os óxidos destes elementos (são estáveis). Com isto, torna-se importante não somente a composição química mas, também, a distribuição e a fração volumétrica destes óxidos (os quais são isolantes elétricos). Como consequência, os eletrodos apresentam diferentes características operacionais.

Os eletrodos para TIG são classificados pela AWS A5.12-92 seguindo a seguinte convenção, escrita nesta ordem: (a) “E” para eletrodo; (b) “W”, que é o símbolo químico do tungstênio (em alemão “wolfram”); (c) Símbolo químico do metal que compõe o óxido adicionado, sendo “P” para tungstênio puro; (d) Número indicando a proporção (% em massa) do óxido adicionado.

Portanto, a citada Norma classifica os seguintes eletrodos:

□ Tungstênio puro (EWP)

Deve apresentar pureza mínima de 99,5% W. Comparado com os outros tipos, o mesmo suporta uma menor densidade de corrente e, quando opera em CCEN, produz poça de fusão relativamente mais estreita. Em CA, o EWP produz um arco estável, tanto em onda balanceada, quanto com estabilização contínua por alta frequência, com gás de proteção argônio, hélio, ou combinação de ambos. Nessa polaridade (CA), esses eletrodos formam e mantêm uma ponta semi-esférica, a qual é preferida para a soldagem de alumínio, magnésio e suas ligas. Entretanto, na soldagem de outros materiais, esses eletrodos de baixo custo só podem ser utilizados em aplicações menos críticas, pois facilmente podem contaminar o metal de solda. A cor de identificação sobre o corpo é verde.

□ Tungstênio com Óxido de Cério (EWCe-2)

O tungstênio deve estar presente num mínimo de 97,3%, com 1,8-2,2% CeO₂, com outros óxidos, ou elementos no máximo 0,5%, sendo que comercialmente existem eletrodos com diversos conteúdos de CeO₂. Comparando com o EWP, o EWCe-2 apresenta mais fácil ignição; maior estabilidade do arco e menor possibilidade de contaminar a poça de fusão, sendo essas propriedades tanto melhores, quanto maior a proporção de cério (Ce). O tipo de corrente pode ser alternada, ou contínua (ambas polaridades), sendo que uma vantagem, quando comparado com eletrodos que contêm tório (veja abaixo), é que esses não são radioativos, além de apresentarem vida mais longa. Por outro lado, a tensão de trabalho desse eletrodo é

levemente maior do que a do toriado. A cor de identificação do mesmo é laranja.

□ Tungstênio com Óxido de Lantânio (EWLa-1)

Esse eletrodo deve possuir 98,3% no mínimo de tungstênio, com 0,9-1,2% La₂O₃ (óxido de lantânio), com outros óxidos, ou elementos no máximo 0,5%, não sendo radioativo. Suas vantagens e características operacionais são similares ao EWCe-2, mas a tensão de trabalho que opera é levemente diferente desse (e também do toriado). A cor de identificação é preto.

□ Tungstênio com Óxido de Tório

Os eletrodos com tório possuem as seguintes características gerais, quando comparados com aqueles de tungstênio puro: (a) Mais alta emissividade eletrônica; (b) Melhor estabilidade e facilidade de iniciar o arco; (c) Suportam maior densidade de corrente; (d) Apresentam uma vida útil mais longa. Portanto, esses eletrodos são muito mais facilmente contaminados. Apesar do óxido em questão possuir um muito baixo nível de radioatividade, é recomendável que sejam tomadas precauções para não se ingerir, ou inalar seu pó, bem como não utilizá-lo por grande período de tempo em ambiente confinado.

As classes EWTh-1 e EWTh-2 foram desenvolvidas para soldagem com corrente contínua, mantendo o formato cônico da ponta, sendo recomendável para aplicações sobre ferrosos. Se operados em CA, será difícil a obtenção de uma ponta semi-esférica, a qual é desejável na soldagem dos não-ferrosos.

Os dois tipos normalizados são os seguintes:

- EWTh-1: Deve possuir 98,3% no mínimo de tungstênio e 0,8-1,2% ThO₂ (óxido de tório), sendo o restante 0,5% no máximo, com cor de identificação amarela;

- EWTh-2: Deve possuir 97,3% no mínimo de tungstênio e 1,7-2,2% ThO₂, sendo o restante 0,5% no máximo, com cor de identificação vermelha.

□ Tungstênio com Óxido de Zircônio (EWZr-1)

Esse eletrodo deve conter no mínimo 99,1% de tungstênio e 0,15-0,40% ZrO₂, sendo o restante 0,5% no máximo. O mesmo dificilmente contamina o metal de solda, operando em CA e mantendo a ponta semi-esférica, sendo utilizado em aplicação de alta qualidade sobre alumínio, mag-

nésio e suas ligas. Suas demais propriedades são intermediárias entre as classes anteriormente apresentadas. A sua cor de identificação é marrom.

□ Classe Não Especificada (EWG)

Eletrodos nessa classe devem conter no mínimo 94,5% de tungstênio, sendo que o fabricante precisa identificar seus constituintes e características.

A **Tab. 7.1** mostra eletrodos de diferentes diâmetros, com os intervalos recomendados de corrente para operação. Os comprimentos padronizados dos mesmos são 50; 75; 150 e 175 mm, podendo, no entanto, alcançar até 600 mm.

O acabamento superficial do eletrodo também é muito importante para aumentar sua vida útil, sendo recomendável 10 rms, ou mais polido ainda. A forma da ponta pode ser obtida por retificação excêntrica (cuja operação deve ser cercada de cuidados, devido à produção de minúsculas partículas que podem ser inspiradas), ou ataque químico, mergulhando-se a mesma repetidamente (ainda rubra) em pó de nitrato de sódio (o que é prático e resulta numa superfície com excelente polimento).

A soldagem em CA é geralmente realizada com eletrodos de tungstênio puro, ou com zircônio, pois as pontas dos mesmos, sob o calor do arco elétrico, tomam o formato semi-esférico e assim se mantém durante a operação. Esta geometria deve

ser obtida antes da soldagem iniciar, estabelecendo-se o arco elétrico entre o eletrodo e (por exemplo) uma base de cobre refrigerada com água. Lentamente aumenta-se a corrente, até que a ponta inicie a fundir e, então, se reduz a mesma gradualmente.

Entretanto, os eletrodos com tório, lantânio e cério não formam essa semi-esfera, sendo empregados, então, em CC, com a **Fig. 7.3(a)** mostrando que a ponta deve ser em ângulo (com a extremidade truncada, ou seja, diferente de zero).

Por sua vez, em CA a preparação da ponta deve ser aquela mostrada na **Fig. 7.3(b)**.

O valor deste ângulo influi sobre a geometria da poça de fusão. Em geral, quanto mais agudo o mesmo for resulta em aumento da penetração e redução da largura. Além disso, também são alteradas as demais características elétricas do arco.

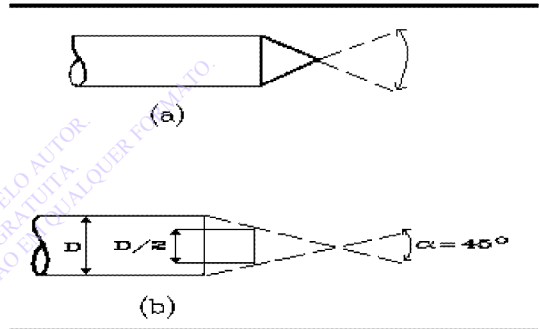


Figura 7.3 - Preparação da Ponta do Eletrodo: (a) Corrente Contínua; (b) Corrente Alternada.

Tabela 7.1 - Típicos Intervalos Admissíveis de Corrente para Diferentes Tipos e Diâmetros de Eletrodos Não Consumíveis no Processo TIG*

Diâmetro do Eletrodo (mm)	Corrente Contínua (EWP, EWTh-1, EWTh-2, EWTh-3)		Corrente Alternada (A)					
	(A)		Onda Desequilibrada			Onda Equilibrada		
	CCEN	CCEP	EWP	EWTh-1E	EWTh-3	EWP	EWTh-1E	EWTh-3
0,3	Até 15	(a)	Até 15	Até 15	(a)	Até 15	Até 15	(a)
0,5	5-20	(a)	5-15	5-20	(a)	10-20	5-20	10-20
1,0	15-80	(a)	10-60	15-80	10-80	20-30	20-60	20-60
1,6	70-150	10-20	50-100	70-150	50-150	30-80	60-120	30-120
2,4	150-250	15-30	100-160	140-235	100-235	60-130	100-180	60-180
3,2	250-400	25-40	150-210	225-325	150-325	100-180	160-250	100-250
4,0	400-500	40-55	200-275	300-400	200-400	160-240	200-320	160-320
4,8	500-750	55-80	250-350	400-500	250-500	190-300	290-390	190-390
6,3	750-1000	80-125	325-450	500-630	325-630	250-400	340-525	250-525

Notas: * Os valores apresentados são baseados no uso de argônio como gás de proteção, podendo ser alterados se outro gás for utilizado. (c) Essas combinações não são normalmente empregadas.

A **Tab. 7.2** apresenta algumas sugestões com relação à este assunto.

Tabela 7.2 - Características Geométricas da Ponta dos Eletrodos para TIG, operando com Gás de Proteção Argônio em CCEN

Diâmetro do Eletrodo (mm)	Diâmetro na Ponta (mm)	Ângulo da Ponta (°)	Intervalo de Corrente (A)
1,0	0,125	12	2 à 15
1,0	0,25	20	5 à 30
1,6	0,5	25	8 à 50
1,6	0,8	30	10 à 70
2,4	0,8	35	12 à 90
2,4	1,1	45	15 à 150
3,2	1,1	60	20 à 200
3,2	1,5	90	25 à 250

CONTROLES E ACESSÓRIOS

Os sistemas eletrônicos modernos permitem a obtenção de curva característica da fonte do tipo tombante, praticamente vertical no intervalo de operação, com controle da corrente em $\pm 1\%$. Estas fontes possibilitam a realização de soldas de alta qualidade.

Num equipamento TIG, os controles geralmente disponíveis são: (a) Intensidade, tipo de corrente e alta frequência; (b) Temporizadores, para que ocorra fluxo de gás antes do arco iniciar e após a corrente ter sido interrompida; (c) Vazão do fluxo de gás. Para o TIG pulsado são adicionados, ainda, regulagem para as correntes base; de pico e da frequência com que as mesmas atuam (ou tempos). Portanto, os cabos que conectam a tocha à fonte são, então, da corrente e alta frequência; água de refrigeração; gás de proteção e controle liga/desliga.

De forma geral, a tensão de trabalho (U) depende do nível da corrente e do comprimento do arco, sendo que há boa estabilidade quando a seguinte relação é satisfeita, para correntes (I) me-

nores do que 600 A:

$$U = 10 + 0,04.I \quad (V) \quad [7.1]$$

O porta eletrodo (ou “tocha”) é um importante acessório do equipamento, existindo grande variedade de modelos, sendo que a **Fig. 7.4** mostra esquematicamente um tipo. A tocha deve ser compacta; leve; robusta e eletricamente isolada. Um importante aspecto na escolha da mesma, é o nível de corrente máximo que será utilizado. Do mesmo modo, o ângulo do eletrodo com o punho e a possibilidade de utilizar diferentes bitolas de eletrodos, são fatores a serem considerados. A mais importante distinção entre as tochas, entretanto, é se as mesmas são resfriadas com ar ou água. Na realidade, o resfriamento realizado pelo ar é somente por radiação para o ambiente, enquanto o gás que circula é o principal responsável por este fator. Tochas desse tipo são geralmente limitadas a corrente máxiam de 250 A e o eletrodo opera em temperatura mais alta do que naquelas refrigeradas a água, as quais podem operar com até cerca de 500 A.

Outrossim, as mangueiras de gás e de refrigeração devem ser tratadas com especial atenção, evitando-se vazamentos e penetração de ar no sistema.

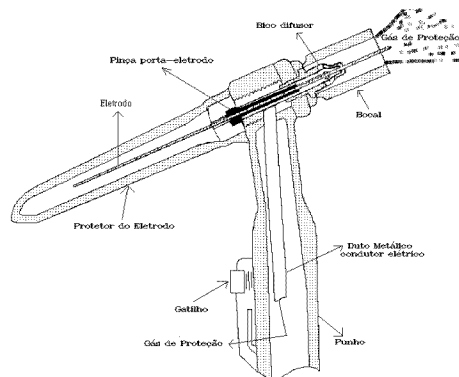


Figura 7.4-Porta eletrodo (“tocha”) para a soldagem TIG.

GÁS DE PROTEÇÃO

TIPOS

O gás de proteção é geralmente fornecido em cilindros com capacidade de 4 a 10 m³, e pressão em torno de 190 bars no caso do argônio, ou em reservatórios maiores. Para a soldagem, esta pressão deve ser reduzida através de um regulador em até cerca de 4 bars, podendo o mesmo ser calibrado para fornecer diretamente leitura da vazão. Entretanto, é preferível que a vazão seja indicada por um manômetro (fluxômetro). No Anexo 1 são discutidos os reguladores; manômetros; cilindros e outros aspectos relativos ao controle dos gases.

O propósito do gás de proteção é impedir a oxidação do eletrodo e proteger a poça de fusão. Apesar do tungstênio fundir em alta temperatura, sua oxidação ocorre muito mais abaixo. Portanto, recomenda-se a verificação da cor do eletrodo após o arco ser extinto e resfriar até a temperatura ambiente. Caso a superfície do mesmo não se mantenha “prateada”, ou há fuga de gás do sistema; ou o gás é impuro; ou, ainda, o restante do gás que sempre permanece no bocal não se mantém ali até o eletrodo resfriar. Nesse último caso, sugere-se que após a extinção do arco, o fluxo de gás permaneça na razão de 1 s para cada 10 A da corrente utilizada (“pós-fluxo”).

A soldagem de metais reativos, como titânio; tântalo; zircônio, etc., pode requerer o uso de ga-

ses de muito alta pureza. Para operações críticas, pode ser acordado entre o fornecedor e o usuário, que este último interrompa o uso do cilindro quando for alcançada uma dada pressão, geralmente em torno de 2 bar. Comercialmente, os gases argônio e hélio são normalmente produzidos com pureza de 99,995%.

A escolha do gás de proteção pode afetar significativamente a qualidade e o custo da solda, sendo que a **Tab. 7.3** apresenta algumas sugestões para metais base usuais.

Deve-se notar, ainda, que o argônio é 1,3 vezes mais denso que o ar, misturando-se com o mesmo em ambiente confinado. É, também, 10 vezes mais denso que o hélio, sendo melhor indicado para certas posições de soldagem, pois esse último gás tende a rapidamente deixar o bocal. O argônio é mais utilizado, também, por seu menor preço e proporcionar arco estável e suave, além de promover boa ação de limpeza dos óxidos superficiais em CA.

A densidade do hélio é 1/7 daquela do ar e se mistura vagarosamente com a atmosfera ambiente. Para uma dada junta, é necessário mais hélio do que argônio. Portanto, na soldagem de tanques, ou vasos de pressão, o hélio tende a estacionar na parte superior, o que pode ser perigoso se o soldador estiver no interior da estrutura, com o argônio se alojando no fundo da mesma. O hélio produz

Tabela 7.3 - Gases de Proteção Sugeridos e Aplicações para o Processo TIG*

Material Base	Gás Preferido	Alternativa	Metal Base	Gás Preferido	Alternativa
Alumínio e suas Ligas	Ar(CA);Ar+He (CA)	He**	Cupro-Níquel	Ar	Ar+H ₂
Aços Baixo Carbono	Ar - solda manual	He†	Inconel	Ar	He†
Aços Inoxidáveis	Ar‡	A+H ₂	Latões	Ar	-
Aços Inoxidáveis PH	Ar‡	A+He	Magnésio e suas Ligas	Ar(CA)	-
Aços Maraging	Ar	-	Molibdênio e suas Ligas	Ar ou He puros	Ar+H ₂
Bronze de Alumínio	Ar	-	Monel	Ar	Ar+H ₂
Bronze de Silício	Ar	-	Níquel e suas Ligas	Ar	He†
Cobalto e suas Ligas	Ar	-	Titânio e suas Ligas	Ar	He†
Cobre Desoxidado	Ar‡	N ₂			

* Soldagem em CCEN, a menos que indicado ao contrário. Em Corrente Alternada (CA), a alta frequência deve permanecer ligada; ** Para soldagem em alta velocidade, sobre superfície quimicamente limpa; † Para soldagem automática em alta velocidade; ‡ Hélio nos EUA.

uma poça de fusão muito quente e fluida, reque-rendo juntas precisamente posicionadas e provo-cando maior penetração do que o argônio.

De forma geral, uma maior vazão de hélio do que argônio é necessário para efeito igual de pe-netração, mas é possível se obter aumento na ve-locidade de soldagem de 30 a 40%.

Misturas hélio-argônio são largamente utiliza-das (nos E.U.A.) em soldas automáticas e quando a alta penetração produzida pelo hélio é desejada, mas com a estabilidade e suavidade do arco indu-zida pelo argônio. Uma solução de compromisso entre os dois extremos é fornecida pela mistura 80%He e 20%A.

A adição do hidrogênio ao argônio produz um arco muito mais quente, sendo que com 20% H_2 a tensão do arco equivale àquela do hélio. Nesse caso, a velocidade de soldagem aumenta em até 50%; o cordão produzido é mais estreito e a seção transversal do metal de solda tende a ser retangu-lar. Adições de 2 a 35% de H_2 no argônio tem sido utilizada, sendo que maiores porcentagens podem causar porosidade. Essa mistura é aceitável em metais que apresentam persistente porosidade, como Monel e prata em aços inoxidáveis; ligas níquel-cobre e níquel. Entretanto, o hidrogênio não deve ser utilizado na soldagem dos aços ao carbo-no e baixa liga, já que esse elemento provoca efei-tos metalúrgicos adversos (trinca, porosidade, etc.). Outrossim, precauções devem ser tomadas no manuseio e uso do hidrogênio, pois quando com-binado com o oxigênio forma uma mistura explo-siva.

Apesar de acelerar a deterioração do eletrodo, o nitrogênio de alta pureza pode ser utilizado na soldagem do cobre e suas ligas. Esse gás permite obter um arco muito mais quente e a eficiência da transferência do calor é maior do que quando ar-gônio ou hélio é usado. Além disso, seu preço é muito menor do que o desses gases, acrescenant-do-se o fato de eletrodos “torriados” desgastarem lentamente.

VAZÃO DO GÁS

Tanto a vazão do gás excessivamente alta, quanto a muito baixa, resultam na produção de descontinuidades e, como consequência, elevação dos custos da soldagem.

A determinação da correta vazão do gás de-pende, no mínimo, dos seguintes fatores: (a) Tipo do gás de proteção; (b) Distância do bocal à peça; (c) Tipo de junta; (d) Geometria do bocal; (e) In-tensidade da corrente; (f) Existência de desloca-

mento de ar; (g) Inclinação da tocha; (h) Comprimento do arco; (i) Velocidade de soldagem; (j) Posição de soldagem; (l) Tipo do metal base.

De forma geral e considerando um condutor com geometria circular, a vazão do gás será lami-nar (o que é desejável) se o “número (adimensio-nal) de Reynolds” for menor do que 2000. Portan-to, a máxima velocidade de escoamento (ou “ve-locidade crítica”) deve ser menor ou igual ao dado pela equação abaixo:

$$V_{\text{crítica}} \leq 2000 \cdot \mu / (D \cdot \rho) \quad [7.2]$$

onde:

D= Diâmetro do condutor;

μ = Viscosidade do fluido;

ρ = Densidade do fluido.

Apesar da existência de equações teóricas para prever o fluxo laminar de fluidos, trata-se aqui de um complexo caso de magneto-hidrodinâmica e o caminho geralmente adotado para determinar as melhores condições é o empírico. Portanto, na **Tab. 7.4** são apresentadas sugestões de vazão dos ga-ses, para diversas intensidades de corrente e tipos de metais, sendo esses valores iniciais, os quais devem ser ajustados, dependendo das condições específicas de operação.

Tabela 7.4 - Vazão de Argônio em Função da Corrente de Soldagem no Processo TIG

Material	Vazão do Gás (l/min) para Correntes (A) de					
	100	150	200	250	300	350
Aços ao carbono e inoxidável	5	6	7	8	9	9
Alumínio e suas ligas	6	7	8	10	11	12
Titânio, cobre, magnésio, níquel e suas ligas	9	11	12	14	15	16

NOTA: Se o gás de proteção utilizado for no mínimo 70% de hélio, a vazão do gás deve ser cerca de 2,5 vezes aquela sugerida. Para misturas menos ricas em hélio, este multiplicador diminui, sendo 1,5 vezes com 30% desse elemento.

Vários materiais e configurações são empre-gadas para os bocais, sendo que os mesmos po-dem ser cerâmicos; metálicos (resfriados por radi-ação e pelo gás de proteção, ou pela circulação d'água); ou quartzo fundido. Os bocais cerâmicos (mais utilizados) podem sofrer fragilização após trabalho contínuo e deve ser tomado cuidado com

seu manuseio, principalmente enquanto quentes, além do que, com o uso, os mesmos apresentam irregularidades na borda, as quais podem alterar o fluxo de gás. Os bocais metálicos refrigerados com água permitem correntes de até 500 A, mas apresentam o inconveniente de perturbar a operação da alta frequência.

Os bocais podem ser equipados com um difusor (“lente”) de gás, mostrado na Fig. 7.5, o qual aumenta a área protegida e permite operação a uma distância maior da peça, o que pode ser conveniente em situações de difícil acesso. Outrossim, o aumento da área protegida é de interesse em metais que oxidam a temperaturas relativamente baixas (como o titânio). Esse difusor pode ser constituído por uma fina malha metálica, ou material

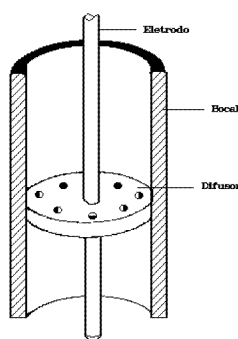


Figura 7.5 - Difusor (“Lente”) de Gás para Tocha TIG

poroso.

A Tab. 7.5 apresenta sugestões para o diâmetro do bocal em função da corrente e material a ser soldado. Esses são valores aproximados e devem ser ajustados para as condições específicas. Por outro lado, apesar dos bocais serem normalmente circulares, nada impede que outro formato seja utilizado, sendo respeitado o fato do fluxo ocorrer num modo não turbulento.

Com relação, ainda, à vazão do gás, o uso do “efeito térmico de constrição” do arco pode apresentar interesse em certas situações. Esse é um fenômeno que ocorre quando, pelo simples aumento do fluxo de gás - mantendo os outros parâmetros fixos - se obtém maior penetração. Isso é devido à constrição (redução do diâmetro) do arco, tornando-o mais quente e rígido. É claro que há limite para esse aumento de vazão, pois em excesso pode provocar fluxo turbulento de gás.

Tabela 7.5 - Diâmetro do Bocal em Função da Corrente de Soldagem com TIG

Material	Diâmetro do Bocal (mm) para Corrente (A)						
	100	150	200	250	300	350	400
Titânio	13	14	15	16	17	18	18
Outros	9	10	12	13	14	15	16

OPERAÇÃO E VARIANTES DO PROCESSO

TÉCNICAS

Em princípio, o eletrodo não deve se projetar para fora do bocal mais do que um comprimento igual a seu diâmetro, mas exceções ocorrem por absoluta necessidade de acesso. Por sua vez, é conveniente que o comprimento do arco não ultrapasse 1,5 vezes o diâmetro do eletrodo, pois quanto maior, mais alta a tensão e a taxa de dissipação do calor para o ambiente - reduzindo o rendimento térmico - além de aumentar a chance de ocorrer contaminação pelos gases da atmosfera.

O arco deve ser iniciado sem que o eletrodo toque a peça, sendo empregadas basicamente duas técnicas, ou seja: (a) Alta frequência; (b) Toque a peça - não “riscar” a mesma produzindo curto-circuito, como no eletrodo revestido - e afastar o eletrodo logo em seguida, quando então uma alta tensão ocorre nesse instante e forma o arco.

A soldagem é realizada com o eletrodo movimentando-se circularmente, formando uma poça de fusão com dimensão conveniente e deslocando-se gradualmente pela junta. Nas Figs. 7.6(a,b) estão ilustradas as técnicas da soldagem de juntas a topo sem (autógena) e com material de adição, respectivamente. A vareta é alimentada na região extrema da poça de fusão, num movimento de vai-e-vem, não tocando o eletrodo e sempre mantida sob a proteção do gás, sendo que ao término da solda, a mesma deve permanecer alguns segundos sob o bocal para prevenir sua oxidação. A tocha, então, ou é levantada gradualmente e recuada sobre o cordão para extinguir o arco, ou preferencialmente, a corrente é desligada e um dispositivo eletro-eletrônico diminui lentamente sua intensidade.

Na soldagem de peças finas, o eletrodo se desloca em linha reta. Entretanto, para peças mais

espessas, há concomitante aumento da bitola da vareta, a qual perturba o arco e pode causar inclusão de tungstênio no metal de solda. Portanto, neste caso o arco deve ser aumentado, para até um comprimento máximo de 6 mm. Por outro lado, na soldagem de peças muito espessas é empregada a técnica do “avanço” e do “recoo” da tocha. Assim, após o arco fundir o metal base, a tocha recua cerca de 6 mm sobre o cordão de solda formado e a ponta da vareta é inserida na poça de fusão. A seguir, a tocha avança e, simultaneamente, a vareta é retirada da poça, sendo a solda realizada através da repetição dessas etapas.

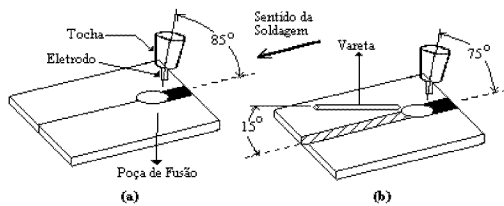


Figura 7.6 - Técnicas para a Soldagem a Topo TIG: (a) Sem e (b) Com Metal de Adição.

Por outro lado, as seguintes figuras ilustram técnicas adicionais para condução da tocha e vareta, em diferentes tipos de juntas e posições de soldagem :

- **Fig. 7.7:** solda de filete na posição horizontal;
- **Fig. 7.8(a,b):** solda a topo na posição horizontal. No primeiro passe - ou de raiz - na **Fig. 7.8(a)**, a combinação da velocidade de soldagem e adição de material deve ser tal, que o metal depositado preencha a face da junta da chapa inferior e somente pouco mais da metade da superior. No segundo passe - **Fig. 7.8(b)** - deve ser realizado um leve balanço com a tocha e vareta, de forma a fundir a face da junta na chapa superior e preencher o restante que for necessário;
- **Fig. 7.9:** solda de filete na posição vertical-ascendente. Não deve ser utilizada para chapas finas - menor do que cerca de 1,2 mm - pois produz distorção excessiva. Para essa espessura e menores, recomenda-se a posição vertical-descendente, sem metal de adição;
- **Fig. 7.10:** solda a topo na posição vertical-ascendente. A tocha não deve oscilar, com o arco curto mantido na direção central da junta, assim como a vareta;

- **Fig. 7.11:** solda na posição sobrecabeça, realizada sem metal de adição. Essa posição deve ser evitada sempre que possível em TIG.

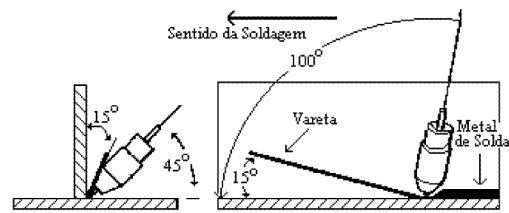


Figura 7.7 - Soldagem TIG de Filete na Posição Horizontal.

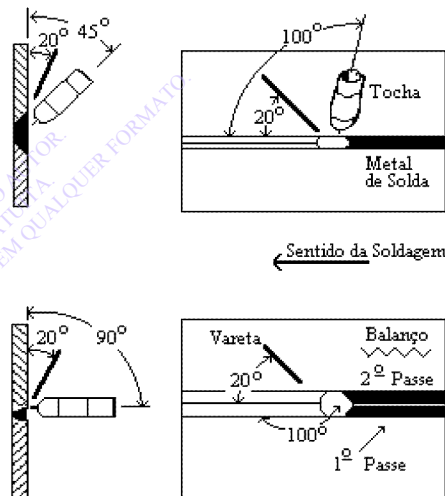


Figura 7.8 - Soldagem TIG a Topo na Posição Horizontal: (a) 1º Passe; (b) 2º Passe.

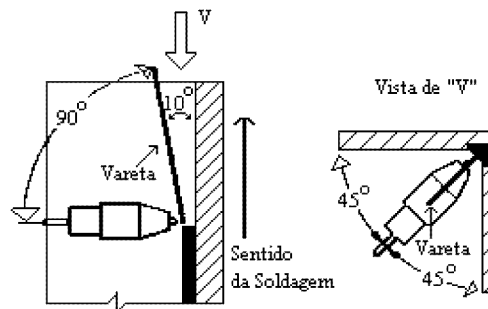


Figura 7.9 - Soldagem TIG de Filete na Posição Vertical-Ascendente.

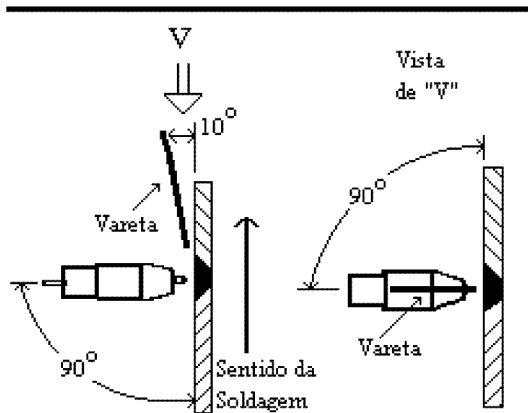


Figura 7.10 - Solda TIG a Topo na Posição Vertical-Ascendente.

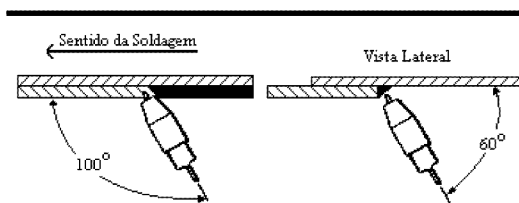


Figura 7.11 - Soldagem TIG de Junta Sobreposta na Posição Sobrecabeça.

Por outro lado, juntas de alta qualidade podem ser produzidas em tubulações, independentemente da espessura de parede dos tubos. A vareta deve ser introduzida por dentro do tubo, no sentido contrário da tocha. Outrossim e não somente em tubos, pode ocorrer oxidação do passe de raiz na parte do metal oposto ao lado da tocha, o qual não é protegido pelo gás. Nesse caso, é necessário realizar purga interna com o gás de proteção.

A alimentação também pode ser automática, através de um fino arame continuamente alimentado na poça de fusão, sem conexão elétrica alguma, sendo nesse caso denominada “arame frio”.

ARAME QUENTE

Um interessante meio de aumentar sensivelmente a taxa de deposição com TIG, é aquele em que um arame é alimentado continuamente na poça de fusão, sendo conectado a uma fonte de potência, conforme a Fig. 7.12 mostra. O eletrodo TIG é conectada em CCEN e o arame em CA. A ponta do consumível não forma arco com a peça, mantendo contato com a poça de fusão e, assim, se aquecendo resistivamente (efeito Joule). Dessa forma, o arco fornece a energia adicional necessá-

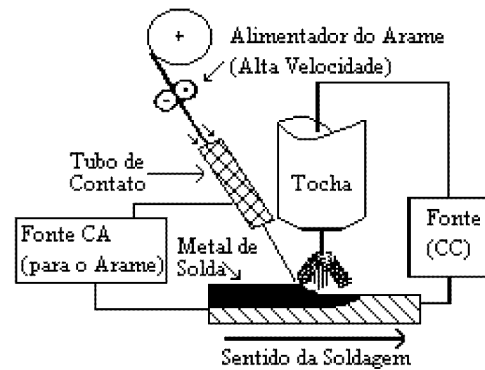


Figura 7.12 - Soldagem TIG com “Arame Quente”.

ria para que o arame funda continuamente, aumentando em muito a taxa de deposição.

Outrossim, se este “arame quente” sofrer oscilação, há ainda um maior aumento do metal depositado por unidade de tempo, o que é ilustrado na Fig. 7.13, a qual compara os três casos.

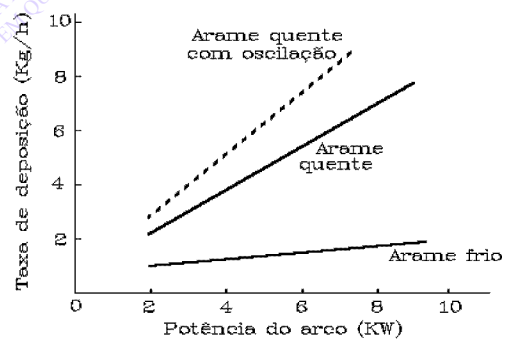


Figura 7.13 - Taxa de Deposição para Diferentes Sistemas TIG.

AÇÃO SOBRE O ARCO

Através de artifícios aplicados externamente, é possível obter estabilização do arco e, também, aumento de produtividade e/ou qualidade. Alguns dos sistemas empregados são:

- Adição de uma bobina magnética centrada no eixo do eletrodo (operando em CC), a qual deve ser controlada na direção de atuação e intensidade (até cerca de 200 Gauss). Dessa forma, se obtém um significativo aumento da rigidez do arco, como consequência da ação magnética sobre as partículas ionizadas do plasma. Esse sistema pode ser empregado em soldas nas quais o comportamento

do arco é errático, não modificando a geometria do cordão;

- Um considerável aumento da velocidade de soldagem, também pode ser obtido pela deflexão do arco por um campo magnético. Esse efeito é normalmente conseguido através do posicionamento de bobinas nos lados do arco, defletindo o mesmo no eixo da junta e na direção do movimento;

- O aumento da superfície da poça de fusão e diminuição da penetração pode ser de interesse. Isso é conseguido através da oscilação do arco, a qual é realizada por dispositivo mecânico para grandes amplitudes - maior do que 20 mm - ou produção de um campo magnético alternado nas cercanias do mesmo.

TIG PONTO

É possível utilizar o TIG para realizar pontos fundidos entre peças sobrepostas, nas posições plana e vertical. Os materiais base geralmente soldados por este método, são aços ao carbono; baixa liga e inoxidáveis, sendo o mesmo também viável sobre alumínio.

O eletrodo é geralmente conectado em CCEN, sendo que para o alumínio se utiliza CA. Diferentemente da solda convencional, o eletrodo fica retraído no bocal, com o ilustrado na **Fig. 7.14**, sendo que a corrente circula num curto intervalo de tempo. O comprimento do arco varia entre 0,4 e 1,6 mm e é importante na determinação do tamanho do ponto. Quando excessivamente longo, o arco se instabilizará e provocará variação na geometria da solda.

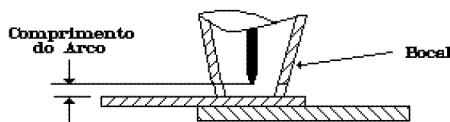


Figura 7.14-Soldagem com TIG ponto.

A forma da ponta do eletrodo é, também, um fator determinante sobre a geometria do ponto e em princípio não deve ser afinada, formando um ângulo agudo. A corrente, como usual, é o principal regulador da penetração. Neste caso, a operação é geralmente mais efetiva, se for utilizada alta corrente e reduzido tempo de arco. Outrossim, o sucesso da operação depende, fundamentalmente,

da limpeza das peças e contato entre as mesmas.

TIG PULSADO

O fato da corrente ser pulsada - e não constante no tempo - permite a produção de juntas com muito melhor qualidade porque, no mínimo - quando comparado com o TIG convencional - apresenta as seguintes vantagens:

- Utiliza menor energia de soldagem;
- Melhora em muito o controle sobre a geometria do cordão;
 - Aumenta a espessura do metal base que pode ser soldado;
 - Promove auto-limpeza do eletrodo;
 - Aumenta a tolerância admitida nos parâmetros de soldagem;
- Reduz o tempo de pré-aquecimento;
- Reduz a distorção;
- Reduz a zona afetada pelo calor e a tendência à trinca de solidificação;
 - Através do refino de grão, melhora as propriedades mecânicas da junta.

A teoria do emprego da corrente pulsada foi discutida no Capítulo 3. O pulso pode ocorrer conforme mostrado na **Fig. 7.15(a)** para CC e **Fig. 7.15(b)** para CA, com a onda não necessariamente sendo retangular.

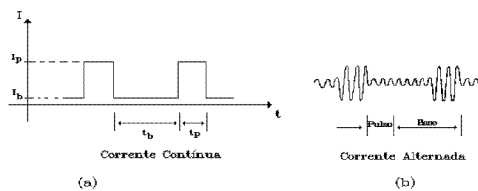


Figura 7.15-TIG com corrente pulsada.

Este pulso também pode ser composto, como ilustrado na **Fig. 7.16**.

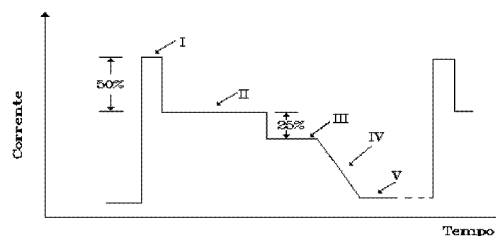


Figura 7.16 - TIG em Corrente Pulsada (Pulso Composto).

No presente exemplo (**Fig. 7.16**), distingue-se as seguintes fases no pulso composto:

- Fase I, em que a corrente é cerca de 50% maior do que o pulso principal, na qual ocorre aquecimento inicial do metal;
- Fase II, onde o pulso principal atua, fundindo o metal e formando a poça;
- Fase III, com a corrente decrescendo cerca de 25% em relação àquela do pulso principal e sendo iniciada a solidificação da poça de fusão;
- Fase IV: rápido resfriamento, com alta taxa de decréscimo da corrente;
- Fase V: corrente base, responsável pela manutenção do arco, seguindo-se outro ciclo idêntico ao descrito.

Observa-se na **Fig. 7.15**, que o TIG pulsado apresenta mais parâmetros para serem controlados do que o convencional, ou seja, deve ser estabelecida a corrente de pico (I_p); a corrente base (I_b), e os tempos de atuação de ambos, t_p e t_b , respectivamente.

A corrente média (I_m) do TIG pulsado é dada por:

$$I_m = \frac{I}{T} \int_0^T I \cdot dt \quad [7.3]$$

onde: $T = t_p + t_b$

Sendo retangular a forma da onda, I_m é dada por:

$$I_m = [(I_p \cdot t_p) + (I_b \cdot t_b)] / (t_p + t_b) \quad [7.4]$$

A corrente pulsada efetiva (I_e), ou aquela que geralmente se considera ser a que fornece o mesmo efeito térmico da convencional, é obtida por:

$$I_e = \left(\frac{1}{T} \int_0^T I^2 \cdot dt \right)^{1/2} \quad [7.5]$$

Sendo a onda quadrada:

$$I_e = [(I_p^2 \cdot T_p + I_b^2 \cdot t_b) / T]^{1/2} \quad [7.6]$$

I_m é sempre um pouco menor do que I_e , e essa diferença aumenta tanto quanto menores forem as relações I_b/I_p e t_p/T . Em geral, a razão I_m/I_e é maior do que 0,76, resultando numa diferença entre I_e e I_m menor do que 24%.

Dessa forma, a energia de soldagem pode ser obtida por:

$$E = r \cdot \frac{U \cdot I_e}{V} \quad (J/mm) \quad [7.7]$$

onde “U” é a tensão e “V” a velocidade de soldagem, sendo “r” o rendimento térmico do processo.

Nas modernas fontes transistorizadas, a taxa de alteração no nível da corrente é maior do que 2 A/ms, com frequência de operação podendo ser superior a 15 MHz. Com o aumento da frequência do pulso, se observa redução da largura e aumento da penetração na poça de fusão.

PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

No livro dessa série “Sistemas de Especificação dos Consumíveis para Soldagem e Brasagem”, são apresentados os consumíveis disponíveis para a soldagem TIG.

As varetas geralmente possuem diâmetros entre 0,8 e 6,4 mm, sendo mais empregadas aquelas com diâmetros de 0,8; 1,0; 2,4 e 3,2 mm em comprimento de 910 mm. O diâmetro do arame para alimentação automática mais utilizado é de 0,5 mm, em bobinas de 100 à 300 mm de diâmetro externo.

No Capítulo 4 foram considerados os consumíveis indicados para soldagem de várias ligas. Apesar de ter sido tratado o processo Eletrodo Revestido, sugestões similares devem ser seguidas, para metais base e consumíveis equivalentes na soldagem TIG pois, como mencionado naquele Capítulo, aqui não será repetido o mesmo assunto. Além disso, abaixo são sugerimos os consumíveis que podem ser utilizados em aplicações gerais para vários materiais, juntamente com diversos procedimentos característicos desse processo:

▪ Aços ao carbono e baixa liga

A **Tab. 7.6** apresenta as condições recomendadas para a soldagem de juntas a topo, com espessuras de até cerca de 3 mm, exceção feita à tubos. Espessuras até em torno de 2 mm podem ser soldadas sem metal de adição e com ótima qualidade. Peças tão espessas quanto cerca de 4 mm também são soldadas dessa forma, mas o nível de qua-

lidade alcançado pode não ser ótimo. A especificação AWS A5.18 de varetas/arames para aços ao carbono cobre os processos TIG, MIG e Plasma, com as propriedades mecânicas determinadas pelo metal de solda depositado pelo MIG.

▪ Aços inoxidáveis e resistentes ao calor

Podem ser soldados com as condições descritas na **Tab. 7.7** e tipos de juntas mostradas na **Fig. 7.17**.

▪ Cobre e suas ligas

A **Tab. 7.8** indica algumas condições, com as juntas na **Fig. 7.17**. Recomenda-se que a velocidade do fluxo do gás de proteção seja relativamente baixa, mas num alto volume. As temperaturas de pré-aquecimento variam de 80 °C para chapas finas, até mais de 500 °C em peças espessas. O nitrogênio pode ser utilizado no lugar do argônio, com uma vazão cerca de 50% maior.

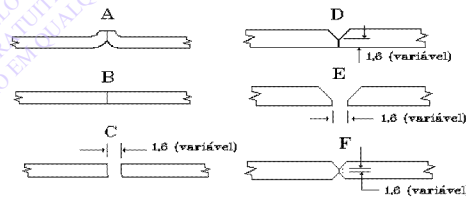


Figura 7.17 - Tipos de Juntas para Soldagem TIG de Diferentes Materiais e Espessuras.

Tabela 7.6 - Parâmetros para soldagem TIG de Aços ao carbono e Baixa Liga de Juntas a Topo na Posição Plana*

Espessura (mm)	Corrente-CCEN (A)	Vazão do Gás (l/min)	Diâmetros (mm)		
			Eletrodo	Bocal	Vareta
0,6	30	4	1,2	6	1,2
0,9	50-60	5	1,6	9	1,6
1,2	60-70	5	1,6	9	1,6
1,6	70-90	6	1,6	9	1,6
2,3	90-120	6	2,4	9	2,4
3,2	110-160	7	2,4	10	3,2

* Gás de proteção argônio

Tabela 7.7 - Parâmetros para Soldagem TIG de Aços Inoxidáveis*

Espessura (mm)	Corrente (A)	Polaridade	Vazão do Gás (l/min)	Diâmetros (mm)		Nº de Passes	Junta**
				Eletrodo	Bocal		
0,6	15-30	CCEN-CA	5	1,2	6	1	AB
1,2	40-60	CCEN-CA	5	1,6 ou 2,4	6	1	B
2,0	80-90	CCEN-CA	5	2,4	9	1	B
3,2	110-130	CCEN	6	2,4 ou 3,2	9 ou 10	1	C ou D(80°)
4,8	130-170	CCEN	6	3,2	11	1	D(80°)
6,4	160-200	CCEN	7	3,2 ou 4,8	12	2	D(80°) ou F(90°)
12,7	300-350	CCEN	9	3,2 ou 6,4	15	4	D(80°) ou F(90°)
16,0	300-350	CCEN	10	6,4	16	6	D(80°) ou F(90°)

* Gás de proteção argônio. A região da raiz oposta à solda deve também ser protegida; ** Tipo da junta como indicado na Fig. 7.17 e ângulo do chanfro entre parênteses.

Tabela 7.8 - Parâmetros para Soldagem TIG do Cobre e suas Ligas*

Espessura (mm)	Corrente (A)	Vazão do Gás (l/min)	Diâmetros (mm)		Nº de Passes	Junta**
			Eletrodo	Bocal		
0,6	60-70	5	1,6	6	1	B
1,2	100-120	5	2,4	9	1	B
2,0	150-190	7	3,2	12	1	B
3,2	240-260	9	4,8	16	1	C
4,8	300-350	11	4,8	16	1	C
6,4	400-450	15	4,8	16	1	E(80°)
9,5	400-450	15	4,8	16	2	E(80°)

* Gás de proteção argônio e CCEN; ** Tipo da junta como indicado na Fig. 7.17 e ângulo do Chanfro entre parênteses.

▪ Alumínio e suas ligas

Para soldas de aplicação geral, o metal de adição pode ser aquele sugerido nas **Tab. 7.9(a-c)**. O TIG (bem como o MIG) são processos extensivamente utilizados na soldagem do alumínio, notavelmente naquelas ligas com tendência à trincas. As principais razões para essa preferência são: (a) Excelente proteção à contaminação; (b) Mínima distorção, já que a temperatura aumenta numa estreita região; (c) Relativamente alta taxa de resfriamento, permitindo soldar ligas com muito grande intervalo de solidificação. Entretanto, a alta taxa de solidificação pode resultar em porosidade, devido ao pouco tempo disponível para o escape dos gases provenientes de umidade, graxas, etc. Portanto, muita atenção deve ser dada à limpeza do metal base e consumível, além da pureza do gás. As condições de soldagem podem ser aquelas apresentadas na **Tab. 7.10**, com as juntas descritas na **Fig. 7.17**.

▪ Titânio e suas ligas

O TIG é um dos mais convenientes processos para a soldagem do titânio e suas ligas. Entretanto, deve-se tomar precauções especiais, devido à baixa temperatura na qual esse material começa a oxidar (cerca de 400 °C), e sua suscetibilidade à mínima presença de contaminação por hidrogênio; nitrogênio e oxigênio da atmosfera e do gás de proteção. Portanto, este gás deve apresentar alta pureza e o uso de difusor (“lente”) de gás no bocal (**Fig. 7.5**) é recomendável.

Para juntas que requerem altas propriedades mecânicas, a melhor solução é soldar toda a peça no interior de uma câmara com atmosfera controlada. Também são empregados sistemas, como aquele ilustrado na **Fig. 7.18**, o qual assegura proteção pelo gás inerte das regiões da solda e suas adjacências. Isso é obtido através da conexão à tocha de um dispositivo (geralmente de aço inoxidável).

dável), cujo interior é preenchido com cavacos de cobre, ou aço inoxidável, ou algum material capaz de difundir uniformemente o gás de proteção para as saídas que se encontram na sua parte inferior.

Os consumíveis disponíveis para este material estão descritos no livro dessa série já citado “Sistemas de Especificação dos Consumíveis para Soldagem e Brasagem”. Geralmente o metal de adição selecionado possui a mesma composição química do metal base, sendo as condições de soldagem encontradas na **Tab. 7.11**.

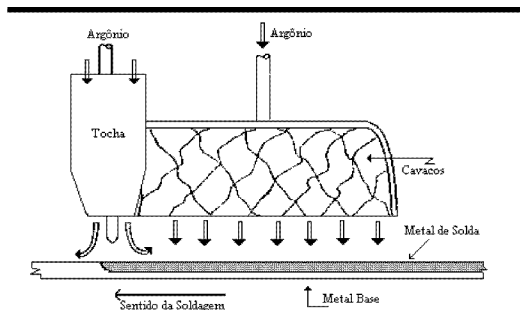


Figura 7.18 - Dispositivo para Soldagem TIG do Titânio.

Tabela 7.9(a) - Consumíveis Sugeridos para Diversas Combinações de Metais Base - Soldas de Aplicação Geral Sobre Alumínio e Suas Ligas (Classificação AWS A5.10)*

Metal Base	319.0, 333.3, 354.0, 355.0, C355.0	413.0, 433.0, A444.0, 356.0, A356.0, A357.0, 359.0	514.0, A514.0, B514.0, F514.0	7005, 7046, 7146, A712.0, D712.0	6070
1060, 1350	ER4145 (c,h)	ER4043 (h,f)	ER4043 (e,h)	ER4043 (h)	ER4043 (h)
1100, 3003, Alclad 3003	ER4145 (c,h)	ER4043 (h,f)	ER4043 (e,h)	ER4043 (h)	ER4043 (h)
2014, 2024, 2036	ER4145 (g)	ER4145	-	-	ER4145
2219	ER4145 (g,c,h)	ER4145 (c,h)	ER4043 (h)	ER4043 (h)	ER4043 (f,h)
3304, Alclad 3004	ER4043 (h)	ER4043 (h)	ER5654 (b)	ER5356 (e)	ER4043 (e)
5005, 505	ER4043 (h)	ER4043 (h)	ER5654 (b)	ER5356	ER4043 (e)
5052, 5652a	ER4043 (h)	ER4043 (b,h)	ER5654 (b)	ER5356 (e)	ER5356 (b,c)
5083	-	ER5356 (c,e,h)	ER5356 (e)	ER5183 (e)	ER5356 (e)
5086	-	ER5356 (c,e,h)	ER5356 (e)	ER5356 (e)	ER5356 (e)
5154, 5254 (a)	-	ER4043 (b,h)	ER5654 (b)	ER5356 (b)	ER5356 (b,c)
5454	ER4043 (h)	ER4043 (b,h)	ER5654 (b)	ER5356 (b)	ER5356 (b,c)
5456	-	ER4043 (b,h)	ER5356 (e)	ER5556 (e)	ER5356 (e)
6005, 6061, 6063, 6101, 6151, 6201, 6351, 6951	ER4145 (c,h)	ER5356 (c,e,h)	ER5356 (b,c)	ER5356 (b,c,h)	ER4043 (b,h)
6070	ER4145 (c,h)	ER4043 (e,h)	ER5356 (c,e)	ER5356 (c,e,h)	ER4043 (e,h)
7005, 7046, 7146, A712.0, D712.0	ER4043 (h)	ER4043 (b,h)	ER5356 (b)	ER5039 (e)	-
514.0, A514.0, B514.0	-	ER4043 (b,h)	ER5654 (b,d)	-	-
413.0., 443.0, 356.0, A356.0, A357.0, 359.0	ER4145 (c,h)	ER4043 (d,h)	-	-	-
319.0, 333.0, 354.0, 355.0, C355.0	ER4145 (c,d,h)	-	-	-	-

* Vide Nota na Tabela 7.9(c).

Tabela 7.9(b) - Consumíveis Sugeridos para Diversas Combinações de Metais Base - Processo TIG - Soldas de Aplicação Geral Sobre Alumínio e Suas Ligas (Classificação AWS A5.10)*

Metal Base	6005, 6061, 6063, 6101, 6151, 6201, 6351, 6951	5456	5454	5154, 5254 (a)	5086	5083
1060,135	ER4043 (h)	ER5356 (c)	ER4043 (e,h)	ER4043 (e,h)	ER5356 (c)	ER5356 (c)
1100, 3003, Alclad 3003	ER4043 (h)	ER5356 (c)	ER4043 (e,h)	ER4043 (e,h)	ER5356 (c)	ER5356 (c)
2014, 2024, 2036	ER4145	-	-	-	-	-
2219	ER4043 (f,h)	ER4043	ER4043 (h)	ER4043 (h)	ER4043	ER4043
3304, Alclad 3004	ER4043 (b)	ER5356 (e)	ER5654 (b)	ER5654 (b)	ER5356 (e)	ER5356 (e)
5005,505	ER4043 (b)	ER5356 (e)	ER5654 (b)	ER5654 (b)	ER5356 (e)	ER5356 (e)
5052, 5652 (a)	ER5356 (b,c)	ER5356 (b)	ER5654 (b)	ER5654 (b)	ER5356 (e)	ER5356 (e)
5083	ER5356 (e)	ER5183 (e)	ER5356 (e)	ER5356 (e)	ER5356 (e)	ER5183 (e)
5086	ER5356 (e)	ER5356 (e)	ER5356 (b)	ER5356 (b)	ER5356 (e)	-
5154,5254	ER5356 (b,c)	ER5356 (b)	ER5654 (b)	ER5654 (a,b)	-	-
5454	ER5356 (b,c)	ER5356 (b)	ER5554 (c,e)	-	-	-
5456	ER5356 (e)	ER5556 (e)	-	-	-	-
6005, 6061, 6063, 6101, 6151, 6201, 6351, 6951	ER4043 (b,h)	-	-	-	-	-

* Vide Nota na Tabela 7.9(c).

Tabela 7.9(c) - Consumíveis Sugeridos para Diversas Combinações de Metais Base - Processo TIG - Soldas de Aplicação Geral Sobre Alumínio e Suas Ligas (Classificação AWS A5.10)*

Metal Base	5052, 5652 (a)	5005,505	3004, Alclad 3004	2219	2014, 2024, 2036	1100, 3003, Alclad 3003	1060, 1350
1060,135	ER4043 (h)	ER1100 (c)	ER4043	ER4145	ER4145	ER1100 (c)	ER1100 (c)
1100, 3003, Alclad 3003	ER 4043 (e,h)	ER4043 (e)	ER4043 (e)	ER4145	ER4145	ER1100 (c)	-
2014,2024	-	-	-	ER4145 (g)	ER4145 (g)	-	-
2219	ER4043 (h)	ER4043	ER4043	ER2319 (c,f,h)	-	-	-
3004, Alclad 3004	ER4043 (e,h)	ER4043 (e)	ER4043 (e)	-	-	-	-
5005,505	ER4043 (e,h)	ER4043 (d,e)	-	-	-	-	-
5052, 5652 (a)	ER5654 (a,b,c)	-	-	-	-	-	-

Notas: (a) Os metais base 5254 e 5652 podem ser utilizados em ambiente com peróxido de hidrogênio. O metal de adição ER5654 é empregado para soldar ambos, em serviço de baixa temperatura (64°C e abaixo); (b) Pode ser utilizado ER5183, ER5356, ER5554, ER5556, ou ER5654. O ER5554 é conveniente para serviço em elevada temperatura; (c) Para algumas aplicações pode ser utilizado o ER4043; (d) Ocasionalmente pode ser empregado metal de adição com a mesma composição química do metal base; (e) Pode ser utilizado ER5183, ER5356 ou ER5556; (f) Para algumas aplicações pode ser empregado o ER4145; (g) Para algumas aplicações pode ser utilizado o ER2319; (h) Para algumas aplicações pode ser utilizado o ER4047.

Tabela 7.10 - Parâmetros para Soldagem TIG do Alumínio e suas Ligas*

Espessura (mm)	Corrente-CA (A)	Vazão do Gás (l/min)	Diâmetros (mm)			Nº de Passes	Junta† e Posição‡
			Eletrodo	Bocal	Vareta		
1,6	70-100	9	1,6	9	2,4	1	B-(P,H,V)
1,6	60-90	12	1,6	9	2,4	1	B-(SC)
3,2	125-160	9	2,4	10	3,2	1	B-(P)
3,2	115-150	9	2,4	10	3,2	1	B-(H,V)
3,2	115-150	12	2,4	10	3,2	1	B-(SC)
6,4	225-275	14	4,0	14	4,8	2	D(60°)-(P)
6,4	200-240	14	4,0	13	4,8	2	D(60°)-(H,V)
6,4	210-260	16	4,0	14	4,8	2	D(100°)-(SC)
9,5	325-400	16	6,4	16	6,4	2	D(60°)-(P)
9,5	250-320	16	4,8	15	6,4	3	D(60°)-(H,V)
9,5	275-350	19	4,8	15	6,4	3	D(100°)-(SC)
12,7	375-450	16	6,4	16	6,4	3	D(60°)-(P)
12,7	250-320	16	4,8	15	6,4	3	D(60°)-(H,V)
12,7	275-340	19	4,8	15	6,4	4	D(100°)-(SC)

* Gás de proteção argônio. Eletrodo EWP ou EWZr em CA; † Tipo da Junta como indicado na Fig.7.17 e ângulo do chanfro entre parênteses; ‡ Posições: P-Plana; H-Horizontal; V-Vertical; SC-Sobrecabeça.

Tabela 7.11 - Parâmetros para Soldagem TIG do Titânio e suas Ligas*

Espessura (mm)	Corrente (A)	Vazão do Gás (l/min)	Diâmetro			Nº de Passes	Junta**
			Eletrodo	Bocal	Vareta		
0,6	20-35	9	1,6	10	-	1	B ou C
1,6	85-140	9	1,6	16	-	1	B ou C
2,4	170-215	12	2,4	16	1,6	1	C ou D(30°)
3,2	190-235	12	2,4	16	1,6	1	C ou D(30°)
4,8	220-280	12	2,4	16	3,2	2	D(60°)
6,4	275-320	15	3,2	16	3,2	2	D(60°) ou F(30°)
9,5	300-350	17	3,2	19	3,2	2	D(90°) ou E(60°)
12,7	325-425	19	3,2	19	4,0	3	E(90°) ou F(60°)

* Gás de proteção argônio. Eletrodo EWTh 2, ou EWTh 1 em CCEN. Gás adicional de proteção recomendado. Se não for utilizado gás para purga, ou barras para acelerar o resfriamento, a corrente deve ser reduzida em cerca de 20%; ** Tipo de junta como indicado na Fig.7.17 ângulo de chanfro entre parênteses.

▪ Arame Frio

A **Tab. 7.12** mostra parâmetros para a adição de “arame frio” em aço inoxidável e liga de alumínio, sendo o “comprimento do arco” definido como a distância entre o eletrodo e o “arame frio”, apesar do arco se formar com a peça.

▪ Arame Quente

A adição de “arame quente”, por sua vez, aumenta significativamente a taxa de deposição em relação ao “arame frio”, conforme comparado na

Tab. 7.13. Note-se que para espessuras menores do que 1,5 mm, o método do “arame quente” não apresenta grande atrativos sobre o “arame frio”.

▪ TIG Pulsado

O TIG pulsado apresenta inúmeras vantagens sobre o dito convencional, conforme já discutido. A **Tab. 7.14** ilustra alguns materiais e os parâmetros mais indicados, para diferentes espessuras. Outrossim, uma importante aplicação para este método, é a soldagem orbital de tubos, em

que um sistema especialmente projetado para esse fim realiza o trabalho de forma automática, girando em torno da peça. Nesse caso, a Fig. 7.19 mos-

tra diferentes tipos de juntas para variadas espessuras, sendo muito importante que a preparação seja realizada com precisão.

Tabela 7.12 - Parâmetros para Soldagem com Adição de "Arame Frio" TIG de Aço Inoxidável e Alumínio e suas Ligas

Material (mm)	Junta	Espes-sura (mm)	Diâmetro do Arame (mm)	Corren-te (A)	Velocidade		Comprimento do Arco (mm)	Distância Eletrodo/ Peça (mm)
					de Soldagem (mm/s)	de Alimentação (cm/min)		
Aço Inoxidável	Filete na Horizontal	1,5	0,6	100	4,3	1,2	3	1,5
		4,5	0,6	220	3,0	5,0	4	2
		3,0	0,6	140	4,2	2,3	4	2
Alumínio e suas Ligas	Topo	2,0	0,6	90	4,3	1,0	3	2
	Filete na Horizontal	3,0	0,8	160	2,7	4,5	4-5	3
		6,0	0,8	220	2,7	6,0	4-5	3-4
	Topo	2,0	0,8	100	4,2	3,0	3-4	2-3
		3,0	0,8	130	3,3	3,0	3	2

Tabela 7.13 - Taxa de Deposição para "Arame Quente" e "Arame Frio" - TIG* sobre Aço Inoxidável

Espessura da Chapa/Diâmetro do Arame (mm)	Modo de Deposição**	Corrente (A)	Taxa de Deposição (kg/h)
1,6 / 1,6	AQ	300	0,86
	AF	160	
2,4 / 2,4	AQ	360	1,61
	AF	220	
3,2 / 3,0	AQ	410	2,18
	AF	250	
4,8 / 4,5	AQ	450	2,26
	AF	350	
6,4 / 6,0	AQ	480	2,41
	AF	400	

* Gás de proteção 25% argônio em hélio. Junta a Topo sem chanfro com mata-junta de cobre; ** AQ= "Arame Quente" e AF= "Arame Frio".

Tabela 7.14 - Parâmetros de Soldagem TIG Pulsado para Diferentes Materiais

Material	Espessura (mm)	Junta*	Corrente (A)		Tempo de Atuação da Corrente (s)		Velocidade de Alimentação (mm/s)
			Pico (lp)	Base (lb)	Pico (tp)	Base (tb)	
Alumínio (a)	1,0	B	70	25	0,50	0,50	12,50
	1,5	B	90	25	0,50	0,50	12,50
	3,0	B	170	25	0,50	0,50	28,33
	6,0	B	220	25	0,50	0,50	41,67
Aço ao carbono (b)	1,2	B	200	50	0,20	0,20	10
	1,2	C(1,6)	130	20	0,50	0,50	6,67
Aço Inoxidável	1,2	B	150	50	0,16	0,16	(c)
	1,2	C(1,2)	150	20	0,35	0,65	6,67
Cobre (b)	1,4	B	280	50	0,16	0,16	(c)
	1,4	C(1,2)	280	50	0,25	0,25	12,5
Titânio (b)	2,0	B	200	100	0,30	0,70	(c)

* Juntas de acordo com a Fig.7.17. Os valores entre parênteses se referem à separação das faces (mm); (a) TIG pulsado com corrente alternada. Gás argônio e diâmetro do arame de 1,6mm; (b) TIG pulsado CCEN. Gás argônio e diâmetro do arame de 1,2mm; (c) Sem metal de adição.

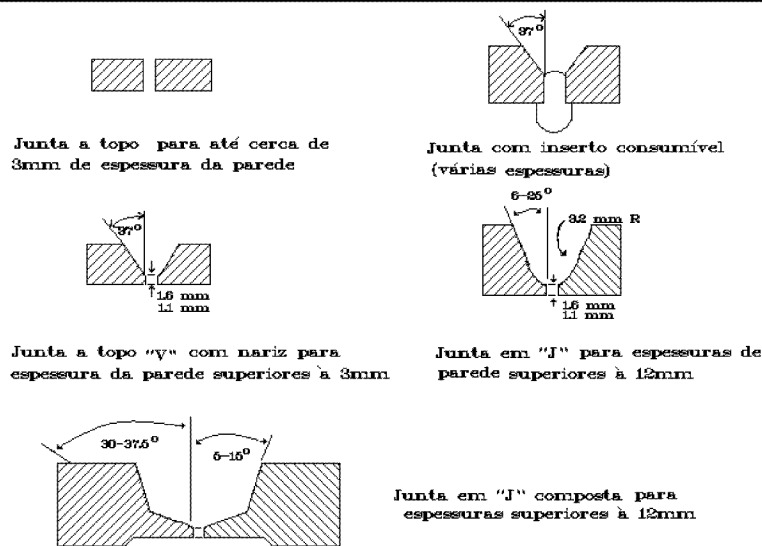


Figura 7.19 - Juntas em Tubos para Soldagem com TIG Orbital.

PROBLEMAS OPERACIONAIS

O soldador (ou operador) deve estar perfeitamente protegido das radiações produzidas pelas operações de soldagem. Isto requer vestimenta apropriada - e preferencialmente à prova de fogo - além do uso de elmo com filtro, cuja transparência depende do processo e da corrente empregada. No Anexo 2 se encontram alguns preceitos a serem observados para segurança, bem como os filtros recomendados.

Por outro lado, uma dificuldade que tem sido observada na soldagem TIG de alta precisão em (principalmente) aços inoxidáveis, é a variação da penetração em materiais com praticamente idêntica composição química, mas provenientes de diferentes corridas, mesmo quando os parâmetros são mantidos iguais. Aparentemente, essa variação se deve à diferença no conteúdo de terras raras (lanfânio, cério, etc.) dos materiais base, elementos químicos que não são geralmente analisados. É uma dificuldade, portanto, que foge do domínio do executor da soldagem e o obriga a realizar testes, em cada caso, para estabelecer parâmetros que forneçam a penetração requerida.

Problemas operacionais podem criar situações que prejudicam a qualidade da solda. Alguns são causados por técnica de soldagem errada; outros por simples questão de limpeza, ou mesmo falta de atenção. Outrossim, existem causas mais com-

plexas e não tão fáceis de detectar, como o exemplo acima citado de variação da penetração, ou gás de proteção impuro. De forma geral, podem ser descritas as seguintes situações indesejáveis:

❑ O arco se apresenta errático ou não se mantém

- Com eletrodo de W puro em CCEN, os pontos catódicos oscilam sobre a superfície do eletrodo: trocar para eletrodo com Th ou Zr;
- Materiais que formam filmes refratários - como o Al, por exemplo - estão sendo soldados com CCEN: alterar para CA verificando, antes, a máxima corrente que pode ser utilizada para a bitola do novo eletrodo;
- O metal base não foi convenientemente limpo;
- A junta é muito estreita e, desta forma, o arco oscila entre as faces do chanfro;
- O arco está muito longo;
- O eletrodo está contaminado, ou sujo: sendo a contaminação por metal fundido, deve ser removida a parte contaminada;
- O eletrodo é de diâmetro muito grande para a corrente utilizada: a densidade de corrente é muito pequena e o arco, ou não se mantém, ou atua erráticamente;
- O contato elétrico do eletrodo na tocha está defeituoso.

❑ Contaminação do metal base pelo eletrodo

- O arco está sendo iniciado através de contato do eletrodo com a peça: o injetor de alta frequência, ou de sobre-tensão deve ser utilizado;
 - A ponta do eletrodo funde: a corrente utilizada é excessiva para a bitola e/ou polaridade do eletrodo; trocar o eletrodo de W puro para com Th ou Zr; verificar a polaridade;
 - O eletrodo apresenta trincas, ou outro tipo de defeito metalúrgico.

❑ Desgaste muito rápido do eletrodo

- O arco está sendo iniciado através de contato do eletrodo com a peça: o injetor de alta frequência deve ser utilizado;
 - Não há conveniente proteção de gás e o eletrodo se oxida: manter o gás fluindo após a extinção do arco (1 s para cada 10 A); aumentar a vazão do gás; verificar fugas ou interrupção no gás;
 - O eletrodo está em CCEP: trocar a polari-

dade; operar com menor corrente; aumentar a bitola do eletrodo;

- A bitola do eletrodo é pequena para a corrente empregada;
- O eletrodo está contaminado;
- A tocha está super-aquecendo: mau contato elétrico; falta de refrigeração adequada; utilizar eletrodos retificados.

❑ O metal de solda apresenta porosidade

- O gás apresenta impurezas acima do máximo permitido: Geralmente o gás de proteção deve ser 99,9% puro e não pode conter mais do que 11,4 ppm (partes por milhão) de vapor d'água por volume;
 - As mangueiras, ou tubos apresentam contaminação: fluir o gás algum tempo antes de iniciar o arco; verificar se as mangueiras são de material correto e não foram utilizadas para acetileno ou água;
 - O metal base não foi convenientemente limpo, ou existe umidade no mesmo.

**C
A
P
Í
T
U
L
O**
08

**SOLDAGEM A ARCO COM
PROTEÇÃO POR GÁS E
ELETRODO CONSUMÍVEL
("MIG/MAG")**

INTRODUÇÃO	194
PRINCÍPIOS DO PROCESSO E EQUIPAMENTO	194
TRANSFERÊNCIA DO METAL	197
GASES DE PROTEÇÃO	202
Tipos	202
Potencial de Carbono e Oxidação	205
Vazão	207
OPERACIONALIZAÇÃO DO PROCESSO	208
Seleção do Eletrodo (Arame)	208
Estabilidade do Arco	208
Taxas de Deposição e Fusão	209
VARIÁVEIS DE PROCEDIMENTO	211
Técnicas e Variantes do Processo	213
PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM	215

INTRODUÇÃO

Esse processo de soldagem se baseia na formação do arco elétrico entre a peça e um eletrodo maciço nu consumível, continuamente alimentado. A poça de fusão assim formada, é protegida por um gás, ou mistura de gases, inerte ou oxidante (“ativo”), e daí provém o fato de, no Brasil, ele ainda ser geralmente denominado “MIG - Metal Inert Gas”, ou “MAG - Metal Active Gas”.

Apesar de ser conhecido há muitos anos - em 1926 foi publicado um artigo na então “Journal of the American Welding Society” (hoje “Welding Journal” da AWS) sobre o assunto - o processo somente se desenvolveu a partir de 1948, utilizando gás de proteção inerte (argônio) para a soldagem do alumínio. A aplicação sobre aços tornou-se possível, quando em 1951 foi adicionado oxigênio ao argônio e poucos anos após (1953), introduziu-se o dióxido de carbono (CO₂) puro, ou em mistura, também com esse gás.

A soldagem pode ser realizada de forma semi-automática, ou automática, com o processo possuindo excelentes características para robotização. Isso se deve ao fato de que o mesmo, quando adequadamente ajustado, pode soldar em todas as posições, com ótima estabilidade do arco, produzindo pouquíssima escória, pois não há envolvimento de fluxo algum, permitindo, em certas situações, que os passes sejam sucessivamente depositados sem limpeza prévia.

O processo MIG/MAG é hoje empregado desde em pequenas indústrias, até naquelas responsáveis por grandes produções e/ou alta qualidade. Esta flexibilidade se alia aos seguintes fatores:

- O metal de solda é depositado com baixo conteúdo de hidrogênio, elemento o qual é um dos responsáveis pela Trinca Induzida por Hidrogênio nos aços;
- Maior taxa de deposição e fator de operação, quando comparado com eletrodo revestido;
- Facilidade de operação;
- Conveniência para robotização.

Os arames (eletrodos) utilizados são geralmente disponíveis em diâmetros de 0,8-1,0-1,2 e 1,6 mm, existindo outras bitolas para a soldagem de praticamente todas as ligas ferrosas e muitas não-ferrosas, notavelmente alumínio e cobre, além daquelas mais reativas, como titânio - veja, por exemplo, o livro dessa série “Sistemas de Especificação dos Consumíveis para Soldagem e Brasa-gem”. Metais com muito baixo ponto de fusão não podem ser soldados por MIG, como ocorre, aliás, para todos os processos que utilizam o arco elétrico.

Os gases de proteção geralmente empregados são o argônio, hélio, nitrogênio, hidrogênio, oxigênio e dióxido de carbono, alguns individualmente, ou em misturas que serão oportunamente apresentadas.

Por outro lado, materiais de espessuras tão finas quanto 0,5 mm têm sido soldados com sucesso por MIG / MAG (doravante denominado somente MIG). Apesar de teoricamente não existir limite superior para a espessura a ser soldada por este processo, geralmente chapas acima de 15 mm são mais economicamente unidas por arco submerso, ou eletrodo tubular.

PRINCÍPIOS DO PROCESSO E EQUIPAMENTO

A **Fig. 8.1** mostra esquematicamente o equipamento utilizado, com detalhe do bocal da tocha. Em MIG, a corrente contínua eletrodo positivo (CCEP) é empregada para a imensa maioria das aplicações. O eletrodo negativo (CCEN) pode ser conveniente, apresentando menor penetração, mas com problemas de estabilidade do arco sob certas condições.

O comprimento do arco deve ser mantido estável, uma vez decidida a tensão de trabalho. Para tanto, se a fonte de potência fornecer uma curva característica corrente constante (“tombante”), a mesma terá que possuir um sistema “tensão sensível” acoplado, já que existindo variação no comprimento do arco por qualquer razão, a consequen-

te alteração na tensão será rapidamente corrigida. De uma forma muito mais simples, a fonte que fornece curva característica tensão constante (“plana”) realiza a “auto-ajustagem” do arco, assunto discutido no Capítulo 2. A **Fig. 8.2** ilustra esquematicamente uma curva tensão constante genérica em (a); em (b) a relação da taxa de fusão (TF) do arame com a corrente e em (c) três distintos comprimentos do arco.

Supondo selecionadas as condições U_0 e I_0 , um aumento súbito no comprimento do arco - defeito na junta, por exemplo - leva imediatamente a um aumento na tensão para U_2 , o que acarreta numa queda da intensidade de corrente para I_2 . Ora, isto faz com que a taxa de fusão diminua de TF_0 para

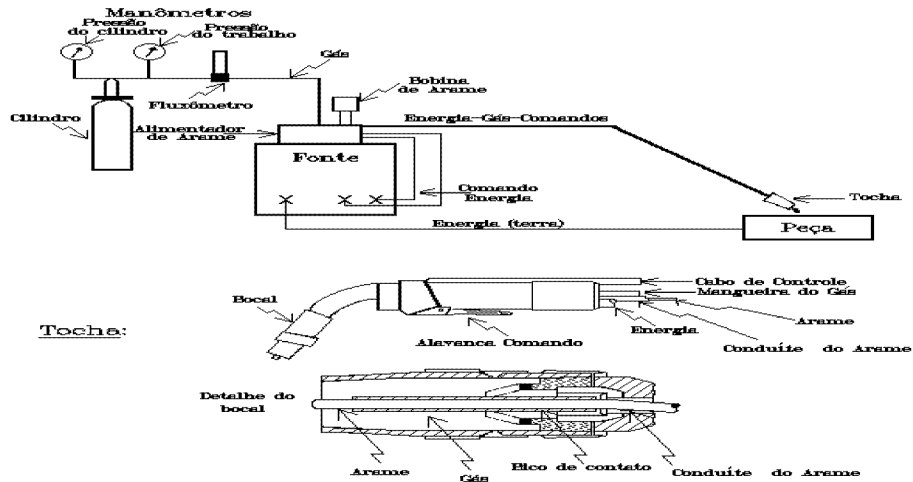


Figura 8.1 - Equipamento MIG (esquemático), com Detalhe da Tocha.

TF_2 , permitindo que o arame avance mais tempo sem fundir. Ocorrendo o inverso, ou seja, o comprimento do arco diminuindo subitamente para U_1 , a consequência é o aumento da taxa de fusão para TF_1 , reduzindo o tempo que o arame avança sem fundir. Como esse arame avança numa velocidade constante e que foi fixada quando da seleção de I_o , o comprimento do arco permanecerá em torno daquele correspondente à U_o , sendo a resposta a esta perturbação tanto mais rápida, quanto menor for o diâmetro do arame empregado. A questão do diâmetro do arame é importante pois, para maiores bitolas (cerca de 1,6 mm para aço), o equipamento "tensão sensível" com curva característica corrente constante reage às alterações do comprimento do arco com maior taxa de resposta.

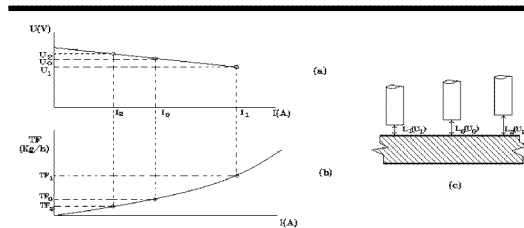


Figura 8.2 - "Auto-ajustagem" do arco em MIG/MAG (vide texto).

Na maioria das vezes, então, a fonte será tensão constante e geralmente do tipo transformador-retificador, com os seguintes controles disponíveis: (a) Ajuste de tensão; (b) Ajuste da velocidade de alimentação do arame, o qual é acoplado ao da corrente; (c) Ajuste da vazão do gás de proteção; (d) Ajuste da indutância (o que será explicado mais adiante); (e) Ajuste de pré- e pós-fluxo do

gás de proteção.

Portanto, a operação de soldagem inicia, quando a ponta do arame mantém contato com a peça e é acionado o gatilho de ignição da tocha. Nesse instante, três eventos ocorrem: (a) O arame é energizado; (b) O arame avança; (c) O gás flui, devido à abertura do solenóide. Pode-se, então, iniciar o deslocamento da tocha para a soldagem.

Um componente que merece especial consideração, é aquele responsável pela alimentação do arame, pois de nada vale o ótimo ajuste das condições de soldagem, se o arame não for suprido de forma constante. Além disso, existe uma relação quase linear entre a velocidade de avanço do mesmo e a corrente requerida para fundi-lo, devendo ser mantido o necessário equilíbrio.

O arame pode ser alimentado devido a ação de rolos, como mostrado na Fig. 8.3, em que o rolo inferior é tracionado e o superior somente sofre compressão contra o consumível, fazendo-o avançar.

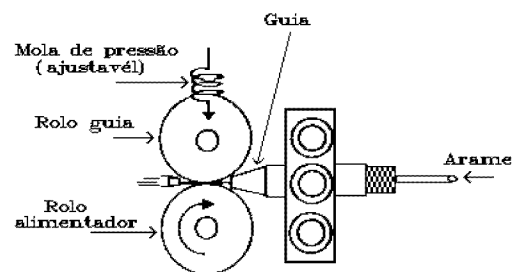


Figura 8.3 - Sistema Convencional para Alimentação do Arame em MIG.

Diversos perfis de rolos são disponíveis, conforme apresentado na **Fig. 8.4**. Devido ao formato triangular de pelo menos um dos rolos, é quase impossível obter perfeito contato arame/rolo, sem que seja causada distorção no consumível. Uma extensão deste conceito é aquela mostrado na **Fig. 8.5**, com dois pares de rolos utilizando o mesmo motor para girar.

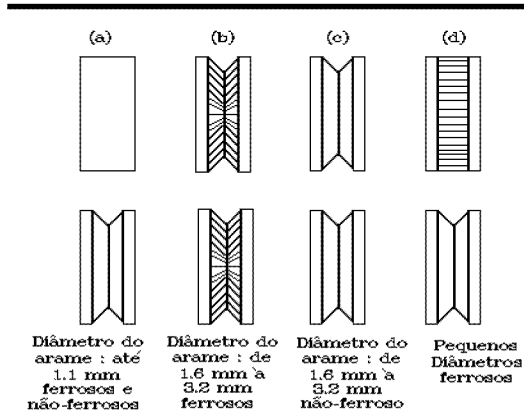


Figura 8.4 - Alguns Típicos Rolos de Alimentação.

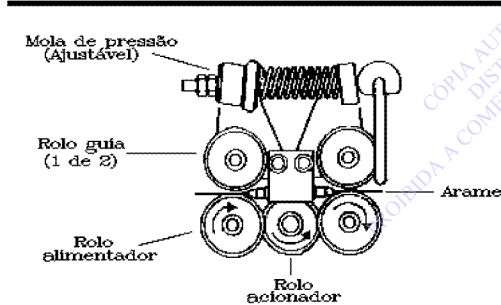


Figura 8.5 - Sistema com Dois Pares de Rolos de Alimentação.

Os sistemas apresentados - tipo “empurra” - podem causar sérios problemas, entre os quais o amassamento do arame (principalmente em metais muito dúcteis, como alumínio) e falta de capacidade para manter constante a velocidade de alimentação, quando ocorrer variação na tensão mecânica sobre o consumível e/ou na potência fornecida pela rede elétrica.

Outro sistema que é utilizado, “puxa” o arame praticamente em toda sua extensão, com os rolos e motor posicionados muito próximos, ou mesmo conectados à tocha, empurrando o consumível somente no bico de contato. Dessa forma, o mesmo se encontra tracionado. Entre as desvantagens, têm-

se o peso adicionado à tocha e, caso a bobina de arame esteja afastada da mesma, o grande torque que o motor tracionador deve possuir.

A utilização de um motor próximo à bobina do arame, que o traciona, e outro junto à tocha, que o comprime pelo bico de contato, caracteriza o sistema “puxa-empurra”. O motor que empurra deve manter o arame em leve tensão no interior do condutite evitando, assim, seu embolamento. Isto é conseguido, com o motor que empurra operando a velocidade constante e o que puxa a um torque constante, sendo um sistema conveniente para arames de aço de pequeno diâmetro e metais muito dúcteis. Como limitação desse sistema, se têm: (a) É utilizado para arames com diâmetro máximo de 1,2 mm; (b) A pequena distância entre o motor que puxa e o arco; (c) A complexidade da regulagem e controle dos dois motores.

Desta forma, é evidente que os sistemas descritos - ditos “convencionais” - apresentam diversos pontos negativos, muitos dos quais são mascarados por problemas maiores, como a instabilidade “inerente” das fontes tradicionais. Com o advento de fontes muito mais estáveis e precisas, devido ao uso de componentes eletrônicos de estado sólido, novos sistemas de alimentação estão sendo desenvolvidos.

A **Fig. 8.6** ilustra o denominado “sistema linear”, no qual motores com magnetos permanentes tem os rolos de alimentação fixos nas pontas do eixo.

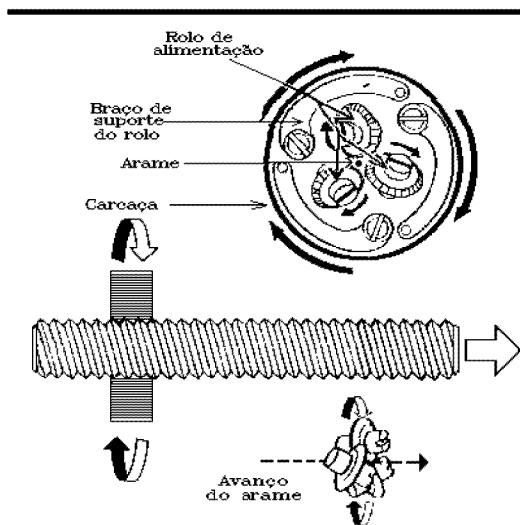


Figura 8.6 - Sistema Linear de Alimentação do Arame

Nesse caso, o arame passa através do rotor ôco e opera num sistema dito planetário. Quando a armadura sofre rotação provocada pelo motor, cada

rolo produz um pequeno sulco no arame e o impulsiona axialmente. Dois motores deste tipo são utilizados, sendo um logo após a bobina do arame e outro junto a tocha. A sua vantagem sobre o conceito tradicional, é que não há necessidade de sistema eletrônico para equilibrar o funcionamento dos dois motores. Isso se deve a que, ocorrendo redução (por exemplo) na potência do motor de controle, os rolos do mesmo provocam maior avanço do arame por revolução, aumentando a carga no motor junto à tocha, cujos rolos, por sua vez, reduzem o avanço do arame por revolução, aumentando a carga no primeiro motor.

Outro interessante mecanismo, é aquele que alimenta o arame pelo princípio mostrado esquematicamente na Fig. 8.7. Nele, o avanço do arame ocorre, também, através de um eixo ôco, com dois blocos agindo alternadamente e empurrando o arame axialmente. O flange de espessura variável gira

e, dessa forma, os rolos de um bloco estão livres, enquanto os do outro bloco empurram o arame. O processo é praticamente contínuo, pois quando um bloco pára de agir, o outro imediatamente o substitui, numa transição quase imperceptível.

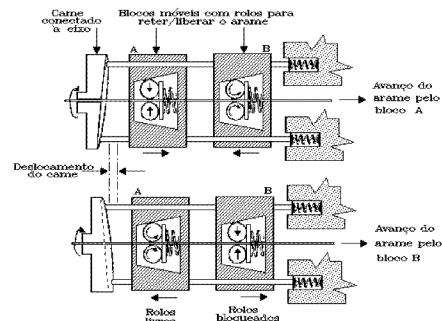


Figura 8.7 - Sistema de Movimento Discreto para Alimentação do Arame.

TRANSFERÊNCIA DO METAL

O modo como o metal fundido se transfere desde o eletrodo para a peça, é determinado por complexas interações de forças, as quais em MIG são influenciadas pelos seguintes principais fatores: (a) Natureza do gás de proteção; (b) Polaridade e tipo (contínuo ou pulsado) da corrente; (c) Densidade da corrente; (d) Tensão; (e) Extensão do eletrodo após o contato elétrico; (f) Composição química e diâmetro do eletrodo; (g) Características específicas da fonte de potência; (h) Presença do ambiente.

Como apresentado no Capítulo 2, várias são as forças que interagem na ponta do eletrodo, dentre as mesmas encontrando-se: (a) De Lorenz; (b) Devido à aceleração da gravidade; (c) Devido à pressão do plasma (“jato de plasma”); (d) Eletromagnéticas; (e) Devido à tensão superficial; (f) Devido à pressão de evaporação dos materiais envolvidos; (g) Devido ao fluxo do gás de proteção. Em consequência de uma particular combinação de todos os fatores envolvidos, o metal se transfere da ponta do eletrodo em um dos modos apresentados na Fig. 8.8 e descritos a seguir:

□ Transferência por Curto-Circuito

A ponta do arame pode vir a manter contato com a poça de fusão, caso eventualmente a velocidade de alimentação do mesmo exceda sua taxa de fusão, ocorrendo então o modo em curto-circuito, exibido na Fig. 8.8(a). O metal é transferi-

do nesse modo em baixas corrente e tensão - geralmente 30 a 200 A e 15 a 22 V, respectivamente - sendo por isso também denominado “arco curto” (“short arc”), utilizando arame de pequena bitola. Como não existe arco no momento em que ocorre o curto-circuito, o metal fundido é transferido devido à tensão superficial. Este modo de transferência produz uma poça de fusão relativamente pequena, de rápida solidificação, sendo indicado para a soldagem de seções finas em todas as posições.

Como apresentado na Fig. 8.9, a tensão e a corrente sofrem considerável variação na amplitude, com frequências de curto-circuito entre 20 e mais de 200 Hz, sendo que ocorrem as seguintes

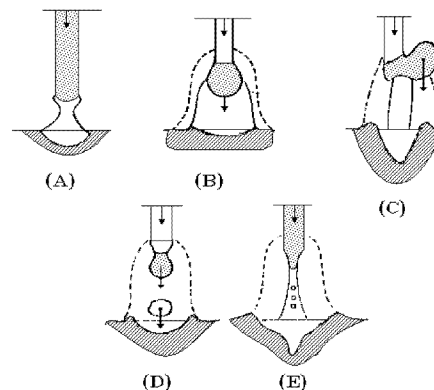


Figura 8.8 - Principais Modos de Transferência em MIG/MAG (vide texto).

etapas:

- (A): Inicia o curto-circuito, com a existência de uma relativamente grande cratera na poça de fusão, o que minimiza o salpico, com a tensão tendendo a zero;
- (B): Notável formação de um “pescoço” na porção líquida, entre o eletrodo e a peça, ocorrendo essa constrição devido às forças eletromagnéticas produzidas pela passagem da corrente no metal líquido;
- (C): Curto-circuito, com a tensão superficial facilitando a transferência e absorção do metal líquido pela poça de fusão;
- (D): Fase de arco;
- (E): Reinício do ciclo.

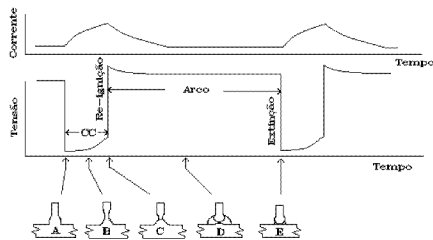


Figura 8.9 - Etapas no Modo de Transferência por Curto Circuito (CC) em MIG.

A taxa de aumento da corrente com relação ao tempo (entre “A” e “C” na Fig. 8.9), é de fundamental importância nesse modo de transferência, sendo proporcional ao curtos-circuitos. Entretanto, se a mesma for excessiva, ou seja, se a constante de tempo do circuito de soldagem for muito pequena, a separação da gota se dará de forma explosiva, devido à elevada densidade de corrente na constrição que se forma. Como consequência, é produzido um volume inaceitável de salpicos. Para evitar este fato, é necessário agir sobre esta constante de tempo, o que pode ser feito através da introdução de indutância variável no circuito, a qual causa o efeito mostrado na Fig. 8.10, pois atua sobre o tempo que o sistema leva para alcançar a corrente determinada. Esse parâmetro

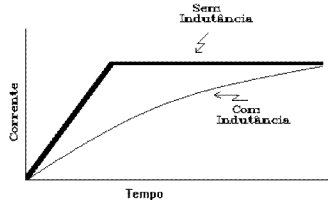


Figura 8.10 - Efeito da Indutância sobre a Taxa do Aumento da Corrente.

é ajustado para cada condição específica de soldagem dependendo, também, do tipo de equipamento utilizado. Portanto, o mesmo não pode ser previsto teoricamente, pois geralmente inexistem os dados necessários para tanto. Dessa forma, o operador deve ajustar as condições de soldagem especificadas e variar a indutância, até encontrar o ponto ótimo, reconhecido pela mínima produção de salpico, melhor estabilidade do arco e ruído característico.

Em máquinas que não possuem o ajuste de indutância, a mesma pode ser precariamente variada pela alteração da extensão do eletrodo após o bico de contato. Esse efeito é devido ao fato de que, quanto maior for a resistência do circuito de soldagem, mais alta será a declividade da curva característica tensão constante. Como o aumento da declividade reduz a taxa de variação da corrente, a produção de salpico também pode ser assim controlada.

O diâmetro do arame e a tensão exercem profunda influência sobre a frequência do curto circuito, como ilustrado na Fig. 8.11, para aço ao carbono e gás de proteção CO₂. Note-se que, para um mesmo diâmetro de arame, poucos curtos-circuitos ocorrem em alta tensão (outro é o modo de transferência) mas, conforme a tensão é reduzida, existe um máximo nessa frequência. Se a tensão for ainda menor, cessa a transferência; o arco se torna instável e, a seguir, o arame solda na peça, sendo interrompida a operação. Por outro lado, conforme aumenta a densidade da corrente para uma mesma tensão, cresce a frequência dos curtos-circuitos.

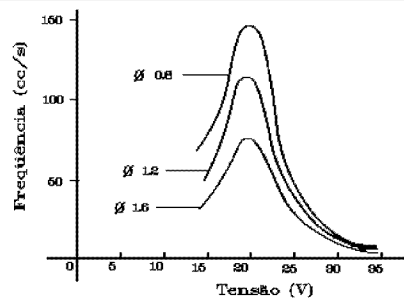


Figura 8.11 - Influência da Tensão do Arco sobre a Frequência de Curto-Circuito (ϕ =Bitolas dos Arames).

□ Transferência Globular

Com maiores corrente e tensão do que no caso anterior (esse último parâmetro mais elevado para evitar o curto-circuito) o modo de transferência é alterado, passando a ser na forma de gotas, conforme ilustrado na Fig. 8.8(b). As forças dominantes são devido à tensão superficial e à aceleração da gravidade, com o diâmetro da gota

geralmente maior do que o do arame. A **Fig. 8.12** mostra o comportamento do metal transferido, para solda de aço ao carbono com CO_2 e arame de 1,6 mm de diâmetro. A **Fig. 8.12(a)** ilustra uma zona de operação ótima (ZOO) para estabilidade do arco, a qual é determinada pela combinação da corrente e da tensão. Na **Fig. 8.12(b)** pode-se observar, que para pequenas correntes, é baixa a frequência e grande o volume das gotas produzidas, ocorrendo o inverso quando esse parâmetro é alto.

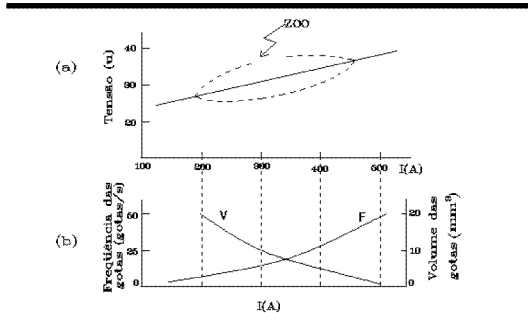


Figura 8.12 - Zona de Operação Ótima (ZOO) para Transferência Globular (F=Frequência; V=Volume).

□ Transferência por Gotas Repelidas e Projetadas

Com um aumento da corrente, em relação ao modo anterior, a força eletromagnética se torna preponderante. Sendo o eletrodo negativo, principalmente em misturas $\text{Ar}+\text{CO}_2$, com a “raiz” do arco concentrada numa pequena região sobre a gota, ocorre elevação da densidade de corrente na mesma, chamada de “densidade de corrente convergente”, a qual provoca uma força eletromagnética que a impulsiona para cima. Concomitantemente, as pressões do jato de plasma; do gás de proteção e devido à tensão superficial se combinam, atuando contra aquela devido à aceleração da gravidade, provocando um (instável) deslocamento da gota, conforme mostrado na **Fig. 8.8(c)**, a qual oscila e eventualmente se destaca da ponta do eletrodo.

Por outro lado, uma ainda maior intensidade de corrente em CCEP pode provocar outro modo de transferência, pois a gota na ponta do eletrodo diminui de diâmetro, devido à menor tensão superficial causada pelo aumento da temperatura. Não existindo elevação da densidade de corrente no interior da gota, o que pode resultar da troca do gás CO_2 puro para $\text{Ar}+\text{CO}_2$ (ou $\text{Ar}+\text{O}_2$), a força eletromagnética agora atua no sentido daquela devido à aceleração da gravidade. O efeito da cons-

trição no metal líquido forma uma gota, com diâmetro menor do que o do arame, a qual é submetida a uma aceleração diretamente proporcional à densidade de corrente e inversamente proporcional à sua massa, podendo alcançar até 2,2 vezes aquela devida à gravidade, como ilustrado na **Fig. 8.8(d)**.

□ Transferência Axial em Aerossol (“Spray”)

Com gases de proteção inertes, ou fracamente oxidantes, existe uma dada intensidade de corrente acima da qual o metal na ponta do eletrodo alcança sua temperatura de vaporização. Neste caso, o eletrodo toma o aspecto mostrado na **Fig. 8.8(e)**, com o arco se formando no terço inferior do metal fundido e sendo destacadas grande número de gotículas levemente aceleradas. Devido ao aumento da corrente e tensão, em relação aos modos anteriores, há maior penetração, com alta taxa de deposição. É importante frisar, que esse modo de transferência não ocorre com gases altamente oxidantes (ou altamente “ativos”), além da mudança do regime de transferência para aerossol provocar uma notável transformação na aparência e ruído do arco.

A **Fig. 8.13** ilustra o efeito da intensidade da corrente sobre as gotículas, em arame de aço ao carbono com 1,6 mm de diâmetro e gás de proteção $\text{Ar}+1\%\text{O}_2$. Note-se o aumento da frequência e diminuição do volume das gotas, conforme a corrente se eleva e que à cerca de 260 A ocorre uma brusca alteração nestes fatores, sendo essa a chamada “corrente de transição”, ou “corrente crítica”, acima da qual o modo de transferência passa a ser aerossol (“spray”). Na realidade, essa “corrente crítica” é função da seção transversal do arame e da extensão do mesmo (comprimento do arame após o contato elétrico) existindo, portanto, uma “densidade crítica de corrente”, desde que as outras condições sejam mantidas inalteradas.

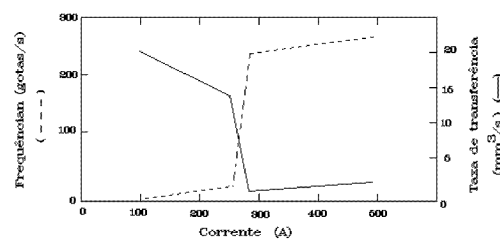


Figura 8.13 - Corrente Crítica de Transição (para Aerossol).

Na **Tab. 8.1** são fornecidas equações, que aproximadamente relacionam a corrente crítica I_c (A) com um dado diâmetro de eletrodo D (mm), para diferentes materiais e gases de proteção. Estas equações são válidas para diâmetros entre 0,8 e 2,4 mm; extensão após o bico de contato igual a 20 mm e “qualquer valor da corrente acima do calculado” deve produzir transferência em aerossol, respeitadas as possíveis variações devido a outros fatores.

Tabela 8.1 - Corrente Crítica (de Transição) MIG, em Função do Gás de Proteção; Material e Diâmetro do Arame

Material do Arame	Gás de Proteção	Corrente Crítica- I_c (A)
Aços ao Carbono e Baixa Liga	Argônio+2%O ₂	151xD+156
	Argônio+5%CO ₂	139xD+41
	Argônio+18%CO ₂	218xD+26
Aços Inoxidáveis Austeníticos	Argônio+1%O ₂	164xD+24
Cobre Desoxidado	Argônio	186xD+15
Bronze de Silício	Argônio	150xD+32
Alumínio 1100	Argônio	51xD+59
Alumínio 5183	Argônio	59xD+88

É importante ser esclarecida a expressão anterior “qualquer valor acima do calculado”, ou seja: variações nas condições de operação podem exercer notáveis influências sobre a corrente crítica de transição, sobressaindo-se a extensão do eletrodo após o bico de contato. Por exemplo, na **Tab. 8.2** são apresentadas equações aproximadas para a I_c em função desse fator, para arames de aço ao carbono e baixa liga, com gás de proteção Ar+1%O₂.

Tabela 8.2 - Corrente Crítica em Função do Diâmetro do Eletrodo e sua Extensão Após o Bico de Contato (MIG - Aços ao Carbono e Baixa Liga; Ar+1%O₂).

Extensão (mm)	Corrente Crítica- I_c (A)
5	136xD+53
25	131xD+35
50	117xD+28

Portanto, existem regiões ótimas de operação para cada modo de transferência, geralmente denominadas “envelopes operacionais”, definidas pelas condições de soldagem e caracterizando, principalmente, defeitos operacionais; geometria

da junta e estabilidade do arco.

❑ Transferência Axial por Corrente Pulsada

No Capítulo 3 foram apresentados os fundamentos teóricos envolvidos na utilização da corrente pulsada, além de aspectos relativos às vantagens da mesma. Portanto, é recomendável que o leitor consulte o mesmo antes de continuar na presente seção.

A introdução de pulsos de corrente, com frequência e amplitude pré-determinadas, permite transferir gotas de forma contínua e em alto número, utilizando uma muito menor energia de soldagem, quando comparado com a soldagem convencional (corrente constante no tempo). Conforme ilustrado na **Fig. 8.14**, nesse processo há uma corrente base (I_b), cuja função é manter o arco durante um dado intervalo de tempo (t_b), sendo que em intervalos definidos (t_p) ocorre a corrente de pico (I_p), com a combinação desses parâmetros resultando na corrente média (I_m). Quando estudada a transferência axial por aerossol, foi visto que existe uma corrente de transição, ou corrente crítica (I_c), acima da qual esse modo ocorre. Empregando-se uma I_p , que por um breve período de tempo atue com intensidade superior à I_c , é possível se transferir uma gota por pulso.

Entretanto, constata-se que a transferência será alterada pela ação conjunta de I_p e da energia envolvida. Quando I_p for menor do que I_c , há a formação de grandes gotas, como na transferência globular, podendo ocorrer curto circuito se a tensão for muito pequena. Com muito baixa energia, mas correntes acima da crítica, novamente se forma uma grande gota, pois a mesma é incapaz de se separar do arame na taxa necessária. Por outro lado, para energias excessivamente altas e correntes maiores que a crítica, a gota se alonga em demasia, podendo tocar a peça e resultando em curto circuito.

Dessa forma, há uma região ótima de energia, com corrente superior à crítica, no qual as gotas são transferidas uma por vez, sendo esse o ideal na operação com corrente pulsada. Para que a gota se transfira axialmente, é necessário que o tempo de atuação do pulso seja relativamente curto. Períodos longos levam à transferência tipo aerossol, com várias gotículas se formando ao mesmo tempo, o que é indesejável neste caso, pois não assegura o domínio completo da operação.

Portanto, como pode ser visto na **Fig. 8.14**, existem os seguintes estágios na formação da gota, os quais são: (1) Aquecimento; (2) Construção do líquido formado na ponta do arame; (3) Cresci-

mento da gota; (4) Separação da gota; (5) Re-início do ciclo.

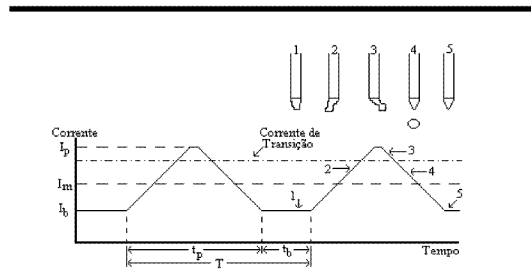


Figura 8.14 - Soldagem MIG com Corrente Pulsada com as Etapas em que a Transferência Ocorre (1 a 5).

O tempo total para ocorrer esses estágios, é inversamente proporcional à intensidade da I_p e independente de sua duração. Uma vez que tenha sido iniciada a contração da gota, o tempo para sua separação do arame é função da I_p e do diâmetro do mesmo, não importando a intensidade da corrente que existe no exato instante da separação. Outrossim, uma vez ocorrendo a formação da gota por uma I_p superior à I_c , esta será transferida, mesmo que a intensidade de corrente decresça ao nível da I_b . Isso pode ser explicado, pelo fato de que há uma certa inércia entre a aplicação da energia e seu efeito. Dessa forma, a principal responsável pelo tempo de separação da gota, é a taxa com que o metal fundido se acumula na ponta do arame.

O problema de se fixar os parâmetros com corrente pulsada, é mais complexo do que quando são utilizados equipamentos convencionais - ou com corrente constante no tempo. Inicialmente, a corrente de pico deve ser estabelecida. Isto pode ser feito experimentalmente, através da relação linear existente entre a corrente média (I_m); velocidade de alimentação do arame (W) e da definição de corrente média quando a onda é retangular (por exemplo):

$$I_p = (t \cdot I_m - t_b \cdot I_b) / t_p \quad [8.1]$$

onde:

I_p = corrente de pico;

I_b = corrente base;

t_p = duração da corrente de pico;

t_b = duração da corrente base;

$t = t_p + t_b$.

A seguir, é necessário assegurar que uma gota com diâmetro igual ao do arame seja transferida por cada pulso. A duração desse pulso deve

ser a mínima necessária para a separação da gota. Para tanto, basta se obter o volume da gota (V), e estabelecer seu diâmetro (d), em função do tempo em que ocorre a separação e da velocidade de alimentação do arame, o que é dado por:

$$V = (\pi d^2 / 4) \cdot (W / 60) \cdot t$$

ou

$$t = (240V) / (\pi d^2 W) \quad [8.2]$$

Como visto no Capítulo 3, há a seguinte relação entre I_p e t_p :

$$(I_p)^n \cdot t_p = \text{constante} \quad [8.3]$$

Devido à formação da gota ocorrer durante t_p , têm-se que a equação 8.2 se transforma em:

$$t_p = (240V / \pi d^2 W)$$

ou

$$V = (\pi d^2 W t_p) / 240 \quad [8.4]$$

Portanto, resta somente determinar a mínima corrente base (I_{bm}), o que não apresenta dificuldade, pois abaixo da mesma o arco se torna instável.

De posse dessas informações, é estabelecido o envelope operacional ótimo para uma dada condição de soldagem (gás de proteção, tipo e diâmetro do arame), como o apresentado esquematicamente na Fig. 8.15. Uma vez determinada a corrente média, dada pela equação 8.1; a corrente de pico, fornecida pela equação 8.3 e a corrente base mínima, é possível delimitar a exata região de operação.

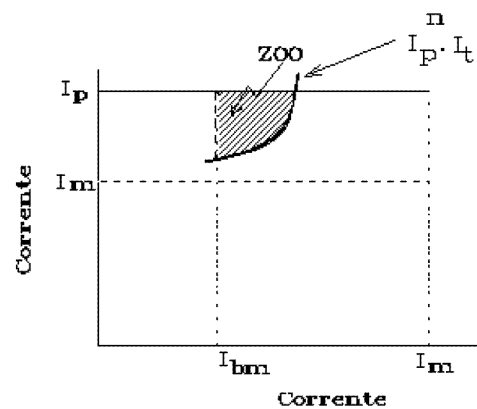


Figura 8.15 - Zona Ótima de Operação (ZOO) para a Soldagem MIG com Corrente Pulsada.

Portanto, o emprego da corrente pulsada permite a transferência de gota com volume constante, expulsa a cada pulso e axialmente em relação ao arame, o que apresenta, no mínimo, as seguintes vantagens sobre os métodos convencionais:

- A produção de salpicos é praticamente nula e o início do arco facilmente realizado, o que torna este método extremamente atrativo para robotização;
- É possível realizar soldas sobre espessuras desde muito finas até grandes, em todas as posi-

ções;

- As fontes de potência empregadas apresentam altíssima velocidade de resposta;
- A taxa de deposição é maior - em até cerca de 30% - do que com o processo convencional;
- A energia de soldagem utilizada é menor - para um mesmo efeito - do que aquela com sistema convencional;
- A qualidade da solda produzida é melhor do que aquela obtida com sistema convencional, se destacando o controle sobre a geometria do cordão.

GASES DE PROTEÇÃO

TIPOS

No Capítulo 2 foram discutidos fatores envolvidos na física do arco elétrico, com ênfase no ambiente em que o mesmo existe, sendo apresentadas nas Tabs.2.2 e 2.3 algumas propriedades dos gases geralmente empregados na soldagem.

Entretanto, a análise que a seguir será realizada possui um diferente enfoque, pois o principal interesse reside nos efeitos dos gases de proteção sobre os seguintes principais fatores:

- Modo de transferência do metal desde o eletrodo para a peça;
- Propriedades mecânico/metalúrgicas da junta soldada;
- Geometria e aparência da junta soldada;
- Estabilidade do arco e operacionalidade do processo.

O International Institute of Welding (IIW) classifica os gases de proteção para soldagem em sete grupos, de acordo com a composição e conteúdo do oxigênio no metal de solda depositado pelos mesmos, conforme mostrado na **Tab. 8.3**.

Por outro lado, aplicações sugeridas para esses gases e outros que não constam na relação do IIW, se encontram na **Tab. 8.4**. Entretanto, para um melhor entendimento das funções dos gases na soldagem MIG/MAG, são necessárias as seguintes considerações adicionais:

□ Gases Inertes

Entre os gases que não reagem com os metais sob o arco, o argônio (Ar) e o hélio (He) são aqueles mais utilizados na soldagem devido, principalmente, à facilidade de obtenção e custos dos

mesmos. A característica de serem inertes é muito atrativa na maioria dos casos. Para a soldagem dos aços, entretanto, deve ser adicionado um gás oxidante (O_2 ou CO_2). Isso torna o arco estável e reduz o salpico, através da benéfica ação sobre a tensão superficial e intensificação da ionização, além de aumentar sensivelmente a fluidez da poça de fusão, resultando num cordão com geometria conveniente.

Portanto, esses gases são utilizados puros ou combinados entre si, na soldagem dos não ferrosos, possuindo algumas decisivas diferenças, entre elas:

- O He é muito mais caro do que o Ar, sendo raro seu emprego no Brasil;
- O Ar possui menor potencial de ionização do que o He, iniciando e mantendo o arco mais facilmente;
- O Ar possui menor condutividade térmica que o He, produzindo um plasma cujo núcleo se mantém à mais alta temperatura;
- O Ar provoca menor queda no gradiente de potencial do arco do que o He, com a variação no seu comprimento afetando menos a tensão de trabalho;
- O Ar é mais denso cerca de 10 vezes que o He e 1,3 vezes que o ar. Isto faz com que a vazão do He deva ser em torno de 2,5 vezes maior do que a do Ar, para similar proteção. Além disso, o Ar tende a se depositar no nível do piso, enquanto o He se eleva, com possibilidade de diminuir a quantidade do ar respirado pelo operador. Outrossim, os medidores de vazão (fluxômetros) normalmente utilizados são calibrados para o Ar e, no caso do He, o valor lido deve ser multiplicado por 3,16;

- Para uma mesma corrente de soldagem, a tensão do arco é maior com He do que com Ar, resultando numa mais alta produção de energia. Como consequência, pode ser vantajoso o emprego do He na soldagem de peças muito espessas, ou materiais com alta condutividade térmica pois, além disso, seu calor específico e condutividade térmica são altos, produzindo um arco “mais quente”;

- A geometria do cordão de solda é característica em cada caso, sendo que o Ar produz cordões com muito maior penetração no centro do que nas bordas, enquanto que com o He eles possuem maior reforço, com grande e constante penetração;

- Em geral, a transferência em aerossol é mais prontamente obtida com Ar do que com He.

Como consequência dos itens acima, a mistura Ar + He aparentemente é mais interessante do que o He puro, já que podem ser associadas as convenientes e complementares propriedades dos dois gases.

As formas que o Ar é geralmente fornecido são:

- De altíssima pureza (99,99%), raramente utilizado na soldagem;

- 99,95% puro, ou Ar “U”, com impurezas máximas de 5 vpM (partes em volume por milhão, ou cm³/m³) para O₂ e H₂O, utilizado com metais altamente reativos, como titânio;

- Ar com menor pureza que o anterior, o qual, quando empregado em aços, é misturado a O₂ ou CO₂.

Por outro lado, o He, além de ser obtido em minas nos E.U.A., é também extraído desde gás natural, com 99,995% de pureza (tipo U).

□ Gás Neutro

A necessidade do uso de gás diatômico de alto rendimento energético e com custo relativamente baixo, para a soldagem do cobre e proteção da raiz da solda (“purga”), encontra no nitrogênio (N₂) uma solução. Em geral, a boa estabilidade do arco fornecida pelo Ar torna a utilização de misturas mais atraentes.

O N₂ pode ser obtido com pureza de até 99,99% e máximos de 10 vpM de O₂ e H₂O. Outrossim, devem ser tomadas precauções com rela-

Tabela 8.3 - Classificação IAW dos Gases para Soldagem por MIG/MAG

Grupo	Índice	Nº de Gases	Gases (%)					Tipo	Conteúdo Típico de nO ₂ Metálico de Solda (%)
			CO ₂	O ₂	Ar	He	H ₂		
H	1	1	-	-	-	-	100	Redutor	
	2	2	-	-	85 à 95	-	R*		
I2	1	1	-	-	100	-	-	Inerte	<0,02
	2	1	-	-	-	100	-		
	3	2	-	-	25 à 75	R	-		
M1	1	2	-	>0 à 2	R	-	-	Levemente Oxidante	<0,025
	2	2	>0 à 4	-	R	-	-		
	3	3	>0 à 4	>0 à 2	R	-	-		
M2	1	2	-	>2 à 5	R	-	-	Oxidante	<0,035
	2	2	>4 à 10	-	R	-	-		
	3	3	>0 à 10	>2 à 5	R	-	-		
M3	1	2	-	>5 à 12,5	R	-	-	Aumento na Oxidação	<0,045
	2	2	10 à 25	-	R	-	-		
	3	3	10 à 25	>0 à 12,5	R	-	-		
M4	1	2	-	>12,5	R	-	-	Idem	<0,054
	2	2	>25	-	R	-	-		
	3	3	0 à >25	0 à >12,5	R	-	-		
C	1	1	100	-	-	-	-	Fortemente Oxidante	~0,06 à 0,07
	2	2	R	<30	-	-	-		

* = Restante.

Tabela 8.4 - Gases de Proteção para Soldagem MIG/MAG

Material Base	Gás	Observações
Todas as ligas não ferrosas	Argônio	Arco de forte intensidade, com transferência em curto circuito e aerossol em todos os casos, exceto cobre e suas ligas, quando opera em aerossol.
Alumínio, cobre e suas ligas	Hélio	Gera maior energia do que argônio e minimiza porosidade. Transferência em curto circuito e aerossol no alumínio e em aerossol no cobre.
Alumínio; cobre; níquel; magnésio; titânio e suas ligas	Ar+He	Gera maior energia do que o argônio e minimiza porosidade, sendo preferível: (a) 100% He, ou 10%Ar + 90%He sobre alumínio e cobre em aerossol; (b) 25%Ar + 75%He sobre todas as ligas citadas, em aerossol e curto circuito, podendo alcançar até 50% / 50%.
Todos os aços e algumas ligas de cobre desoxidadas	Ar+1 à 2% O ₂	Especialmente indicado para aços inoxidáveis e juntas que devem possuir alta tenacidade. Transferência em aerossol.
Aços ao carbono e alguns baixa liga	Ar+3 à 5% O ₂	A tenacidade do metal de solda é menor do que com a mistura de gases anterior. Transferência em aerossol
	Ar+10 à 30% CO ₂	A tenacidade decai com o aumento do CO ₂ . Transferência possível em aerossol até 18% e em curto circuito com qualquer proporção. Uso sobre aços inoxidáveis limitado em 5% CO ₂ .
Aços ao carbono	CO ₂	Baixa tenacidade do metal de solda. Alta taxa de deposição. Transferência em curto circuito e globular. Possibilidade de porosidade, dependendo do conteúdo de desoxidantes contido no arame.
	CO ₂ +10 à 20% O ₂	Maior penetração e minimização de porosidade, quando comparado com puro. Formação de escória. Transferência globular.
Cobre e suas ligas	N ₂ ou Ar+20 à 30% N ₂	Grande energia de soldagem. Produção de fumos tóxicos e alto salpico, com a mistura apresentando arco mais estável do que puro N ₂ .
Aços ao carbono e baixa liga	Ar+2 à 5% O ₂ + 5 à 10% CO ₂	Tenacidade decai com o grau de oxidação. Transferência em curto-circuito e aerossol. Mínima incidência de porosidade. Pode ser utilizada em aços inoxidáveis com até 5% O ₂ e 2% (máximo) de CO ₂ .
Aços baixa liga	60 à 70%He+25 à 35%Ar+4 à 5% CO ₂	Metal de solda com alta tenacidade, em transferência por curto circuito.
Aços Inoxidáveis	He+7,5% Ar+2,5% CO ₂	Soldas com alta resistência à corrosão, em transferência por curto-circuito.
	Ar+2 à 4% CO ₂ +1 à 2% H ₂	Quando comparado com Ar + 1 à 2% O ₂ , apresenta melhor estabilidade de arco, metal mais fluido e mais alta velocidade de soldagem. Transferência por aerossol.
	13,5% Ar+85% He+1,5% CO ₂	Soldagem em curto-circuito.
	60% Ar+38% He+2% CO ₂	Soldagem por aerossol e com corrente pulsada.

ção à produção de fumos tóxicos durante a soldagem.

❑ Gás Redutor

Por possuir o mais alto calor específico entre os gases geralmente utilizados e alta condutividade térmica, o hidrogênio (H₂) é adicionado às misturas de Ar + CO₂ ou O₂, na soldagem de aços inoxidáveis austeníticos e alguns não ferrosos. O mesmo nunca deve ser utilizado na soldagem de aços ao carbono, baixa liga e outros ferro-

so em geral.

Este gás pode ser fornecido para soldagem com pureza de 99,95% e limites máximos de 10 vpm de O₂ e H₂O.

❑ Gases Oxidantes

Na análise dos gases inertes foi mencionado, que a soldagem dos ferrosos só é possível se o gás de proteção possuir um mínimo caráter oxidante. A ação do O₂, ou CO₂ ao Ar, além daquelas citadas anteriormente (como aumentar a fluidez do

metal fundido), é promover a existência de um grande número de pontos catódicos sobre a ponta do arame. De outra forma (Ar puro) seria produzido somente um ponto catódico, com movimento errático, depositando um cordão com geometria irregular e permitindo a contaminação pela atmosfera da poça de fusão.

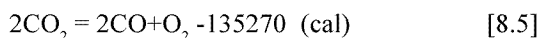
O CO₂ também pode ser utilizado, tanto em mistura com Ar e/ou O₂, quanto puro, conforme mostrado na **Tab. 8.4**. Este gás é geralmente comercializado com ponto de orvalho em torno de -40°C e 99,95% de pureza, mas um valor até 0,1% menor nesta última ainda produz soldas de qualidade aceitável para a maioria das aplicações.

Por sua vez, o O₂ deve possuir pureza mínima de 99,95%, com vapor d'água e CO₂ individualmente num máximo de 50 vpM. A adição de O₂ no Ar melhora a estabilidade do arco na soldagem dos ferrosos, além de minimizar a incidência de mordedura. Até 9% o O₂ provoca um contínuo aumento da penetração, a qual se estabiliza nesse patamar e é equivalente ao CO₂ puro. Além disso, 5% de O₂ diminui em cerca de 10% a taxa de fusão.

Outrossim, a adição de CO₂ no Ar é notável acima de 10%, tornando progressivamente o arco instável até cerca de 30% quando, então, o mesmo se assemelha ao CO₂ puro. A taxa de fusão do arame alcança um máximo de aumento (15%) em torno de 30% CO₂, enquanto a penetração varia até se tornar 25% maior com 40% CO₂, se estabilizando nesse ponto, mesmo com maior adição desse gás.

POTENCIAL DE CARBONO E OXIDAÇÃO

Na alta temperatura alcançada pelo arco, ocorre a seguinte reação endotérmica, quando CO₂ é o gás de proteção:



Próximo à peça, em relativamente baixa temperatura, há inversão na direção da reação, sendo liberado calor, o que pode ser a razão da alta penetração apresentada em MAG. Além disso, parte do CO é reduzido segundo a reação:

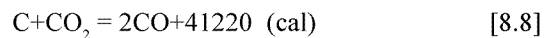


Outrossim, o ferro líquido se combina com o oxigênio livre e reage com o carbono:



O CO produzido pode causar oxidação e porosidade no metal de solda, sendo necessário a adição de elementos desoxidantes no arame, os quais são principalmente Mn e Si, para minimizar (ou anular) seus efeitos.

Uma atmosfera gasosa com CO₂ e CO possui interessantes propriedades. Entre as mesmas, a de que o carbono pode ser produzido ou absorvido pela poça de fusão, com o metal de solda sendo, conseqüentemente, carburizado ou descarburizado. Na realidade, isso depende da seguinte reação, a qual é denominada de gaseificação:



Os fatores que determinam o nível de carbono no metal de solda estão relacionados ao potencial de carbono (PC), o qual para a fase gasosa (PC_g) é dado por:

$$\text{PC}_g = \text{RT} \cdot \ln[(p_{\text{CO}})^2/p_{\text{CO}_2}] - \text{RT} \cdot \ln K \quad [8.9]$$

e nas fase líquida/sólida (PC_s):

$$\text{PC}_s = \text{RT} \cdot \ln a_c \quad [8.10]$$

onde:

R= constante universal dos gases;

T= temperatura absoluta;

p_{CO}, p_{CO₂} = pressões parciais do CO e do CO₂, respectivamente;

a_c = atividade do C na fase sólida (e líquida);

K= constante de equilíbrio da reação [8.19].

Então, ocorrerá carburização, se:

$$\text{PC}_g > \text{PC}_s \quad [8.11]$$

e descarburização (gaseificação), quando:

$$\text{PC}_g < \text{PC}_s \quad [8.12]$$

As reações descritas acima estão em equilíbrio, ou seja, qualquer aumento num composto leva a reação a ocorrer no sentido contrário. Dessa forma, na soldagem com CO₂ de aços, o C tende a se estabilizar em torno de um valor médio próximo a 0,10%. Se o conteúdo deste elemento for menor do que em torno de 0,05%, há tendência de carburização; se for maior do que cerca de 0,10%, o metal de solda será descarburizado.

Tanto o CO₂, quanto o O₂ no gás de proteção, aumentam o conteúdo de oxigênio no metal de solda. Entretanto, o efeito desses gases é desigual, ou seja, o potencial de oxidação (PO) varia com a porcentagem volumétrica dos mesmos na mistura. O PO também influi na fluidez da poça de fusão; quantidade de escória; volume de fumos; tenacidade e resistência mecânica do metal de solda, entre outros fatores. Fórmulas empíricas tem sido desenvolvidas, na tentativa de relacionar o PO com o oxigênio no metal de solda, sendo que o IIW apresenta a seguinte relação, válida para 25% max. CO₂ e 12,5% max. O₂:

$$PO = (\%O_2) + (\%CO_2) / 2 \quad [8.13]$$

Para diferentes proporções desses gases oxidantes, é admitida a seguinte relação geral:

$$PO = (\%O_2) + k.(\%CO_2) \quad [8.14]$$

onde “k” é uma constante.

Como a população de óxidos do metal de solda em aço é influenciada pelo PO do gás de proteção, quanto mais oxidante for o mesmo, menor será a tenacidade desta solda. Outrossim, os elementos químicos também sofrerão maior ou menor oxidação (ou “perda”, ou “queima”) no arco com o PO.

A Tab. 8.5 mostra a eficiência aproximada da transferência de alguns elementos químicos desde

o eletrodo para a poça de fusão, quando se utiliza CO₂ puro como gás de proteção na soldagem de aços ao carbono e baixa liga.

Entre as diversas alterações que a composição do gás de proteção causa no processo MIG/MAG, certamente as mais notáveis são exercidas sobre o modo de transferência; propriedades mecânico/metalúrgicas e características de deposição do metal de solda.

A Fig. 8.16 apresenta a influência do gás de proteção sobre a frequência da transferência de gotas. Note-se que o uso de gás inerte provoca um grande aumento dessa frequência, a qual define o modo em aerossol. Essa relação, como visto, depende da intensidade da corrente, sendo que os gases diatômicos reduzem, ou impedem completamente que o aerossol ocorra. Além disso, o CO₂ também atua sobre o intervalo da corrente em que o modo globular é produzido.

Por outro lado, a Fig. 8.17 mostra a tenacidade, em função da temperatura de ensaio e do tipo de gás de proteção empregado. Como se pode observar, quanto mais oxidante a mistura utilizada, menor é essa propriedade mecânica, principalmente à mais altas temperaturas. Outrossim, o argônio exerce um importante papel nesse mecanismo. As relativamente altas propriedades mecânicas apresentadas pelo metal de solda, quando esse gás se encontra em proporção igual ao CO₂ nas misturas binárias, ou ternárias, podem ser resultantes da grande seção de choque de seu átomo, a qual reduz a difusividade do outro gás na mistura.

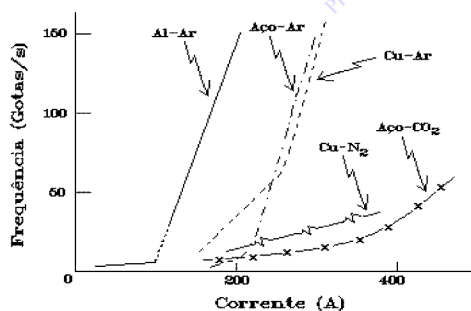


Figura 8.16 - Influência do Gás de Proteção sobre a Frequência de Transferência das Gotas.

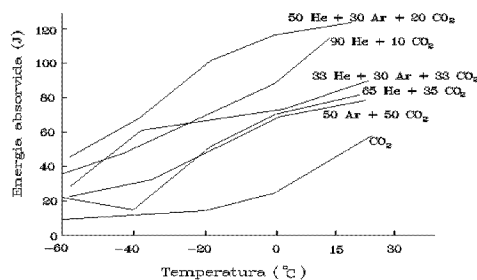


Figura 8.17 - Influência do Gás de Proteção sobre a Tenacidade do Metal de Solda.

Tabela 8.5 - Eficiência da Transferência dos Elementos Químicos na Soldagem MAG (CO₂) de Aços ao Carbono e Baixa Liga

Eficiência (%)	Elemento Químico										
	Cr	Cu	Mn	Mo	Nb	Ni	P	S	Si	Ti	Zr
	90	95	65	95	65	95	100	100	60	40	35

VAZÃO

A correta regulagem da vazão do gás de proteção possui tanto importância técnica, quanto econômica e as mesmas considerações gerais tecidas para o TIG são também válidas para MIG/MAG. Portanto, o fluxo deve ser necessariamente laminar, sendo que esse fato envolve complicados conceitos de magneto-fluidodinâmica.

De uma forma bastante aproximada, o número de Reynolds - vide Capítulo sobre TIG - pode ser utilizado como indicador do regime de deslocamento do gás. Entretanto, é fundamental ser bem entendida a ação da velocidade do fluxo de gás sobre a solda. Para um mesmo diâmetro de bocal, quanto maior a vazão, mais alta será a velocidade do mesmo. Isto implica em maior pressão sobre o metal fundido e, caso a velocidade for muito alta - passando o regime para turbulento - ocorre sucção de ar para o interior do arco.

Existem várias situações específicas que influem sobre a eleição da vazão mais conveniente. As mesmas podem tanto estar relacionadas com a

posição de soldagem e acesso à junta, quanto com a aderência de salpico à parede interna do bocal e concentricidade desse com o bico de contato. Outrossim, um excessivo ângulo de deslocamento da tocha pode induzir a penetração de ar sob o arco, não sendo recomendável que o mesmo exceda cerca de 25°.

Uma vez estabelecidas as características do trabalho a ser efetuado, a vazão do gás será determinada, fundamentalmente, pelos seguintes fatores interdependentes: (a) Intensidade da corrente; (b) Material do arame; (c) Velocidade relativa tocha/ar; (d) Tipo do gás de proteção; (e) Diâmetro do bocal.

Portanto, uma maneira de selecionar a correta vazão, é através da consideração do material e da intensidade de corrente. A **Tab. 8.6** mostra, para diversos materiais, a vazão recomendada dos gases Ar, CO₂, O₂ e suas misturas, na corrente inicial de 100 A, seguido do incremento à cada acréscimo de 50 A que ocorrer.

A vazão necessária do gás de proteção também pode ser relacionada com a posição de soldagem e diâmetro do arame. Note-se, ainda, que caso a mistura seja rica em He, os valores sugeridos na **Tab. 8.6** devem ser multiplicados por 2,5.

Determinada a vazão conveniente, o diâmetro do bocal pode ser escolhido através da **Tab. 8.7**.

Tabela 8.6 - Vazão dos Gases de Proteção (Ar, CO₂, O₂ e misturas) em Função do Material e Intensidade da Corrente

Material do Arame	Vazão para a Corrente de 100 A (l/min)	Vazão para Cada Acréscimo de Corrente de 50 A (l/min)
Aços	10	1,5
Alumínio, Níquel e suas Ligas	14	2,0
Cobre e suas Ligas	18	0,5
Magnésio e suas Ligas	20	1,5

Tabela 8.7 - Diâmetro do Bocal em Função da Vazão Selecionada.

Vazão (l/min)	Diâmetro (mm)
8 à 11	14
10 à 13	16
12 à 18	18
20 à 25	20

OPERACIONALIZAÇÃO DO PROCESSO

SELEÇÃO DO ELETRODO (ARAME)

Em todo o processo de soldagem, é imprescindível a correta combinação dos consumíveis envolvidos. O MIG/MAG não é exceção, sendo que arame e gás devem ser complementares.

A escolha do tipo de eletrodo é baseada em requisitos mecânico e metalúrgicos da junta, além de considerações do custo envolvido. Portanto, os fatores que mais influenciam a decisão sobre o tipo específico do eletrodo são: (a) O gás utilizado; (b) O modo desejado de transferência; (c) A posição de soldagem; (d) O serviço que a junta executará; (e) O meio ambiente; (f) O estado da superfície do metal base; (g) O estado de fornecimento do metal base (tratamentos termo-mecânico, etc.); (h) O nível de constrangimento da junta.

Os arames para MIG/MAG devem ser produzidos com estrito controle da composição e pureza. Entretanto, não somente esses itens são importantes, pois suas propriedades mecânicas e da seção considerada - tais como resistência à tração; dureza e rigidez - influenciam na operação de soldagem. Quando há variação nas mesmas de uma bobina para outra, é provável que ocorrerá alimentação errática do arame. Além disso, o estado superficial e a geometria do arame também devem ser controlados. A maioria dos eletrodos de aço são revestidos com uma fina camada de cobre, a qual protege o material da corrosão; aumenta a qualidade da conexão elétrica e a vida do bico de contato. Esses eletrodos são geralmente acondicionados em rolos ("bobinas") de 25 kg. Devido ao relativamente pequeno diâmetro dos arames, é grande a razão entre a área superficial e o volume dos mesmos, aumentando a importância no cuidado com a limpeza.

O livro dessa série "Sistemas de Especificação dos Consumíveis para Soldagem e Brasagem", já citado anteriormente, apresenta os eletrodos classificados pela AWS, DIN e ISO para várias ligas metálicas. São geralmente soldados por este processo os aços ao carbono, baixa liga e inoxidáveis; alumínio; cobre; magnésio; níquel; titânio e suas ligas. Para esses casos, de forma geral, as mesmas combinações metal base/metal de adição sugeridas para o TIG devem ser seguidas, bem como os gases citados na **Tab. 8.2**. Na soldagem dos aços ao carbono e baixa liga, a seleção daquele mais conveniente é realizada, basicamente, pelas propriedades mecânicas desejadas para o me-

tal de solda, depositado com um dos gases sugeridos na **Tab. 8.4**, sendo que quanto mais oxidante o mesmo for, maior será a perda dos elementos químicos sob o arco.

De forma sumária, a especificação AWS A5.18 de arames para a soldagem dos aços ao carbono consta dos seguintes dígitos:

AWS ER70S-X ou **R70S-X** (esta última para varetas somente)

onde, resumidamente, ER70S (ou R70S) designa um consumível cujo metal de solda deve apresentar, no estado "como soldado", resistência à tração mínima de 72.000 psi (500 MPa), quando depositado com CO₂ como gás de proteção; o dígito X indica, entre outros requerimentos, a composição química da vareta/aramé; ensaios mecânicos e de sanidade exigidos pela especificação e a resistência ao impacto mínima do metal de solda, numa dada temperatura de ensaio. Por exemplo, o ER70S-6 deve apresentar 20ft.lb (27 J) à -20 °F (-29 °C). Além disso, se o dígito "X" for a letra "G", o gás de proteção (para os ensaios especificados) pode ser decidido entre o fabricante e o comprador.

ESTABILIDADE DO ARCO

No intervalo usual de operação desse processo, a tensão do arco aumenta com a corrente, sendo a exata relação influenciada pelos seguintes principais fatores: (a) Comprimento do arco; (b) Tipo do gás de proteção; (c) Material e diâmetro do arame; (d) Extensão do eletrodo após o bico de contato.

Outrossim, as diferentes fontes de potência podem apresentar enormes discrepâncias na tensão dos terminais para uma dada corrente, dificultando o estabelecimento de características mais gerais de operação. Uma solução para este problema, é a adoção pelos fabricantes de equipamentos da seguinte equação do IIV relacionando estes parâmetros:

$$U = 0,05.I+14 \text{ (V)} \quad [8.15]$$

onde I (A) e U (V) são a corrente e a tensão nos terminais da máquina, nos intervalos 0-600 A e 0-44 V. Esta equação é adotada por Normas de diversos países.

Portanto, mantendo as demais condições inal-

teradas, a estabilidade do arco é determinada pela correta relação entre a tensão e a corrente de soldagem, com a distribuição da taxa de transferência das gotas - em relação à tensão para uma dada corrente - sendo um bom indicativo da estabilidade do mesmo. Deve-se enfatizar, que essa ótima estabilidade é característica para cada modo de transferência. As **Figs. 8.18 e 8.19** apresentam curvas para mesmas taxas de transferência (gotas/s) - números sobre as curvas - em relação às combinações corrente x tensão, para arames de aço (1,2 mm de diâmetro) e gases de proteção CO₂ (puro) e Ar+2%O₂, respectivamente.

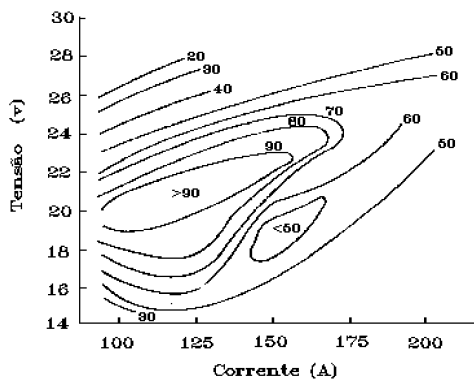


Figura 8.18 - Curvas de Mesma Taxa de Transferência das Gotas na Soldagem com CO₂.

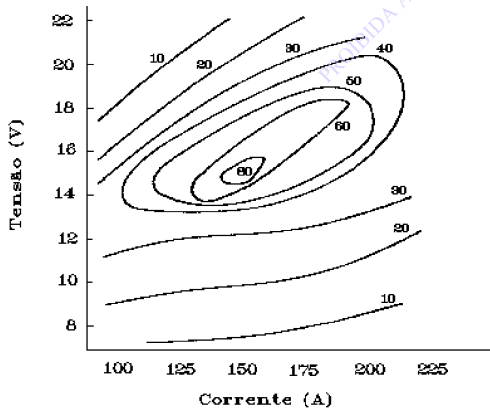


Figura 8.19 - Curvas de Mesma Taxa de Transferência na Soldagem com Ar+O₂

TAXAS DE DEPOSIÇÃO E FUSÃO

Como será melhor examinado no Capítulo 20, a taxa de deposição é definida como a massa do metal de adição (eletrodo/arames) depositada por unidade de tempo, numa dada intensidade de cor-

rente, com fator de operação igual a 100% (a solda ocorre sem nenhuma interrupção). Portanto, na sua avaliação são descontadas as perdas de metal que ocorrem na transferência devido ao salpico; sublimação de elementos químicos e aqueles que passam para a escória.

Por sua vez, a taxa de fusão é dada pela massa do consumível fundida por unidade de tempo. Portanto, a mesma depende da velocidade de alimentação do arame - à qual corresponde uma intensidade de corrente - e não possui relação com o fator de operação, pois não representa necessariamente o material depositado. Além disso, no seu cálculo não são consideradas as perdas ocorridas e há dependência da eficiência com que a transferência se realiza. Esta eficiência é função do processo e das condições específicas de operação, sendo que para o aço a mesma varia diretamente com o gás de proteção utilizado, segundo os seguintes valores aproximados: (a) Ar+2%O₂: 98%; (b) Ar+25%CO₂: 96%; (c) CO₂ (puro): 93%

A taxa de fusão pode ser calculada através da velocidade de alimentação do arame, a qual, por sua vez, está relacionada com a corrente de soldagem, para uma dada extensão do eletrodo, mantidas as outras condições constantes.

Dessa forma, se deve determinar a velocidade de alimentação do arame, com relação à intensidade de corrente, para as condições típicas de uso. A **Fig. 8.20** ilustra esta relação para arames de aço ao carbono, com diversos diâmetros, duas extensões e gás de proteção Ar + 20%CO₂. É inútil o fornecimento desta relação sem a informação da extensão e tipo do gás utilizado.

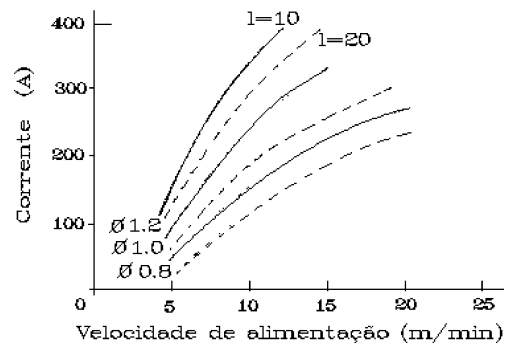


Figura 8.20 - Relação entre a Velocidade de Alimentação e Corrente de Soldagem (l=Extensão; Ø=Bitola do Arame).

Por outro lado, para uma dada corrente, a taxa de fusão aumenta quase linearmente com a exten-

são e também é função da densidade de corrente. Portanto, menores diâmetros de eletrodo fundem numa maior taxa para uma mesma intensidade de corrente, conforme mostrado na Fig. 8.21, com extensão de 20 mm, em aço ao carbono e CO₂ como gás de proteção.

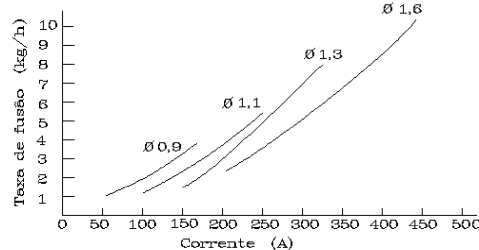


Figura 8.21 - Taxa de Fusão em Função da Intensidade de Corrente, para Diferentes Diâmetros (ϕ) de Arame.

Portanto, na realização de duas soldas com mesma velocidade de soldagem (e fator de operação), a que operar com maior taxa de fusão será produzida mais rapidamente.

De posse das mencionadas informações, é possível calcular a taxa de fusão e o consumo específico de gás - ou seja, o volume de gás utilizado por unidade de massa do metal de adição fundido - para um dado tipo e diâmetro de eletrodo, segundo as seguintes equações:

$$F = 0,0471 \cdot D^2 \cdot d \cdot W \quad (\text{kg/h}) \quad [8.16]$$

$$C = 60 \cdot V / F \quad (\text{l/kg}) \quad [8.17]$$

onde F é a taxa de fusão e C o consumo específico de gás, com:

D = diâmetro do arame (mm);

d = massa específica do arame (g/cm³);

W = velocidade de alimentação do arame (m/min);

V = vazão do gás (l/min).

Note-se que: (a) Se a velocidade de alimentação (e a corrente) for aumentada, mantendo o mesmo diâmetro de arame, será menor o consumo específico de gás; (b) Um efeito similar pode ser obtido, para a mesma velocidade de alimentação do arame, simplesmente empregando um maior diâmetro.

Dessa forma, quanto maior for a taxa de fusão, menor será o consumo do gás de proteção por massa de metal de adição fundido, o que é extremamente importante para a economia da soldagem.

Por exemplo, considere-se a seguinte situação:

Material: aço ao carbono (densidade = 7,8)

Gás de proteção: Ar+18%CO₂

Extensão do eletrodo: 20 mm

Aplicando as equações 8.16 e 8.17, se obtém os seguintes resultados:

CONDIÇÕES	CASO I	CASO II
Diâmetro do Eletrodo (mm)	1,2	0,8
Corrente (A)	300	100
Velocidade de Alimentação do Arame (m/min)	10	5
Modo de Transferência	Aerossol	Curto Circuito
Vazão do Gás (l/min)	15	15

FATOR	CASO I	CASO II
Taxa de Fusão (kg/h)	5,32	1,18
Consumo Específico de Gás (l/kg)	169,2	762,7

Portanto, gasta-se cerca de 4,5 vezes mais gás para depositar o metal de solda no CASO II do que no CASO I (!). Mesmo supondo que no CASO II a vazão fosse de somente 10 l/min e o CASO I continuasse inalterado, ainda assim a segunda situação teria um consumo específico cerca de 3 vezes maior do que a primeira.

VARIÁVEIS DE PROCEDIMENTO

Após a opção pelo metal base; consumíveis e junta, as seguintes condições devem, ainda, ser estabelecidas:

☐ Variáveis Fixas

São necessariamente estabelecidas antes da soldagem ser iniciada. Com exceção da vazão do gás, as outras variáveis não podem ser alteradas de forma simples, pois incluem o diâmetro do eletrodo e tipo do gás de proteção.

O primeiro passo é conhecer qual o intervalo de corrente admissível para o material e bitola do eletrodo empregado, o que é mostrado para alguns casos **Tab. 8.8**.

Como eletrodos de grande bitola podem operar com mais altas correntes, os mesmos apresen-

tam maior penetração e taxa de fusão. Entretanto, se dois eletrodos com diferentes diâmetros forem empregados numa mesma corrente, o menor provocará maior penetração e possuirá mais alta taxa de fusão. Por outro lado, quanto menor a bitola do eletrodo, mais rápida será a resposta do sistema à qualquer desvio das condições pré-estabelecidas. Portanto, a escolha do diâmetro do eletrodo depende de uma série de fatores, entre eles:

- Espessura do metal base;
- Penetração desejada;
- Taxa de deposição, com sua grande influência sobre o consumo específico de gás;
- Posição de soldagem e geometria do cordão.

Deve-se considerar, ainda, que quanto menor a bitola, maior é, em geral, o preço por quilo desse consumível.

Tabela 8.8 - Intervalos Típicos de Corrente para Diferentes Materiais e Bitolas Usuais de Eletrodos (MIG)

Material	Bitola (mm)	Intervalo de Corrente (A)
Aços ao Carbono e Baixa liga	0,8	40-200
	1,0	60-260
	1,2	120-360
	1,6	270-450
	2,0	360-540
Aços Inoxidáveis Austeníticos	0,8	75-150
	1,0	110-180
	1,2	140-310
	1,6	280-450
	2,0	360-540
Alumínio e suas ligas	0,8	50-175
	1,2	90-250
	1,6	160-350
	2,4	220-400
	3,2	350-470
Cobre e suas ligas	0,8	130-280
	1,2	200-400
	1,6	250-450
	2,4	350-550
Magnésio e suas ligas	1,0	150-300
	1,2	160-320
	1,6	210-400
	2,4	320-510
Níquel e suas ligas	1,0	110-170
	1,2	150-260
	1,6	100-400

☐ Variáveis Ajustáveis Primárias (ou Parâmetros de Soldagem)

Uma vez selecionadas as variáveis fixas, aquelas abaixo discriminadas são as mais importantes para serem controladas, sendo denominadas “parâmetros de soldagem”, cuja influência é notável sobre a geometria do cordão; propriedades mecânicas; defeitos operacionais e estabilidade do arco. Essas variáveis são as seguintes:

▪ Intensidade de Corrente

A corrente é o parâmetro com maior influência sobre a taxa de deposição; modo de transferência; penetração e reforço. A **Fig. 8.21**, apresentada anteriormente, mostra que a taxa de fusão varia quase linearmente com esse parâmetro, sendo que em altas correntes o efeito é mais pronunciado, provavelmente devido ao aquecimento (I^2R) do eletrodo após o bico de contato.

Em fontes de potência com curva característica tensão constante, o controle da corrente é realizado através da velocidade de alimentação, sendo a relação entre ambos diretamente proporcional. Com curva característica corrente constante, este controle é independente.

▪ Tensão

A tensão é o principal parâmetro para regular a largura do cordão influenciando, também, o modo de transferência. Em fontes de potência com curva característica tensão constante, esse parâmetro é estabelecido na máquina, enquanto

naquelas do tipo corrente constante, a tensão depende do comprimento do arco mantido pelo soldador e do sistema “tensão sensitivo” já discutido. A seleção da tensão mais conveniente é função da intensidade de corrente (para estabilizar o arco); tipo do arame e do gás de proteção, além da geometria desejada do cordão.

Uma muito baixa tensão pode causar porosidade; sobreposição (nos lados do cordão); cordão estreito e convexo. Um aumento excessivo deste parâmetro, faz com que o arco aumente proporcionalmente, causando porosidade; salpico e mordedura. Em ambos os casos, a estabilidade do arco é prejudicada.

▪ **Velocidade de Soldagem**

Além de sua óbvia ação sobre a taxa de deposição, a velocidade com que a tocha se desloca exerce influência sobre a geometria da poça de fusão. Sendo um importante fator na produtividade, este parâmetro deve ser o maior possível para uma dada aplicação. Entretanto, uma excessiva velocidade de soldagem pode provocar certos defeitos, entre eles trinca de solidificação.

O aumento da velocidade, mantidos os outros parâmetros fixos, causa as seguintes principais conseqüências: (a) Menor distorção da estrutura; (b) ZAC mais estreita; (c) Maior refino dos grão do metal de solda; (d) Diminuição das dimensões gerais do cordão. Outrossim, a penetração não é afetada de forma constante, alcançando um máximo e decrescendo com o contínuo aumento da velocidade, sendo que em aços ao carbono, a máxima penetração ocorre em torno de 7 mm/s.

As **Figs.8. 22 a 8.24** apresentam relações entre os parâmetros acima descritos, com a penetração; o reforço e a largura do cordão, respectivamente. As ilustrações são genéricas, sendo as tendências válidas para todos os materiais base, consumíveis e demais condições de soldagem.

□ **Variáveis Ajustáveis Secundárias**

Durante o transcorrer da soldagem, condições tais como a extensão e ângulo de deslocamento da tocha podem ser ajustados. O exato resultado da ação destas variáveis não é geralmente conhecido por antecipação, mas sim tendências, além das mesmas provocarem alteração nas variáveis ajustáveis primárias.

Como visto, o aumento da extensão provoca um maior aquecimento do eletrodo (I²R) e queda na tensão do arco. Isso diminui a penetração e aumenta a taxa de deposição.

Por sua vez, o ângulo de deslocamento da tocha, altera a geometria do cordão, sendo particularmente influente sobre a penetração. Como a **Fig. 8.25** mostra - com o ângulo de 90° como referência - a alteração no ângulo de deslocamento para o sentido negativo (“empurrando” a tocha) causa redução da penetração, com o cordão se tornando mais largo e plano. Passando para o sentido positivo (“puxando” a tocha) ocorre um notável aumento da penetração, até cerca de 25°, quando a mesma tende a diminuir. Ângulos maiores do que esse podem causar sobreposição na junta, além de permitir entrada de ar sob o arco.

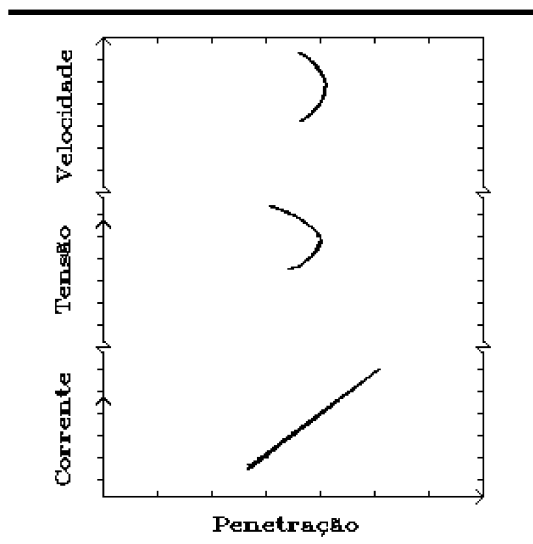


Figura 8.22 - Efeito dos Parâmetros de Soldagem sobre a Penetração da Solda.

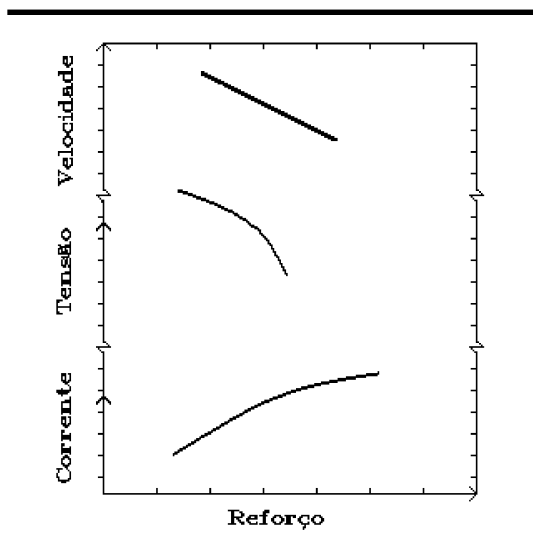


Figura 8.23 - Efeito dos Parâmetros de Soldagem sobre o Reforço da Solda.

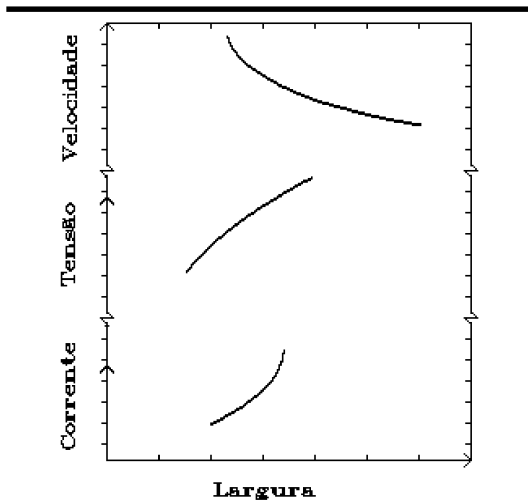


Figura 8.24 - Efeito dos Parâmetros de Soldagem sobre a Largura da Solda.

TÉCNICAS E VARIANTES DO PROCESSO

Uma vez estabelecidas as variáveis de procedimento resta, ainda, definir a técnica que será empregada na soldagem.

Nesse estágio, não se deve esquecer detalhes simples, mas importantes, tais como correta limpeza interna do bocal e recobrimento de suas paredes internas com um produto anti-aderente ao salpico.

Dependendo do modo de transferência, a posição do bico de contato no bocal e a extensão do arame após o mesmo variam caracteristicamente. Quando em curto-circuito, essa extensão deve permanecer entre 6 e 13 mm, enquanto a ponta do bico de contato se mantém em linha com o bocal, ou se projeta além do mesmo no máximo 3 mm. O ângulo de deslocamento também possui valores preferenciais e, dependendo da posição, pode ser:

- Horizontal e vertical-descendente: ângulo positivo (“puxando” a tocha) entre 15° e 20°;
- Vertical-ascendente: ângulo negativo (“empurrando” a tocha) entre 0° e 5°.

O modo de transferência em aerossol requer que o bico de contato permaneça dentro do bocal, conforme ilustrado na Fig. 8.26, com a extensão entre 19 e 25 mm. Nesse caso, tanto na posição plana, quanto na horizontal, o ângulo de deslocamento é negativo (“empurrando” a tocha) e deve se situar entre 5° e 10°.

Por sua vez, soldas na posição vertical devem ser realizadas em curto circuito. Sobre chapas com

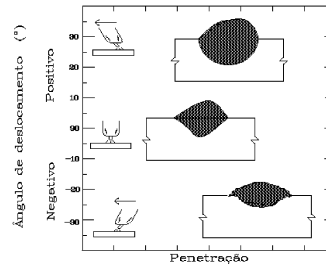


Figura 8.25 - Influência do Ângulo de Deslocamento da Tocha sobre a Penetração da Solda.

até cerca de 6 mm de espessura, a soldagem será realizada vertical-descendente, e vertical-ascendente para mais espessas. Nas juntas a topo, os parâmetros são similares àqueles da posição plana, com leve oscilação da tocha e maior velocidade de deslocamento. Em juntas de filete, a corrente utilizada deve ser cerca de 15% maior do que aquela da posição plana, com a oscilação da tocha aumentando proporcionalmente à espessura da chapa, a partir de 6 mm.

Com relação ao “tecimento”, para soldas na vertical-ascendente e passe de raiz, se recomenda o tipo denominado “árvore de Natal”, o qual está ilustrado na Fig. 8.27(a). Na posição vertical-descendente, pode ser utilizada a forma em “zig-zag”, mostrada na Fig. 8.27(b), enquanto os passes de enchimento em geral podem ser realizados de acordo com o modelo ilustrado na Fig. 8.27(c). Nos casos (a) e (b), os pontos sobre as linhas simbolizam pequena pausa.

O ângulo de trabalho na posição plana de juntas com chapas de igual espessura, é de 90° para aquelas a topo e 45° nas de filete. Juntas a topo soldadas na posição horizontal, devem manter um ângulo de 70° entre a chapa superior e a tocha no passe de raiz, enquanto que no segundo passe o mesmo deve ser de 115°.

Os demais passes são realizados de acordo com

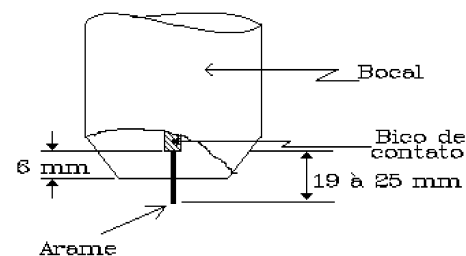


Figura 8.26 - Bico de Contato no Interior do Bocal na Transferência por Aerossol.

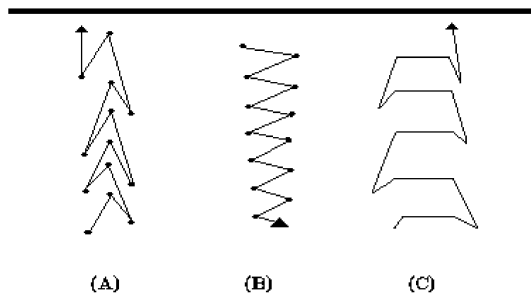


Figura 8.27 - Tipos de "Tecimentos" na Posição Vertical-Ascendente e Passes de Raiz.

a posição do passe anterior. Juntas de filete na posição horizontal devem ser soldadas com o ângulo entre a chapa vertical e a tocha de 55°, para compensar a tendência do metal fundido de deslizar em direção à chapa horizontal.

O processo MIG/MAG possui diversos variantes, entre os mesmos:

❑ O "Plasma-MIG", que será descrito no capítulo dedicado ao processo Plasma;

❑ Oscilação mecânica da tocha, produzindo cordões de solda muito mais largos, úteis tanto em grandes chanfros, quanto nos revestimentos protetores;

❑ O método "MAGCI", no qual é acrescentado um segundo bocal concêntrico ao convencional. Nesta caso, pelo bocal interno flui um gás inerte - o "I" da sigla - normalmente Ar, numa proporção de 15% a 20% do total, enquanto pelo externo se utiliza 80% a 85% de CO₂ - o "C" da sigla. As vantagens apresentadas, são maior estabilidade do arco e notável diminuição do salpico

❑ MIG "chanfro estreito" ("narrow gap"), provavelmente é o método que tem sido mais utilizado e sofrido aperfeiçoamento. Chapas de qualquer espessura podem ser soldadas, mas normalmente o método compete com outros processos automáticos acima de 50 mm. As chapas devem possuir chanfro reto, ou em "V" num ângulo extremamente pequeno (cerca de 5°), com distância de raiz variando tipicamente entre 7 e 15 mm. O bico de contato geralmente é resfriado com água e o bocal deve ser especialmente projetado, pois todo o conjunto é introduzido no interior do chanfro. Diversos sistemas são empregados, todos com o intuito de minimizar o perigo da falta de fusão na parede lateral do chanfro. O arame (ou arames) pode ser

retorcido, enrolado, ou curvado, conforme mostrado nas Figs. 8.28(a-c), respectivamente.

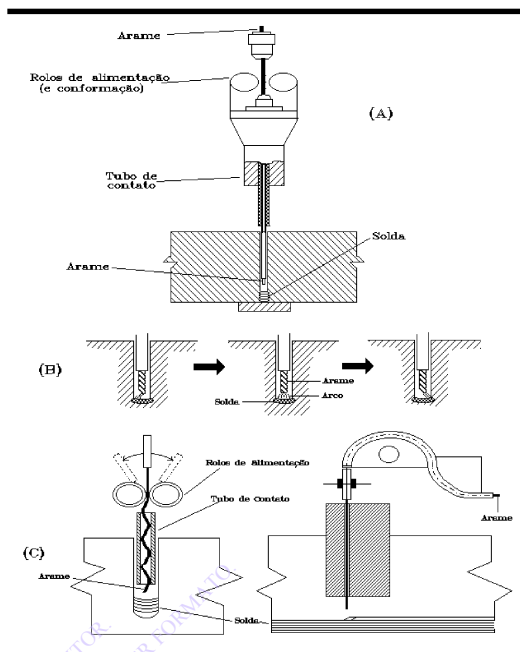


Figura 8.28 - Sistemas MIG com Chanfro Estreito, utilizando Arames Retorcido (A); Enrolado (B), ou Curvado (C).

O gás de proteção utilizado nos aços ao carbono e baixa liga é geralmente Ar + 2 0%CO₂, em um ou dois passes por camada e arame com bitola de 1,2 mm. Muito pouco CO₂ pode causar falta de fusão na parede, enquanto excesso produz porosidades.

Algumas vantagens do chanfro estreito são:

- Reduzida massa total do metal de solda depositado;
- Como conseqüência, pequena distorção;
- Propriedades mecânicas melhoradas, notavelmente tenacidade, inclusive na (pequena) ZAC formada;
- Redução do tempo total de soldagem, promovendo economia geral.

Como ilustração, comparando a distorção angular provocada por diversos processos na soldagem de chapas de aço com 20 mm de espessura e tomando o Eletrodo Revestido como 100%, têm-se: 22% para o Arco Submerso; 7% para o Chanfro Estreito e 2% para o Feixe de Elétrons.

Por sua vez, as principais desvantagens desse método são:

- Facilidade com que certos defeitos são pro-

vocados, principalmente falta de fusão e porosidade;

- Dificuldade em remover os defeitos;
- Maior tempo de preparação para a soldagem;
- Necessidade de operador com nível técnico mais elevado.

□ Outra aplicação especializada do MIG, é a soldagem tipo ponto. Nesse caso, chapas superpostas são soldadas em pequenas regiões (“pontos”), ocorrendo a fusão local, através da penetração completa em ambas. Aços ao carbono; baixa liga; inoxidáveis e alumínio podem ser soldados por este método, o qual requer bocal especial e controle automático do tempo de arco.

□ MIG para soldagem subaquática é mais uma interessante possibilidade desse versátil processo. Nesse caso, é adaptado na tocha um dispositivo que produz uma cortina d’água de alta pressão em torno do arco, não permitindo que o metal fundido mantenha contato com a mesma. Experiências com um sistema desenvolvido no **LS&TC** demonstraram a viabilidade técnica de tal método, com a produção de juntas soldadas de qualidade similar àquelas realizadas na superfície. O MIG para soldagem subaquática é aparentemente viável para lâminas d’água de até cerca de 40 m.

□ O Eletrogás é outro variante deste processo, o qual será explanado em capítulo subsequente, juntamente com Eletroescória.

PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

Devido à muito grande diversidade dos gases de proteção e eletrodos (tipo e diâmetro), foge do escopo desse livro fornecer procedimentos de soldagem para todos os casos. Dessa forma, à partir de uma situação similar conhecida, devem ser realizados experimentos que conduzam à condições ótimas.

Antes, porém, de ser iniciada qualquer solda, adequados filtros de proteção para os olhos devem ser colocados nos elmos, além de utilizadas

vestimentas convenientes, sendo que no Anexo 2 são relacionados os casos pertinentes.

A **Fig. 8.29** ilustra os tipos de preparação das juntas mencionadas nas tabelas dos procedimentos sugeridos, as quais são:

- Aços ao carbono e baixa liga: **Tab. 8.9**;
- Aços inoxidáveis: **Tab. 8.10**;
- Alumínio e suas ligas: **Tab. 8.11**;
- Cobre e suas ligas: **Tab. 8.12**.

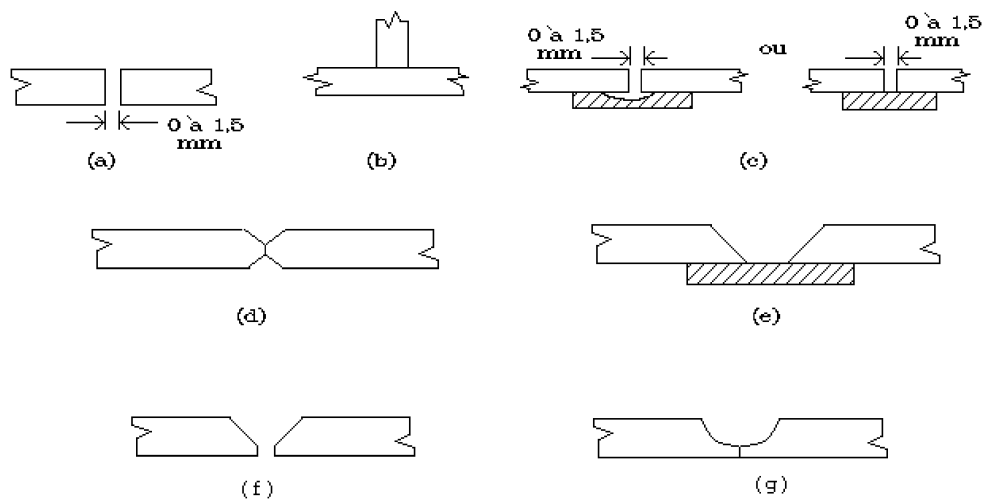


Figura 8.29 - Preparação da Juntas para Soldagem, Conforme Indicado nas Tabelas 8.9 a 8.12.

Tabela 8.9 - Procedimentos Sugeridos para Soldagem MIG de Aços ao Carbono e Baixa Liga - Juntas a Topo e Filete - Posição Plana e Horizontal(a) (Vertical e Sobrecabeça em certos casos - veja ítem "b")

Espessura do MB ou Perna (mm)	Junta (Fig.8.30)	Gás		Nº do Passe	F (mm)	W (m/min)	I (A)	U (V)	V (mm/s)	Taxa de Fusão (kg/h)
		Tipo	Vazão (l/min)							
0.5	A,B(b)	I	9	1	0.8	1.90	35	16	6	0.45
1.0	A,B(b)	I	9	1	0.9	3.30	80	17	16	0.99
	BC	II	15	1	1.1	8.89	275	25	78	3.98
2.0	A,B(b)	I	10	1	0.9	4.95	110	18	13	1.48
	BC	II	17	1	1.1	11.56	330	28	49	5.17
3.0	BC	III	17	1	1.6	4.19	300	24	15	3.97
4.0	A,B(b)	I	13	1	1.1	5.71	190	21	11	2.55
	BC	IV	17	1	1.2	11.00	330	24	8	5.86
		II	19	1	1.6	7.49	390	29	35	7.09
5.0	BC	III	18	1	1.6	5.97	350	25	14	5.65
6.0	A,B(b)	I	13	1	1.1	5.71	190	22	7	2.55
	B,D(c)	IV	17	1	1.6	5.00	330	24	8	4.73
		V	17	2	1.6	5.50	350	25	8	5.20
	BC	II	21	1	1.6	9.91	475	32	21	9.34
	BE	III	18	1 e 2	1.6	5.97	350	25	13	5.65
10.0	BC	II	23	1	2.4	3.49	575	34	15	7.43
	B,D(c)	IV	15	1	1.2	7.20	270	24	7	3.83
			15	2	1.2	7.50	280	24	7	3.99
	BE	III	18	1 e 2	1.6	5.97	350	25	9	5.65
13.0	BC	II	24	1	2.4	4.13	625	36	13	8.79
	B,D(c)	IV	20	1	2.4	3.50	440	28	8	7.45
			20	2	2.4	3.10	400	27	8	6.60
		III	18	1 a 3	1.6	5.97	350	25	10	5.65
16.0	E	II	23	1	2.4	4.13	625	37	9	8.79
19.0	E	II	24	1	3.2	2.41	675	37	8	9.12
	D(c)	IV	17	1 e 2	1.6	5.50	350	25	7	5.20
	B,D(c)	III	20	1 a 4	2.4	2.79	425	28	11	5.94
25.0	E	II	24	1 e 2	3.2	2.41	675	37	7	9.12
	B,D(c)	III	20	1 a 6	2.4	2.79	425	28	11	5.94

Notas:(a) F= diâmetro do arame; W= velocidade de alimentação; I= corrente; U=tensão; V= velocidade de soldagem; (b) É possível utilizar estes parâmetros para posições vertical e sobrecabeça, desde que a corrente seja reduzida cerca de 15%; (c) Para junta em filete (B), passes no mesmo lado Para junta a topo, passes em ambos os lados; (d) Tipos de Gases: I=CO₂ ou Ar + 25% CO₂; II=CO₂; III=Ar+1 à 5% O₂; IV=Ar+3% O₂; V=Ar+5% O₂.

Tabela 8.10 - Procedimentos Sugeridos para Soldagem MIG de Aços Inoxidáveis - Juntas a Topo e Filete (Vertical e Sobrecabeça em certos casos - veja ítem "b")(a)

Espessura do M.B. ou Perna (mm)	Junta (Fig.8.30)	Gás		Nº do Passe	F (mm)	W (m/min)	I (A)	U (V)	V (mm/s)	Taxa de Fusão (kg/h)
		Tipo	Vazão (l/min)							
1.0	A	I	10	1	0.8	2.60	45	15	9	0.61
	B		10	1	0.8	3.70	60	17	6	0.87
1.5	A,B(b)	II	9	1	0.9	4.13	80	17	12	1.23
	A	I	10	1	0.8	3.75	65	16	13	0.88
2.0	B		10	1	0.8	6.30	100	19	7	1.48
	A,B(b)	II	10	1	0.9	5.65	110	18	12	1.68
4.0	A	I	10	1	0.8	4.25	75	17	8	1.00
	B		10	1	0.8	5.10	95	18	8	1.20
6.0	A,B(b)	II	13	1	1.1	6.22	220	24	12	2.76
	A	I	10	1	0.8	5.50	90	17	3	1.29
12.0	B		11	1	0.8	9.20	140	21	6	2.16
	A,B(b)	II	14	1 e 2	1.1	7.87	260	27	12	3.50
12.0	D	II	16	1	1.6	5.83	300	28	6	5.48
			17	2 e 3	1.6	7.92	350	29	7	7.45

Notas:(a) F= diâmetro do arame;W= velocidade de alimentação;I= corrente;U= tensão;V= velocidade de soldagem; (b) É possível utilizar esse parâmetros para posições vertical e sobrecabeça, desde que a corrente seja reduzida em cerca de 15%; (c) Tipos de Gases:

I=Ar+3% CO₂+1% H₂; II=Ar+1% O₂.

Tabela 8.11 - Procedimentos Sugeridos para Soldagem MIG do Alumínio e suas Ligas - Juntas a Topo e Filete - Todas as Posições e Gás de Proteção Argônio, Quando Não Indicado o Contrário (a)

Espeura do M.B. ou Perna (mm)	Junta (Fig.8.30)	Vazão do Gás (l/min)	Nº do Passe	F (mm)	W (m/min)	I (A)	U (V)	V (mm/s)	Taxa de Fusão (kg/h)
2.0	AB	13	1	0.9	7.62	80	16	10	0.78
4.0	AB	15	1	1.2	5.52	150	20	10	1.01
6.0	BF	17	1	1.6	4.32	200	21	10	1.41
	A(b)	26(c)	1 e 2	1.6	6.30	200	26	11	2.05
8.0	BF	18	1 e 2	1.6	4.83	230	24	11	1.57
	A(b)	30(c)	1	1.6	10.00	280	31	11	3.25
13.0	BF	15	3	1.6	4.32	200	24	5	1.41
	C	26	1	2.4	6.80	420	31	7	4.98
20.0	BF	21	4	1.6	6.60	300	27	4	2.15
	F(b)	47(c)	3	2.4	8.20	550	36	5	6.00

Notas: (a) F= diâmetro do arame; W= velocidade de alimentação; I= corrente; U= tensão; V= velocidade de soldagem; (b) Somente posição plana.(c) Gás de proteção: 70%He+30%Ar.

Tabela 8.12 - Procedimentos Sugeridos para Soldagem MIG do Cobre e Suas Ligas - Juntas a Topo e Filete - Posições Horizontal e Plana*

Material do Arame	Espessura do M.B. ou Perna (mm)	Junta (Fig.8.30)	Vazão do Gás (l/min)	Nº do Passe	F (mm)	W (m/min)	I (A)	U (V)	V (mm/s)	Taxa de Fusão (kg/h)
70%Cu-30%Ni	6.0	E	17	1	0.8	10.50	130	18	4	2.83
			17	2	0.8	10.50	130	18	3	2.83
	13.0	D	25	1	1.6	5.02	290	25	2	5.41
			25	2	1.6	6.98	330	28	2	7.52
			25	3 a 4	1.6	6.00	310	27	2	6.47
80%Cu-20%Ni	13.0	G	25	1 a 5	1.6	7.96	350	29	2	8.58
			25	1 a 4	1.6	6.49	320	27	2	6.99
Cu	2.0	A,B	19	1	1.2	6.48	190	24	10	3.94
			19	1	1.2	7.24	220	25	10	4.40
	3.0	B,F	21	1	1.6	5.08	350	25	6	5.49
			21	1 a 2	1.6	7.11	420	26	4	7.68
			22	1 a 4	1.6	7.37	440	27	3	7.96
Bronze de Silício	3.0	A,B	19	1	1.2	5.71	230	27	12	3.30
			19	1 a 3	1.6	4.57	180	28	12	4.70
Bronze de Alumínio	3.0	A,B	19	1	1.2	7.37	210	24	9	3.79
			20	2	1.6	4.57	290	26	8	4.18
	13.0	B,F	20	1 a 6	1.6	5.08	320	23	5	4.64

* F= diâmetro do arame; W= velocidade de alimentação; I= corrente; U= tensão; V= velocidade de soldagem; Gás de Proteção Argônio.

CÓPIA AUTORIZADA PARA DISTRIBUIÇÃO GRATUITA. PROIBIDA A COMERCIALIZAÇÃO EM QUALQUER FORMA.

**C
A
P
Í
T
U
L
O

09**

**SOLDAGEM A ARCO
PLASMA**

INTRODUÇÃO	220
EQUIPAMENTOS E CARACTERÍSTICAS	222
Modos de Soldagem e Variáveis de Controle	223
CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS	226
Técnicas e Variantes	226
Procedimentos de Soldagem	226

INTRODUÇÃO

A coluna do arco elétrico é composta por matéria altamente ionizada e eletricamente neutra, denominada plasma. Esse nome é devido ao fundador da física da matéria no seu quarto estado, I. Langmuir, possuindo raiz no grego “plásma”, que significa “obra modelada”, chegando ao português através do latim “plasma”, ou “criatura”.

A área da Física que estuda este assunto, geralmente distingue dois grandes grupos de plasmas: o tipo “quente”, cuja temperatura alcança milhões de Kelvin, tal como aquele encontrado no interior do Sol; e o “frio”, não ultrapassando algumas dezenas de milhares de Kelvin, existindo tipicamente no arco dos processos já estudados.

No plasma “frio” há ação mútua entre as partículas e durante os choques é possível ocorrer infiltração de um campo magnético através do mesmo. Já no plasma “quente”, na presença de um campo magnético, suas partículas giram ao redor das linhas de força eletromagnéticas e se movem livremente fora do mesmo, resultando num deslocamento helicoidal. Dessa forma, o campo magnético fica “aderido” ao plasma, cuja resistência à passagem de corrente elétrica é quase nula.

Há cerca de 70 anos foi descoberto um interessante fenômeno, o qual teria importantes implicações para a soldagem e o corte térmico, ou seja: através da constrição do arco elétrico, o plasma gerado alcança temperaturas de até 50.000 K.

Esta é a origem do nome “Plasma” para o processo de soldagem (e corte) aqui apresentado. É relevante ser entendido, que o seu emprego somente foi possível com o desenvolvimento de tochas, tais como aquelas apresentadas esquematicamente nas **Figs. 9.1(a,b)**. Em ambas as figuras, um eletrodo refratário não consumível (similar ao TIG) é geralmente conectado ao pólo negativo de uma fonte, com curva característica corrente constante (“tombante”). Em torno desse eletrodo encontram-se dois bocais concêntricos pelos quais flui gás, usualmente inerte. Existindo somente o gás de orifício, se forma na periferia do mesmo uma camada relativamente fria (envolvendo a coluna), a qual se desloca em alta velocidade, o que perturba a poça de fusão e aumenta o diâmetro do plasma sobre a peça. Envolvendo-se essa coluna por outro gás, as conseqüências são dispersão da camada de gás frio e maior constrição do plasma, o que é altamente interessante para a soldagem. Portanto, essa é a forma utilizada na soldagem e corte, com o gás adicional denominado de proteção, ou

de foco. No tipo arco transferido, ilustrado na **Fig. 9.1(a)**, o circuito é formado entre o eletrodo e a peça, enquanto no não-transferido da **Fig. 9.1(b)**, o mesmo ocorre através do eletrodo e bocal, com o plasma sendo impulsionado até a peça.

O primeiro sistema cede uma maior parcela da energia gerada para a peça, mas somente pode operar se a mesma for condutora de eletricidade, sendo mais utilizado em solda e corte de metais. O segundo modo é geralmente empregado para pulverização térmica - processo de recobrimento protetor de superfícies que será estudado nesse livro - ou corte de outros materiais não condutores de eletricidade.

Em geral, o arco é iniciado nos dois casos por descarga de alta frequência entre o eletrodo e o bocal. O gás flui, sofre ionização no orifício e emerge como um jato de plasma.

A constrição do arco aumenta muito a densidade de corrente; a intensidade do campo magnético e as forças de Lorentz, as quais agem ao longo da coluna. São esses fatores que provocam a muito alta temperatura do plasma, bem como sua rigidez.

No arco transferido, existem cinco “quedas de potencial”, nas diversas regiões apresentadas na **Fig. 9.1(a)**, de forma que a tensão total do arco é:

$$U = U_c + U_p + U_b + U_d + U_a \quad (V) \quad [9.1]$$

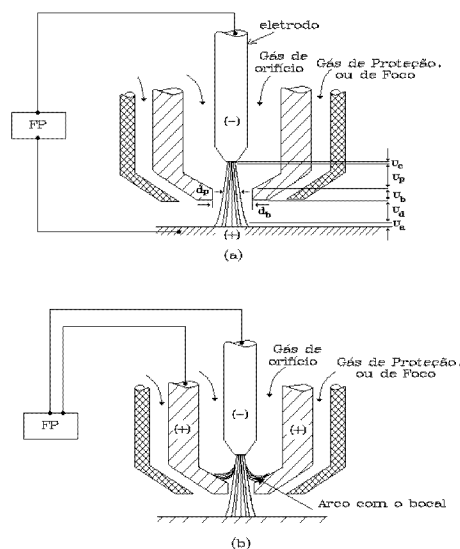


Figura 9.1 - Plasma com Arco Transferido (a) e Não Transferido (b).

onde:

U_c, U_a = quedas de potencial catódica e anódica, respectivamente (V);

U_p, U_b, U_d = quedas de potencial nas regiões de pré-construção; constrigida e após a constrigão (coluna), respectivamente (V).

Note-se que o diâmetro da coluna do plasma na região de constrigão, é menor que aquele do orifício no bocal. Além dessa região, o diâmetro aumenta até o jato de plasma encontrar a peça. No plasma não-transferido não há a queda de potencial da coluna, pois o arco é formado entre o eletrodo e o bocal.

A queda de tensão catódica depende da intensidade de corrente; grau de constrigão e material do eletrodo. Para o tungstênio, a mesma está entre 5 a 8 V. Já a queda de potencial anódica é praticamente independente desses fatores, se situando no intervalo de 5 a 6 V. As quedas de tensão nas outras regiões, são resultantes do produto da intensidade do campo elétrico pela extensão de cada região.

O balanço energético do plasma é um ponto do mais alto interesse, envolvendo a potência gerada; sua distribuição e rendimento.

A potência é o produto da tensão total do arco pela corrente. Por sua vez, a tensão é consequência de diversos fatores, entre os quais: (a) Características geométricas da tocha, sobressaindo-se o diâmetro do orifício de constrigão, além das extensões das regiões de pré-constrigão, constrigida e após a constrigão (coluna); (b) Corrente de soldagem; (c) Tipo e vazão do gás. Dessa forma, a potência do arco é consumida em: (a) Aquecimento do cátodo; (b) Perdas para o ambiente; (c) Aquecimento do bocal; (d) Aquecimento da peça. Note-se que no arco não-transferido, o aquecimento do ânodo (a peça, no arco transferido) é adicionado àquele que normalmente ocorre no bocal.

Portanto, essa distribuição do calor pode ser estimada em:

- Cátodo: o material sendo tungstênio, o consumo será cerca de 4 W e no caso do zircônio, em torno de 6 W por Ampère;
- Ânodo: aproximadamente 11 W por Ampère;
- Bocal: entre 10% e 25% da energia gerada nas regiões de pré-constrigão e de constrigão do gás. Para o arco não transferido, a energia perdida no ânodo deve ser adicionada a essa;
- Ambiente: grande parte da energia gerada na coluna (10% a 25%) é transferida para as ca-

mas externas frias da mesma;

- Energia transferida para a peça: para o tipo arco transferido, alcança até cerca de 75%; no não-transferido, essa eficiência diminui para em torno de 30%.

Entretanto, a energia transferida para a peça não é completamente utilizada para fundir - o que seria altamente desejável na soldagem e corte - sendo parte consumida no simples aquecimento (indesejável) de regiões adjacentes àquela de interesse. Entre outros fatores, a eficiência de fusão é função da velocidade de soldagem - além da potência elétrica do arco e coeficientes físicos e térmicos do material - variando para o Plasma do tipo arco transferido de 15 à 45% e se estabilizando nesse patamar, quando a mesma alcança cerca de 20 mm/s, sendo equivalente ao processo TIG apresentado no Capítulo 7. Para o Plasma do tipo não transferido, essa eficiência de fusão não é maior do que 20%. Por sua vez, a eficiência térmica do arco no Plasma tipo arco transferido, também é fortemente influenciada pela velocidade de soldagem (diferentemente do TIG) variando entre cerca de 45% à 5 mm/s e 75% à 20 mm/s. Essa menor eficiência é devida, provavelmente, às perdas ocorridas na tocha Plasma.

O principal modo de aumentar a eficiência do Plasma, é através da maior constrigão do mesmo. Há, porém, simultânea elevação da intensidade do campo elétrico nesta região de constrigão, a qual somente pode ser provocada até certos limites. No arco indireto, a máxima constrigão é ditada pela capacidade do bocal em sofrer aquecimento sem ser destruído, além do desvio do arco no orifício. Considerando o arco direto, o que limita a constrigão é a formação de um segundo arco, proveniente da quebra daquela camada de gás relativamente fria, a qual envolve a coluna. Dessa forma, um arco ocorre entre o eletrodo e o bocal, enquanto o outro se forma entre o bocal e a peça. Para evitar esse inconveniente, a queda de potencial na região de constrigão deve ser menor do que a tensão de ruptura da camada de gás, a qual depende da espessura da mesma; da condutividade térmica e vazão do gás, além da temperatura da coluna.

Portanto, o Plasma é mais um processo, o qual pode ser utilizado para solda, corte e pulverização térmica, sendo aqui analisada somente a primeira aplicação, pois as outras serão estudadas em Capítulos posteriores.

O processo Plasma pode ser utilizado para re-

alizar soldas de alta qualidade sobre ferrosos; não-ferrosos; materiais altamente reativos e, com micro-plasma (veja mais adiante), mesmo naqueles com baixo ponto de fusão, tais como prata e ouro.

A mínima espessura geralmente soldada por plasma é cerca de 0,08 mm, mas peças tão finas quanto 0,02 mm tem sido produzidas, utilizando corrente de somente 1,5 A. Apesar de geralmente ser mais econômico empregar outro processo para a soldagem de peças com espessura maior do que 8 mm, requerimentos de alta qualidade podem exigir o uso do Plasma em dimensões muito maiores.

Por outro lado, devido a certas similaridades, é inevitável a comparação do Plasma com o TIG. Entretanto, existem diferenças notáveis entre os dois processos, sendo que o Plasma apresenta as seguintes vantagens:

- Mesmo em muito baixas correntes, o arco é estável;
- A coluna é rígida e de reduzido diâmetro, provocando estreitas poça de fusão e ZAC;
- Como consequência do item anterior, a tendência à distorção é muito menor;
- Quando utilizado o procedimento de “furo controlado” (ou “keyhole”), é grande a penetração, sendo mais adiante estudado esse procedimento;
- A velocidade de soldagem pode ser muito elevada;
- Através de “keyhole”(furo controlado), há possibilidade de soldar peças relativamente espessas, em um único passe com chanfro reto (sem metal de adição);
- O comprimento do arco exerce pequeno efeito sobre a tensão;
- Como o eletrodo permanece retraído, é pequena a possibilidade de ocorrer inclusão do mesmo no metal de solda, ou o metal de adição tocá-lo.

Tabela 9.1 - Densidades Típicas de Potência para Diversos Processos de Soldagem.

Processo	Densidade Típica de Potência (W/mm ²)
TIG	100
MIG	550
Plasma	1000
Feixe de Elétrons	40.000
LASER	100.000

Outrossim, a densidade de potência de um processo é modernamente aceito como um importante aspecto do seu grau evolutivo. A **Tab. 9.1** compara alguns processos de última geração, com relação a essa característica. Analisando estes dados, conclui-se que o Plasma se encontra numa situação privilegiada entre os processos ditos convencionais.

EQUIPAMENTO E CARACTERÍSTICAS

O Plasma opera com uma fonte de curva característica corrente constante (“tombante”), quase que exclusivamente em CCEN. A exceção ocorre na soldagem do alumínio, magnésio e suas ligas, em que CCEP ou CA balanceada é utilizada, além de corrente pulsada, já que há formação de uma camada de óxido refratário sobre a poça de fusão, a qual impede a manutenção do arco.

Essencialmente, então, a fonte produz corrente contínua - normalmente um transformador/retificador - com tensão de circuito aberto entre 65 e 80 V, sendo que a **Fig. 9.2** ilustra detalhes de uma tocha do tipo arco transferido. No Plasma o início do arco não pode ser realizado como no TIG. Devido ao fato do eletrodo estar no interior do bocal, é necessário um “arco piloto” de baixa corrente entre o bocal e o mesmo. Em tochas que traba-

ham com reduzida corrente, esse arco piloto pode ser iniciado avançando o eletrodo até o mesmo tocar o bocal, retraíndo-o à seguir e estabelecendo o arco. Com tochas que operam em alta corrente, o arco piloto pode ser estabelecido através de alta frequência CA, ou por pulsos de alta tensão e baixa corrente. Entretanto, sob certas condições, e em particular quando um gás com alto potencial de ionização é utilizado - hélio, ou argônio+hidrogênio, por exemplo - pode ser difícil o início do arco, mesmo com alta frequência. Uma solução para este problema, é o emprego de alta tensão de circuito aberto (até 120 V), a qual pode ser obtida pela conversão de uma fonte TIG, ou duas fontes conectadas em série. Isso deve ser feito com extremo cuidado, pois choques podem ser fatais quando são empregados tais nível de tensão na soldagem.

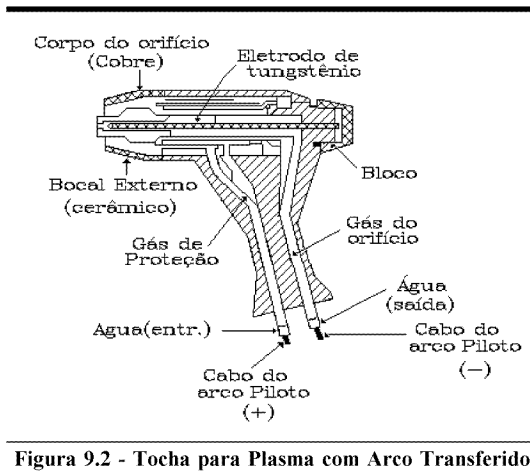


Figura 9.2 - Tocha para Plasma com Arco Transferido.

O processo é empregado com intervalo normal de corrente se situando entre 0,1 A (micro-plasma) e 400 A, com tensões de 25 a 35 V - altas quando comparado com o TIG. A vazão do gás de orifício se encontra entre 0,5 e 15 l/min, enquanto a do gás de proteção entre 10 e 30 l/min.

MODOS DE SOLDAGEM E VARIÁVEIS DE CONTROLE

Uma interessante característica do Plasma, é a possibilidade do mesmo soldar em dois modos bastantes distintos. No primeiro, convencional e similar ao TIG, o arco funde o metal base com relativamente pequena penetração, sendo utilizado, ou não, metal de adição. No método do “furo controlado” (“keyhole”), a vazão do gás de orifício é aumentada, forçando o plasma a passar através da poça de fusão formada. Conforme a tocha se desloca, as forças devidas à tensão superficial obrigam o metal líquido a preencher o furo existente atrás do arco realizando, assim, uma solda com penetração completa, como mostrado na Fig. 9.3. Para poder ser controlado, o “keyhole” é praticado por método automático, já que sua eficácia depende, além da vazão do gás de orifício, da corrente e velocidade (constante) de soldagem. Esses três fatores são, então, as chamadas variáveis primárias de controle, com os seguintes principais efeitos sobre a soldagem:

▪ Vazão do gás de orifício

É diretamente proporcional à penetração e ao acabamento do cordão. Uma vazão insuficiente leva à formação de corcovas na superfície da solda e pode ocasionar falta de penetração completa, enquanto excesso da mesma ocasiona o cor-

te do material base, pois expulsa o metal fundido.

▪ Corrente de Soldagem

Com relação à penetração e acabamento do cordão, a intensidade de corrente tem efeitos similares à vazão de gás. Uma corrente excessiva causa distúrbios na poça de fusão; pode cortar o metal base e reduzir a vida útil do orifício de restrição. Por sua vez, essa vida útil depende da tensão de soldagem; vazão do gás e dimensões do bocal. Após uma certa intensidade de corrente ser alcançada, o gás de orifício perde o envoltório relativamente frio, citado na introdução e, dessa forma, há intenso e insuportável aquecimento nessa região. Por outro lado, o excesso de corrente provoca o aparecimento de arco duplo, com o mesmo se formando entre o eletrodo e o bocal e, então, desse para a peça. A Tab. 9.2 apresenta intervalos típicos de corrente para diferentes diâmetros de eletrodos.

Tabela 9.2 - Intervalos Típicos de Corrente para o Plasma, em Função do Diâmetro do Eletrodo*

Diâmetro (mm)	Corrente** (A)	Diâmetro (mm)	Corrente** (A)
0,3	Até 15	2,4	150 à 250
0,5	5 à 20	3,2	250 à 400
1,0	15 à 80	4,0	400 à 500
1,6	70 à 150		

Notas:* Eletrodos EWP, EWTh-1/2/3. ** Corrente Contínua Eletrodo Negativo (CCEN).

▪ Velocidade de Soldagem

Velocidade muito baixa, como em todos os processos de soldagem, resulta em excesso de energia por unidade de comprimento do cordão, com possível deterioração das propriedades mecânicas da junta e instabilização da poça de fusão em “keyhole”. O excesso de velocidade pode resultar em falta de penetração e mordedura.

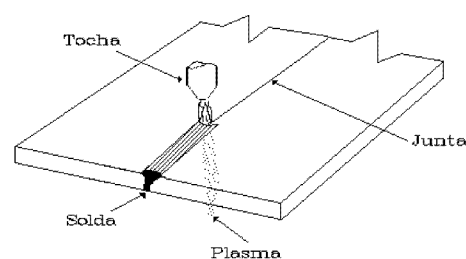


Figura 9.3 - Modo “keyhole” de Soldagem por Plasma.

A soldagem Plasma depende, ainda, das seguintes variáveis secundárias de controle, sendo aquelas que são função da tocha mostradas na **Fig. 9.4**:

▪ Diâmetro do Orifício

Com as outras condições constantes, quanto menor o diâmetro do orifício, maior a densidade de corrente, com conseqüente aumento da penetração. Portanto, é conveniente trabalhar com o menor diâmetro, o que é limitado pela formação de duplo arco. Entretanto, se esse diâmetro sofrer aumento e for tentada a manutenção da densidade de corrente, através da elevação da intensidade de corrente, um muito mais largo cordão é produzido, bem como excessivo reforço na raiz. Portanto, deve existir uma certa proporção entre o diâmetro do orifício, corrente e vazão do gás, sendo apresentadas sugestões na **Tab. 9.3**.

Tabela 9.3 - Relações Típicas entre Diâmetro do Orifício, Intensidade de Corrente e Vazão do Gás na Soldagem Plasma

Diâmetro do Orifício (mm)	Corrente (A)	Vazão do Gás (l/min)
0,8	1 à 25	0,24
1,3	20 à 55	0,47
2,2	40 à 100	0,71
2,4	100 à 250	2,83
3,2	250 à 350	2,83

▪ Distância do bocal à peça

A temperatura do plasma decresce com a distância do orifício, sendo que se essa for excessiva, pode ocorrer mordedura; falta de fusão; ou penetração irregular. Ao contrário, caso essa distância seja muito pequena, a poça de fusão poderá sofrer instabilização devido a alta temperatura. Entretanto, comparando com o TIG, a tensão do Plasma é muito pouco sensível à variação dessa distância, sendo tipicamente de 5 a 8 mm.

▪ Configuração do Orifício de Constrição

O orifício pode possuir geometria cilíndrica, como mostrado, ou ser do tipo divergente, da forma ilustrada na **Fig. 9.5**. Nesse caso, é possível operar com maiores correntes, ocorrendo aumento na temperatura do plasma, com conseqüente maior penetração. Emprega-se, também, múltiplos orifícios, como mostrado na **Fig. 9.6**, em que parte do plasma passa através dos mesmos. Geralmente cada orifício menor possui 1/4 da área do prin-

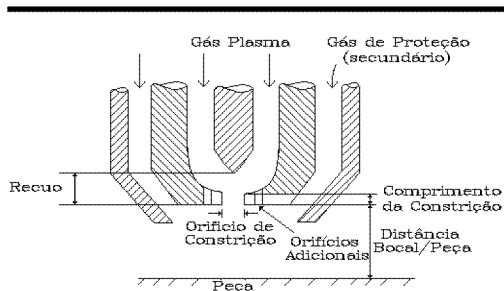


Figura 9.4 - Tocha Plasma, Mostrando Algumas Variáveis Secundárias de Controle para Soldagem.

cipal. O efeito produzido por esses orifícios adicionais, é alterar a forma circular do arco, para uma oval alongada, permitindo soldar com maior velocidade e resultando numa menor ZAC.

▪ Eletrodo

Na **Tab. 9.2** foram apresentados os intervalos típicos de corrente para uso com cada diâmetro de eletrodo. Outros importantes aspectos, são a geometria e a distância da ponta do eletrodo no final do bocal (“recuo”), além da centralização do mesmo. O recuo determina parcialmente o grau de constricção e a rigidez do jato de plasma. Num orifício do tipo cilíndrico, a ponta do eletrodo deve permanecer no início, ou levemente (0,5 mm) acima do mesmo. Já no orifício divergente, o eletrodo permanece no seu interior (cerca de 0,5 mm),

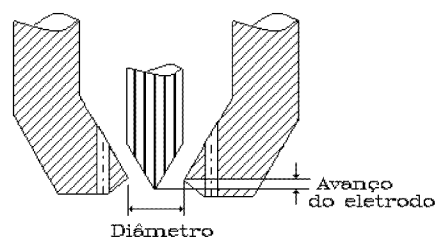


Figura 9.5 - Orifício de Constrição do Tipo Divergente.

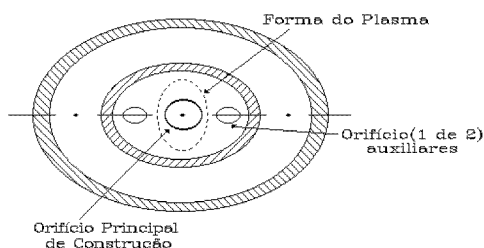


Figura 9.6 - Múltiplos Orifícios de Constrição.

causando expansão do jato de plasma. Caso a ponta seja posicionada acima do orifício, o eletrodo é destruído rapidamente.

A correta centralização do eletrodo no orifício é muito importante, pois caso contrário podem ocorrer os seguintes problemas: (a) Destruição prematura do bocal pelo arco piloto, devido ao mesmo se formar em um ponto preferencial; (b) Jato de plasma distorcido, causando mordedura na solda. Por outro lado, a geometria da ponta do eletrodo pouco influi na solda, quando é utilizada uma alta vazão de gás. Num eletrodo com ponta cônica e à menores vazões de gás, conforme o ângulo de vértice aumenta de 30° para 90°, há redução da penetração, além da superfície do cordão se apresentar grosseira. Os fabricantes dos equipamentos apresentam diferentes sugestões sobre a geometria da ponta, sendo mais utilizadas as seguintes: (a) Tronco de cone, com ângulo do vértice de 40° e diâmetro da parte truncada em torno 0,2 mm; (b) Cone com ângulo do vértice de 60°; (c) Tronco de cone, com ângulo do vértice de 60° e diâmetro da parte truncada de aproximadamente 0,8 mm. Com cone completo, o ângulo agudo facilita o início do arco, enquanto que o trunco permite melhor regulação da centralização e recuo.

▪ Gases

Os gases de orifício e proteção utilizados em Plasma, devem satisfazer às seguintes questões fundamentais: (a) O gás de orifício não reagir com o eletrodo; (b) “Compatibilidade” dos gases com os metal base; (c) O gás de orifício possuir baixo potencial de ionização.

Para soldagem com alta intensidade de corrente, geralmente se emprega o mesmo gás para o orifício e proteção, pois caso contrário a coluna pode ser heterogênea em suas propriedades. O argônio é o gás mais utilizado, principalmente em aços ao carbono e baixa liga, além de nos metais reativos, como titânio e zircônio.

Como visto em TIG, a adição de hélio ao argônio produz um arco mais quente, com conse-

qüente ganho na velocidade de soldagem. Entretanto, a ação desse gás somente é notável, quando sua proporção é maior do que 50%, sendo que acima de 75% a mistura se comporta como hélio puro. No titânio, entre 50 e 75% de hélio no argônio permite “keyhole” em alta velocidade e previne a formação de raiz côncava no cordão, o que pode ser provocado pelo argônio. O emprego do hélio puro não é usual, porque aumenta sensivelmente a quantidade de calor na tocha, reduzindo sua vida útil e a capacidade de conduzir corrente. Além disso, como o hélio tem menor densidade que o argônio, é difícil obter “keyhole” com uma baixa vazão.

O hidrogênio, quando adicionado ao argônio, também produz um arco mais quente, com maior velocidade de soldagem, devido a ser um gás molecular. Esse gás não deve ser utilizado no orifício na soldagem de aços ao carbono e alta resistência, nem nos metais altamente reativos como titânio e zircônio, pois pode causar trinca, porosidade e fragilização, sendo adicionado ao argônio entre 5 e 15% sobre aços inoxidáveis austeníticos e ligas de níquel e níquel-cobre. Caso o uso do hidrogênio seja somente no gás de proteção, o mesmo pode fazer parte da mistura em até 5%.

Como o gás de proteção não tem contato com o eletrodo, para certas aplicações é admissível o uso do dióxido de carbono, com as possíveis implicações sobre a tenacidade do metal de solda discutidas no Capítulo 8 (MIG).

As vazões dos gases de orifício e proteção dependem, fundamentalmente, do modo de soldagem; intensidade de corrente; tipo do gás de proteção e material base. A vazão crítica é a do orifício e, de uma forma bastante aproximada, a mesma (em l/min) pode ser tomada como o valor absoluto da espessura da junta (em mm) mais um, regra esta aplicável para “keyhole”.

Um parâmetro de soldagem não analisado aqui foi a tensão. Na realidade, a mesma é conseqüência da distância do bocal à peça; do recuo; da corrente, e da vazão e tipo do gás de proteção.

CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS

TÉCNICAS E VARIANTES

A técnica de soldagem por Plasma é similar à do TIG, quando o modo é convencional, com ou sem material de adição. Geralmente esse modo de soldagem é realizado manualmente, com intensidades de corrente de até 100 A, sendo que a abertura de raiz e junta mal alinhada são menos críticos no Plasma, porque o arco é mais rígido e menos sensível a alteração na tensão. Entretanto, o “keyhole” exige uma muito grande habilidade do soldador para ser efetuado manualmente. Dessa forma, a não ser em casos especiais, este modo de soldagem é sempre efetuado automaticamente.

As posições de soldagem em que o Plasma opera são: (a) Todas, se o comando for manual; (b) Plana e horizontal, se realizado automaticamente.

Na soldagem pelo modo convencional, o ângulo de deslocamento da tocha, na operação manual, é cerca de 30° negativos com a vertical, ou seja, o jato de plasma aponta para a direção de soldagem. Em operação automática, este ângulo passa a ser cerca de 15°.

Utilizando o modo “keyhole”, a tocha se desloca com ângulo de 90° (normal à superfície). Com o Plasma nesse modo de soldagem, deve-se tomar especial precaução com relação ao defeito trinca de solidificação, devido à grande razão entre a altura e a largura do cordão.

Como indicado na Introdução desse capítulo, a corrente pulsada também é utilizada no Plasma, com vantagens similares ao TIG, bem como aimentação automática de arame “quente”, ou “frio”.

Uma interessante aplicação, é a soldagem “Microplasma” sobre peças finas e de grande precisão. Geralmente a operação ocorre com arco transferido e modo convencional, em correntes menores do que 100 A, podendo ser tão pequena quanto 0,1 A. Além das vantagens gerais já citadas para o Plasma sobre o TIG, o Microplasma oferece muito maior estabilidade em baixíssimas correntes, com conseqüente precisão, além de mais alta qualidade da solda e tocha com pouco peso, minimizando o desconforto do soldador.

Outra importante variante deste processo é o “Plasma-MIG”, o qual é mostrado, em uma de suas possíveis configurações, na Fig. 9.7. Nesse caso, a polaridade positiva do eletrodo, permite que o metal do arame seja transferido em paralelo ao plasma, no modo rotacional. Algumas das vantagens desse processo, quando comparado com o

MIG convencional são:

- Possibilidade de soldar com grande ou pequena penetração, mantendo maior taxa de deposição;
- Melhor estabilidade, repetibilidade e controle do modo de transferência;
- Mínima produção de salpicos;
- Soldagem em alta velocidade de chapas (folhas) muito finas;
- Melhor desempenho na aplicação de revestimento protetores.

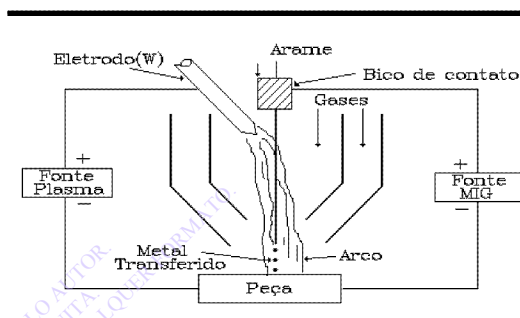


Figura 9.7 - Plasma MIG.

PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

Esse processo tanto pode operar de maneira similar ao TIG, com ou sem metal de adição, quanto utilizando a técnica do furo controlado (“keyhole”).

Quando é realizada adição de metal, as precauções de ajuste da junta e outras são as mesmas explanadas par o TIG, mas com as seguintes tolerâncias gerais:

- Corrente: ± 10 A;
- Velocidade de Soldagem: $\pm 0,2$ mm/s;
- Vazão do Gás de Orifício: $\pm 0,24$ l/min;
- Vazão do Gás de Proteção: $\pm 2,4$ l/min;
- Distância do bocal à peça: 3 a 10 mm.

Entretanto, sem metal de adição, no passe de raiz ou solda completa, o furo controlado requer preciso ajuste entre as chapas que serão soldadas e são críticas as tolerâncias abaixo:

- Corrente: ± 5 A;
- Velocidade de Soldagem: $\pm 0,05$ mm/s;
- Vazão de Gás de Orifício: $\pm 0,12$ l/min;
- Vazão do Gás de Proteção: $\pm 2,4$ l/min;
- Distância do bocal à peça: $\pm 1,6$ mm.

Diferentemente dos outros processos até aqui

analisados e dependendo do equipamento disponível, o Plasma pode operar realizando o passe de raiz pelo método do furo controlado e, após, se completar o enchimento da junta com adição de metal, no caso da espessura da peça ser maior do que cerca de 6 mm. Até essa espessura, a solda pode geralmente ser realizada sem chanfro e somente pelo furo controlado. Entretanto, em função do tipo de material - principalmente se o mesmo possui altas viscosidade e tensão superficial, com baixa densidade - a solda por "keyhole" pode ser efetuada sobre peças tão espessas quanto 25 mm.

Outrossim, para chapas finas é possível realizar a solda dobrando as bordas das mesmas, com

a altura do chanfro dependendo da espessura. Essa altura se encontra entre 0,25 a 0,50 mm e 0,75 a 1,0 mm para chapas com 0,05 mm e 0,25 mm de espessura, respectivamente.

Chapas com espessuras entre 0,25 e 1,5 mm são geralmente soldadas sem chanfro, pelo método convencional.

Outrossim, a **Tab. 9.4** apresenta algumas sugestões de procedimentos para diferentes materiais. Como mencionado quando do estudo de outros processos, as informações contidas nessa tabela devem ser consideradas como guia geral e testes devem, sempre, antecipar a soldagem final.

Tabela 9.4 - Condições Típicas de Soldagem por Plasma para Diversos Materiais (Juntas à Topo)*

Material	Espes- sura (mm)	Vazão (l/min) e Tipo do Gás de**		Diâmetro do Orifício (mm)	Distância Orifício/Peça (mm)	Junta†	Velocidade de Soldagem (mm/s)	Corrente (A) (CCEN)	Tensão (V)
		Orifício	Proteção						
Aço ao Carbono	3,2	6-a	28-a	2,8	1,2	f	5	185	28
Aço 4130	4,3	6-a	28-a	3,4	1,2	f	4	200	29
Aço D6AC	6,4	7-a	28-a	3,4	1,2	f(h)	6	275	33
Aço Inoxidável	2,3	3-b	17-b	2,8	4,8	f	10	115	30
	3,2	5-b	17-b	2,8	4,8	f	13	145	32
	4,8	6-b	21-b	3,4	4,8	f	7	165	36
	6,4	8-b	24-b	3,4	4,8	f	6	240	38
Ligas de Titânio	3,2	3,8-b	28-a	2,8	4,8	f	8,5	185	21
	4,8	9-a	28-a	3,4	4,8	f	5,5	175	25
	9,9	15-c	28-c	3,4	4,8	f	4,2	225	38
	12,7	13-d	28-d	3,4	4,8	f	4,2	270	36
Cobre	2,4	5-a	28-a	2,8	4,8	f	4,2	180	28
	3,2	3,8-e	28-e	2,8	4,8	g	4,2	300	33
	6,3	2,3-e	28-e	3,4	4,8	g	8,5	670	46
Latão (70%Cu- 30%Zn)	2,0	3,8-a	28-a	2,8	4,8	f	8,5	140	25
	3,2	5-a	28-a	2,8	4,8	f	6,4	200	27
Níquel	3,2	4,7-b	18,9b	2,8	4,8	f	11,5	200	30
	6,3	7,10-b	18,9-b	3,4	4,8	f	5,9	250	30

Notas: * Gás para purga na raiz utilizado em todas as soldas. ** Tipos dos Gases: (a) 100% Argônio; (b) 95% Argônio + 5% H₂; (c) 75% He + 25% Ar; (d) 50% He + 50% Ar; (e) 100% Hélio. † (f) Chanfro Reto, soldagem pelo método do "furo controlado" ("keyhole"); (g) Chanfro em "V"-60°, altura do nariz de 5 mm e soldagem pelo método "convencional" ("melt-in"); (h) Pré-aquecimento de 315°C e pós-aquecimento de 395°C por 1 hora.

**C
A
P
Í
T
U
L
O

10**

**SOLDAGEM POR
ELETROESCÓRIA E
ELETROGÁS**

INTRODUÇÃO	230
ELETROESCÓRIA	232
Princípios de Operação	232
Consumíveis	234
Operação e Variáveis do Processo	236
Procedimentos de Soldagem	239
ELETROGÁS	240
DESCONTINUIDADES	241

INTRODUÇÃO

Devido às suas características, é possível que a **Eletroescória** tenha sido originada por acaso, quando um soldador acidentalmente colocou uma excessiva camada de fluxo no Arco Submerso.

Nesse processo, o metal de solda é obtido pelo calor gerado na passagem de corrente elétrica através da escória líquida, no seu percurso entre um eletrodo consumível (arame maciço ou tubular) e a peça. Conforme se observa na **Fig. 10.1**, o eletrodo é continuamente alimentado para o interior da poça de escória fundida. A resistência elétrica da mesma gera o calor necessário para fundir progressivamente o eletrodo e parte do metal base formando, assim, uma poça de fusão. O conjunto é suportado nas laterais por sapatas (geralmente de cobre) refrigeradas por água e o avanço na junta é vertical-ascendente. Na realidade, apesar do eixo da junta ser vertical, a posição de soldagem é plana, somente o deslocamento se realizando naquela direção.

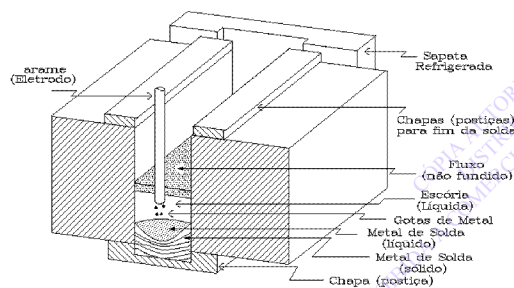


Figura 10.1 - Seção Transversal da Poça de Fusão na Soldagem por Eletroescória.

A soldagem inicia pela formação de um arco elétrico entre o arame e uma chapa postíça, a qual se encontra num nível inferior à base da junta. Este arco funde grande parte do fluxo, que fora colocado no início da operação, formando escória líquida. É adicionado mais fluxo e nesse momento o arco é extinto, com a escória condutora sendo mantida líquida devido ao calor gerado pela sua resistência à passagem da corrente elétrica. Note-se que é muito importante a existência dessa chapa para início do arco, pois quando o mesmo se extingue o metal líquido contém inclusões de escória. Outrossim, o final da solda deve ser realizado acima do nível superior da junta, porque normalmente não se conhece com exatidão a extensão da poça de fusão, além da grande massa de metal líquido apresentar expressiva contração ao solidificar, podendo ocorrer falta de material (“rechupe”).

Por sua vez, o **Eletrogás** provavelmente foi desenvolvido à partir da Eletroescória e é uma variante do processo a Arco com Proteção por Gás e Eletrodo Consumível (“MIG/MAG”). Apesar dos processos em questão possuírem certas similaridades, os mesmos diferem nas características elétricas, com a **Fig. 10.2** ilustrando esquematicamente o sistema. Quando for empregado arame tubular, existirá uma pequena camada de escória líquida sobrenadando o banho. O processo inicia pela formação de um arco elétrico entre o eletrodo consumível (maciço ou tubular) e a chapa postíça de início do arco, sob um gás de proteção (usualmente CO_2 + argônio) ou sem gás algum e eletrodo tubular auto-protegido. Esse arco se mantém durante todo o desenrolar da operação e é o responsável pela formação da poça de fusão. De maneira idêntica à Eletroescória, a solda deve findar numa chapa postíça.

Portanto, a Eletroescória é um processo no qual existe um arco elétrico somente no início de sua operação, sendo a solda efetivamente realizada pelo calor gerado na resistência elétrica oferecida pela escória líquida, em CA ou CCEP. Por sua vez, o Eletrogás é um processo de soldagem ao arco elétrico (durante toda sua operação), utilizando essencialmente CCEP.

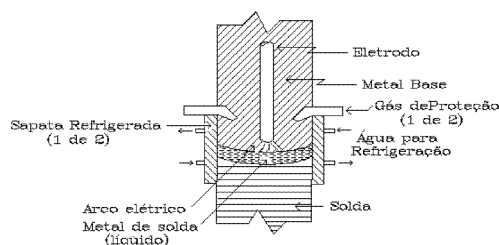


Figura 10.2 Seção Transversal da Poça de Fusão no Eletrogás.

Além desses processos serem os mais rápidos para diversas aplicações em juntas na posição vertical, a seguir se encontram outras razões que suportam a seleção dos mesmos para certas situações:

- É mínima a exigência de preparação da junta;
- O fator de operação é praticamente 100%;
- É pouco, ou nenhum, o equipamento móvel;
- Ocorre pequena distorção da junta;
- A soldagem é relativamente fácil e requer

pouco treino do operador;

- Geralmente, é reduzida a limpeza necessária após a solda ter sido realizada.

A fonte de energia para ambos os processos pode ser idêntica e usualmente consiste num transformador/retificador, com curva característica tensão constante, devido à conveniência do sistema de “auto-ajustagem” do arco (para o eletrogás). Fontes com curva característica corrente constante também podem ser utilizadas, mas necessitam de um sistema “tensão-sensitivo”. Transformadores (para Eletroescória) e geradores também podem ser empregados, mas seu emprego não é freqüente, principalmente esse último.

Como conseqüência da solicitação de corrente ser alta e por tempo prolongado, fontes que forne-

çam mais do que 750 A à 100% do ciclo de trabalho são requeridas, com tensão de circuito aberto mínima de 60 V.

Por outro lado, os dois processos podem utilizar vários eletrodos operando simultaneamente e/ou sistemas de oscilação dos mesmos. Isso faz com que a Eletroescória proporcione a maior taxa de deposição, entre todos os processos de soldagem convencional - de 25 a 50% maior do que o Arco Submerso. Entretanto, esses processos não são geralmente convenientes para soldar estruturas complexas; com juntas muito curtas ou intermitentes, nem naquelas em que é difícil o posicionamento das mesmas. A Fig. 10.3 apresenta exemplos de juntas geralmente utilizadas, sendo delimitada a região do metal de solda, com o ponto indicando a posição do eletrodo.

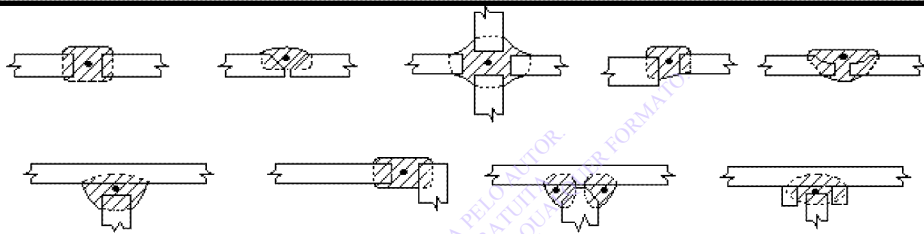


Figura 10.3 - Juntas Típicas Utilizadas na Eletroescória e Eletrogás e Região do Metal de Solda.

A Eletroescória pode ser empregada para soldar aços baixo e médio carbono; ferros e aços fundidos; alguns tipos de aços estruturais de alta resistência mecânica; aços ligados; aços inoxidáveis; ligas de níquel e são conhecidos casos da mesma ser realizada sobre titânio e suas ligas. O principal campo de aplicação desse processo são chapas espessas; peças forjadas ou fundidas; cilindros; anéis; bases de máquinas e outras estruturas de porte. Geralmente, o mesmo é mais econômico em espessuras acima de 30 mm, apesar de existir exemplos de aplicação em espessura tão fina quanto 10 mm. Como é (inerentemente) muito grande a energia de soldagem, este fator deve ser seriamente considerado quando da seleção do processo, pois as propriedades mecânicas da Zona Afetada pelo Calor (ZAC) e do metal de solda podem não alcançar os níveis desejados.

Os materiais geralmente soldados pelo Eletrogás são similares àqueles da Eletroescória. Note-se, entretanto, que a energia de soldagem é tipicamente menor para o Eletrogás, com maior taxa de resfriamento. Como conseqüência, em algumas aplicações as propriedades mecânicas da junta podem ser superiores - notavelmente a tenacidade. O Eletrogás se mostra mais econômico em es-

pesuras entre 10 mm e 80 mm, apesar de juntas com até 100 mm já terem sido soldadas com sucesso.

Uma comparação sumária entre os dois processos considerados demonstra que:

- A troca de um processo para outro não é complicada, pois o equipamento básico e alguns acessórios são similares;
- A solda de espessuras menores do que 10 mm, é geralmente mais econômica se realizada por outros processos;
- Para espessuras superiores a 80 mm, é geralmente mais prática a soldagem por Eletroescória, já que o Eletrogás pode apresentar deficiência na proteção por gás da poça de fusão;
- Entre espessuras de 20 mm à 80 mm, os dois processos são competitivos e os seguintes fatores devem ser considerados:
 - A Eletroescória geralmente produz soldas com menor tendência à trincas e deformação;
 - No Eletrogás o aumento da porosidade é proporcional à espessura da junta;
 - O reinício de uma solda é muito mais facilmente obtido no Eletrogás;

▪ Com Eletrogás, são geralmente superiores as propriedades mecânicas da ZAC e metal de solda, notavelmente a tenacidade.

A descrição detalhada dos consumíveis para esses dois processos de soldagem, se encontra no livro dessa série “Sistemas de Especificação dos Consumíveis para Soldagem e Brasagem”, ou nas Normas/Códigos pertinentes, as quais sempre devem ser consultadas. As especificações AWS A5.25 e A5.26 se referem aos consumíveis para aços ao carbono e baixa liga com alta resistência mecânica, utilizados nos processos por Eletroescória e Eletrogás, respectivamente.

De forma resumida, a simbolização para Eletroescória é dada por:

AWS FESUX-EYYYYY-EW

onde o primeiro bloco (FESUX) especifica o fluxo da seguinte forma: (a) FES, designa fluxo para Eletroescória; (b) U, indica a resistência mínima à tração do metal de solda em incrementos de 10.000 psi (69 MPa), quando esse fluxo é utilizado com um específico eletrodo e sob determinadas condições de soldagem; (c) X, indica a mínima resistência ao impacto do metal de solda depositado com esse fluxo e com um dado eletrodo, a uma dada temperatura. O segundo bloco (EYYYYY) especifica o eletrodo, sendo: (a) E, designa um eletrodo; (b) YYYYYY, podendo ser composto por três a cinco dígitos, designa a composição química do eletrodo, quando esse for maciço, ou do metal de solda depositado, quando o mesmo for tubular. O último bloco designa eletrodo maciço, com sua omissão indicando eletrodo tubular.

Por exemplo, FES70-EM12K-EW especifica: (a) Um fluxo que deve depositar um metal de solda com resistência à tração entre 490 e 650 MPa; limite de escoamento mínimo de 350 MPa; alongamento mínimo de 22% e resistência ao impacto mínima de 20 J à -18 oC (o sistema SI também é padrão nessa especificação), quando a soldagem for realizada sob condições especificadas sobre aços ASTM A242, ou A441, ou A572 Gr.50, ou A588; (b) Um arame maciço, com a composição química dada na especificação em pauta.

Para o Eletrogás, é empregada a seguinte simbologia:

AWS EGXYTU para eletrodo tubular;
ou **AWS EGXYS-UU** para eletrodo maciço

onde: (a) EG, designa eletrodo para soldagem por Eletrogás; (b) X, indica a resistência à tração mínima do metal de solda, depositado sob condições específicas; (c) Y, a resistência ao impacto mínima do metal de solda a uma dada temperatura; (d) T, para eletrodo tubular, ou S para eletrodo maciço; (e) U, sendo um dígito após T (eletrodo tubular), indica a composição química do metal de solda depositado; ou até 2 dígitos após S (eletrodo maciço), indica a composição química do eletrodo.

Por exemplo, EG70T4 especifica um metal de solda que deve apresentar resistência à tração entre 490 e 650 MPa; limite de escoamento mínimo de 350 MPa; alongamento mínimo de 22% e resistência ao impacto mínima de 27J a -18 oC (o SI também é padrão nessa especificação), quando a soldagem for realizada sobre aços idênticos aos acima mencionados para Eletroescória.

ELETROESCÓRIA

PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO

O processo inicia através de um arco elétrico formado entre o eletrodo e a base da junta, sob uma camada de fluxo. Geralmente se coloca palha de aço entre a ponta do arame e o metal base, para que seja assegurado um perfeito início de arco. Tão logo o mesmo sofre ignição, se adiciona o restante do fluxo. Em poucos segundos, há suficiente escória líquida, de forma que o arco se extingue e a solda é realizada por resistência elétrica, como descrito no item precedente. Dependendo da extensão da junta, pode ser necessária a adição de

mais fluxo durante a operação, sendo benéfica a existência de uma fina camada do mesmo, não fundido, flutuando sobre a escória líquida.

Para um melhor entendimento do processo, é interessante saber que os diversos componentes do sistema consomem o calor gerado na seguinte proporção aproximada:

- Fusão do eletrodo: 23,6%;
- Irradiação pela poça de fusão da escória: 1,3%;
- Perdas gerais por irradiação: 1,2%;
- Perdas para as sapatas de refrigeração: 5,2%;
- Superaquecimento do metal fundido: 10,5%;

▪ Fusão do metal base e retirado pela massa da peça (maior parte): 58,2%. Desse total, é extraído da poça de fusão do metal pelas sapatas de refrigeração 10,4%, sendo 5,6% desse valor consumido pelo contato das paredes da peça com as mesmas.

O fato da massa do metal base absorver a maior parte do calor gerado (e não o metal de solda) denota que esse não é um processo de alta densidade de energia, sendo a mesma muito menor, inclusive, do que no Arco Submerso. Entretanto, o consumo total de eletricidade é menor, pois a junta da Eletroescória requer menos metal de adição.

Outrossim, esse processo possui duas distintas técnicas para operar, as quais são:

□ Sistema Convencional

Um ou mais eletrodos são alimentados, guiados por tubos guias, os quais não entram em contato com a poça de fusão, conforme mostrado na **Fig. 10.4**. O número de eletrodos, ou opção por oscilação dos mesmos, depende da espessura da junta. Os tubos guias são mantidos logo acima do fluxo fundido, tipicamente entre 50 mm e 80 mm. Para manter constante a distância estabelecida, o conjunto se move para cima, numa uma velocidade compatível com a taxa de fusão. Esse deslocamento pode ser efetuado manualmente mas, em geral, é automático e comandado pelo sinal de uma célula fotoelétrica focada na superfície da poça de fusão. Dependendo do comprimento (altura) da junta, as sapatas de refrigeração serão fixas, ou acompanharão o movimento do eletrodo. Note-se, que até a perfeita estabilização da soldagem, é possível ser requerido ajustes manuais, tanto da velocidade de deslocamento, quanto dos parâmetros.

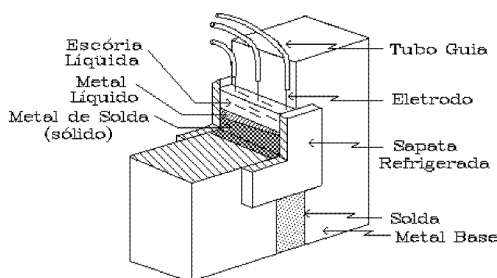


Figura 10.4 - Soldagem por Eletroescória com Múltiplos Eletrodos e Tubo Guia Não Consumível.

Geralmente o processo pode ser empregado em juntas com até 500 mm de espessura, não sendo prática a oscilação de um número de eletro-

dos maior do que três. Soldando sem oscilação, a máxima espessura do metal base depende do número de eletrodos utilizados, ou seja:

- Até 60 mm para um eletrodo;
- Entre 60 mm e 130 mm para dois eletrodos;
- Entre 110 mm e 200 mm para três eletrodos.

Com a oscilação do eletrodo, essa espessura é modificada para:

- Até 150 mm para um eletrodo;
- Até 350 mm para dois eletrodos;
- Até 600 mm para três eletrodos.

Outrossim, é preferível soldar espessuras entre 70 e 150 mm com dois eletrodos, utilizando oscilação somente quando ela for superior a 90 mm.

A taxa de deposição varia entre 12 e 25 kg/h, com eficiência muito próxima de 100% e típica razão entre metal de solda depositado e fluxo utilizado em torno de 20, podendo alcançar até 80 em chapas muito espessas.

O tubo guia não consumível é geralmente fabricado com liga cobre-berílio, pois a mesma mantém alta resistência mecânica em elevada temperatura, sendo envolto por fita ou revestimento isolante, para evitar curto circuito com as paredes da junta. O tubo usualmente possui diâmetro externo máximo de 13 mm e, como também tem função de bico de contato elétrico, seu diâmetro interno depende da bitola do arame utilizado.

□ Sistema com Guia Consumível

Nesse método, o arame é guiado por um condutor consumível, cujo comprimento geralmente é igual ao da junta, conforme ilustrado na **Fig. 10.5** para um sistema que permite oscilação. Esse guia consiste em chapas; anéis, ou (mais geralmente) tubos, como apresentado na **Fig. 10.6**, sendo o sistema estático, ou seja, a junta é preenchida na mesma taxa com que ocorre a fusão do arame e do guia, não existindo nenhum mecanismo elevador do conjunto.

O restante do equipamento é idêntico ao convencional, com o guia necessitando ser isolado eletricamente, para prevenir curto circuito com as faces da junta, o que geralmente é feito através de um revestimento composto pelo próprio fluxo utilizado. Dependendo do tipo de guia empregado, a massa do mesmo participa com 5 a 25% do total do metal de solda depositado. Por exemplo, com um guia do tipo da **Fig. 10.6(c)**, sua massa é, no mínimo, 20% do metal de solda, sendo de 5 a

10%, caso seja utilizado um tubo.

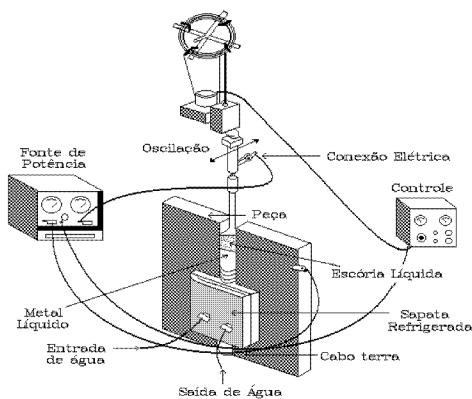


Figura 10.5 - Soldagem por Eletroescória com Tubo Guia Consumível e Oscilação do Eletrodo.

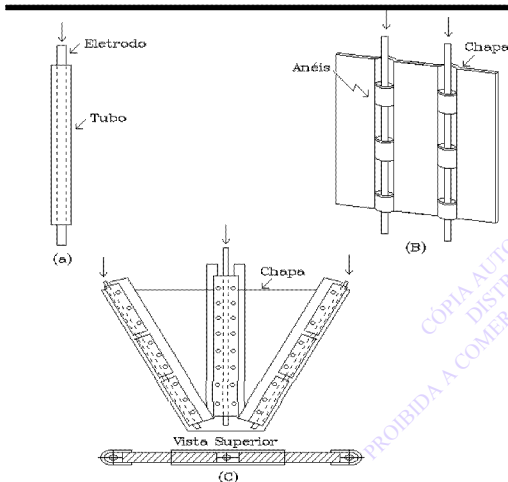


Figura 10.6 - Alguns Tipos de Guias Consumíveis para o Eletrodo na Soldagem por Eletroescória.

Como no método anterior, um ou mais eletrodos podem ser empregados, bem como oscilados horizontalmente na junta, com as sapatilhas fixas em toda a extensão da mesma, ou utilizando múltiplas sapatilhas, alternando-as conforme a solda avança.

A soldagem é desenvolvida como no sistema convencional, com a tensão em média 10 V menor. A ponta do guia é posicionada cerca de 35 mm acima da chapa de início do arco, logo se incorporando ao metal de solda, com a elevação da poça de fusão.

Sem oscilação, é possível soldar com um eletrodo juntas de até 70 mm de espessura. Utilizando múltiplos eletrodos guiados, a máxima espessura (e) soldada pode ser:

$$e = 70n - 30 \text{ (mm)} \quad [10.1]$$

onde “n” é o número de eletrodos.

A oscilação do eletrodo permite a soldagem das seguintes espessuras, nesse caso:

- Até 130 mm com um eletrodo;
- Até 300 mm com dois eletrodos;
- Até 450 mm com três eletrodos.

Em ambos os métodos acima descritos, a água circulante nas sapatilhas de cobre deve extrair calor na razão média de 37 kJ/h. Além disso, a água da rede geralmente se encontra numa temperatura menor do que a do ambiente, sendo recomendado - para evitar tanto quanto possível condensação nas paredes das sapatilhas - que a mesma comece a circular imediatamente antes da solda iniciar.

Outros detalhes importantes se referem à montagem geral da junta; barras de reforço e recesso nas sapatilhas. A Fig. 10.7 mostra dimensões típicas para uma peça com 150 mm de espessura. Note-se que as barras de reforço, além de manter a junta em posição, também podem alojar cunhas para fixar as sapatilhas, cujo recesso tem função de promover um pequeno reforço (sobre-metal) na solda e espaço para a camada de escória líquida que se forma na sua superfície.

CONSUMÍVEIS

A composição química do metal de solda depende do metal base; da diluição e dos consumíveis, esse último composto nesse processo pelo arame; o fluxo e o tubo guia, os quais são descritos a seguir.

Os eletrodos maciços são os mais utilizados, existindo também a opção por tubulares com grande conteúdo de pó metálico - ferro e/ou elementos de liga - pois aqueles compostos somente por fluxo, provocam uma camada excessivamente espessa de escória sobre o banho. A seleção da classe mais conveniente deve considerar a diluição, que nesse processo oscila tipicamente entre 30 e 50%. Os eletrodos maciços podem ser idênticos àqueles empregados em MIG e Arco Submerso, principalmente os com maior teor de desoxidantes (AWS 5.18), ou especificamente classificados para este processo (AWS 5.25), além dos tubulares, todos descritos no livro dessa série “Sistemas de Especificação dos Consumíveis para Soldagem e Brasagem”.

Os diâmetros dos arames geralmente empregados, são de 2,4 mm e 3,2 mm no método com

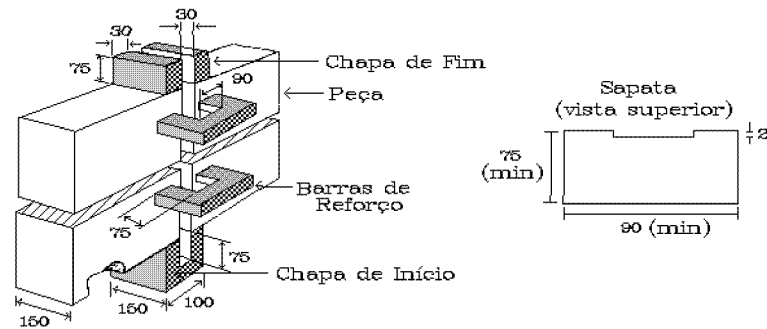


Figura 10.7 - Detalhes do Sistema para Soldagem por Eletroescória - Junta com 150 mm de Espessura (as Barras de Reforço Contém a Sapata, a qual se Encontra no Detalhe).

guia consumível, principalmente devido à disponibilidade de tubos com diâmetros internos cerca de 0,8 mm maiores. No método convencional, não é geralmente empregado arame com bitola superior a 3,2 mm, devido à dificuldade de alimentação causada pelo trajeto curvo.

O fluxo é de vital importância para a soldagem por Eletroescória. Entretanto, suas características não são evidentes e geralmente de difícil avaliação. Algumas de suas funções são:

- Ser condutor elétrico na fase líquida;
- Proteger o metal líquido da atmosfera;
- Desoxidar e, quando desejável, transferir elementos de liga para o metal de solda;
- Propiciar um regime estável de soldagem;
- Operar num amplo intervalo de condições de soldagem.

Para satisfazer estes quesitos, o fluxo deve atender, no mínimo, às seguintes condições:

- Condutividade elétrica: apesar do fluxo na fase líquida ser condutor elétrico, sua resistência deve se manter alta o suficiente para gerar o calor que realizará a solda, mantendo o arame entre 65 e 75 mm dentro do banho de escória. Uma resistência muito alta solicitará tão pouca corrente, que a poça de fusão resfriará e o arame avançará demasiadamente na mesma.

Em contrapartida, sendo a resistência muito baixa, o banho superaquecerá e manterá o arame com penetração menor do que a requerida, estabelecendo a condição (indesejável) para ocorrência de arco elétrico entre a superfície do mesmo e o eletrodo.

- Viscosidade na fase líquida: um excesso de

fluidez permite que a escória penetre entre as menores frestas, principalmente aquelas existentes entre as sapatas e as paredes da peça. Uma viscosidade muito alta, impede que pequenas gotas provenientes do eletrodo sejam depositadas na poça de fusão do metal, além de provocar inclusão de escória na solda.

- Intervalo de fusão: o ponto de fusão deve ser seguramente menor do que o dos metais envolvidos, enquanto a volatilização dos compostos da escória líquida deve ser a mínima possível.

- Compatibilidade metalúrgica: os metais envolvidos não devem sofrer ataque pelos compostos do fluxo.

- Escória: os coeficientes de contração da escória e do metal devem ser diferentes, de maneira a facilitar a retirada da mesma no final da soldagem.

- Eletrólise: íons positivos (cátions) e negativos (ânions) existem livres na escória fundida e quando corrente contínua é empregada, o banho sofre eletrolisação. Operando em CCEN, íons positivos como Fe^{2+} e Mn^{2+} serão depositados no eletrodo, enquanto que em CCEP o mesmo atrairá Fe^- e SiO_4^- , por exemplo. Devido ao fato do Mn^{2+} se concentrar em torno das gotas transferidas, esse elemento é oxidado e transportado para a escória em muito menor proporção com CCEN do que com CCEP, pois com essa última polaridade, muito mais oxigênio estará livre para reagir com o metal, se destacando no mesmo os elementos químicos carbono o manganês. Já em CA, os valores apresentados são intermediários entre as polaridades da CC.

As exatas composições dos fluxos utilizados dependem do fabricante, mas geralmente os mesmos são combinações de óxidos complexos de, entre outros, silício, alumínio, manganês, cálcio, titânio, magnésio, além de fluorita (fluoreto de cálcio), conforme descrito nos Capítulos 4 e 6. O correto balanço das propriedades do fluxo é função da proporção destes compostos. Por exemplo, a estabilidade da soldagem é maior, quando pouca sílica e mais MnO é utilizado. Por sua vez, o aumento da fluorita provoca redução da viscosidade; ponto de fusão e resistividade elétrica, sendo este último coeficiente físico também reduzido pelo

TiO₂ e aumentado pelo Al₂O₃.

Para uma melhor compreensão da ação dos constituintes dos fluxos, a **Tab. 10.1** apresenta algumas composições e propriedades típicas dos mesmos.

Por outro lado, o guia consumível deve ser suficientemente rígido; possuir boa condutividade elétrica e, como o mesmo participa da composição do metal de solda, há de ser compatível com os metais envolvidos. Para aços ao carbono e baixa liga, é recomendado AISI 1008 à 1020, com baixos teores de enxofre e fósforo.

Tabela 10.1 - Composições Químicas e Propriedades Físicas Típicas dos Fluxos para Eletroescória

Composição (%)									Viscosidade (g.s ⁻¹ .cm ⁻¹)	Condutividade Elétrica (Ω ⁻¹ .cm ⁻¹)
SiO ₂	MnO	FeO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O	CaF ₂		
39	21	-	19	4	2	3	-	10	5,0	-
35	24	1,5†	6	6	13	-	-	16	1,5	0,40
20	8	1†	14	13	21	-	1,5	22	1,0	0,50
47	25	1,5†	3†	17	3†	-	0,7	6	15	0,13

* Viscosidade e Condutividade Elétricas à Temperatura de 1250 ; Valor Máximo.

OPERAÇÃO E VARIÁVEIS DO PROCESSO

Após a preparação do equipamento e acessórios, a soldagem pode ser iniciada. No caso de se utilizar tubo guia - esse é o método mais empregado - o mesmo deve estar perfeitamente centrado e com altura mínima de 150 mm acima da superfície superior da peça. Sendo a soldagem realizada com múltiplos tubos guias, aqueles posicionados nas extremidades devem manter uma distância em torno de 25 mm da lateral da junta.

O arco é iniciado se interpondo "palha" de aço, ou pó de ferro, entre a ponta do eletrodo e a chapa base. Nesse instante, se adiciona um máximo de 15 g de fluxo, sendo o restante colocado após o estabelecimento do arco. A velocidade de alimentação do arame deve ser pequena, pois isso facilita a ignição do arco. Após o início do mesmo, se agrega lentamente a carga necessária de fluxo. Como regra geral, se coloca 1 kg de fluxo para cada 20 kg de arame, o que deve ser estimado com antecedência, através da relação aproximada de 1 kg de arame para cada 5600 mm² de área lateral da junta - a qual é dada pelo produto da espessura da chapa pelo comprimento da solda - no caso de aços ao carbono e baixa liga.

Por outro lado, os procedimentos de soldagem

devem ser muito bem planejados e cuidadosamente executados, pois na Eletroescória a interrupção da operação pode causar sérios defeitos e é cara.

Uma vez a soldagem estando em regime pleno, a altura da poça de fusão da escória líquida deve ser cerca de 50 mm, com muito pouco fluxo consumido pelo processo. Se a superfície do banho começar a borbulhar com intensidade, isso é sinal de que a poça está muito rasa e deve-se adicionar mais fluxo. Entretanto, se nenhuma agitação for notada na superfície, a poça está excessivamente profunda.

Antes de se analisar os fatores operacionais que influem na obtenção de uma solda por Eletroescória, é importante o reconhecimento de que esse processo envolve uma massa de metal fundido muito maior do que qualquer outro. Como consequência, é pequena a taxa de resfriamento da junta, com tendência à ocorrer trincas de solidificação no metal de solda, as quais são formadas nesse estágio, devido à ação de tensão mecânica sobre filmes interdendríticos de complexas impurezas com baixo ponto de fusão. Como o metal de solda solidifica no sentido das bordas para o centro, ocorrerá maior ou menor acúmulo de impurezas com baixo ponto de fusão no plano central do mesmo, dependendo do ângulo de encontro das dendritas de ambos os lados. Caso as dendritas se

encontrem num ângulo obtuso, haverá maior possibilidade da formação de um filme de impurezas na região central, do que se as mesmas se encontrarem num ângulo agudo. Para minimizar a ocorrência desse defeito, foi desenvolvido um conceito denominado “fator de forma”, definido pela razão entre a largura do cordão de solda e a altura da poça de fusão do metal líquido. Um pequeno fator de forma indica que as macroestruturas de solidificação se encontrarão num ângulo obtuso e, portanto, a solda terá alta tendência à trincar, ocorrendo o inverso com um grande fator de forma. Entretanto, enfatiza-se que a trinca de solidificação é um fenômeno complexo e a segregação das impurezas - ou elementos de liga - está interrelacionada com outros fatores. Para ilustrar esse ponto, a Fig. 10.8 mostra a relação entre o teor de carbono e o fator de forma, sobre a tendência de ocorrer trinca de solidificação em aços ao carbono e baixa liga.

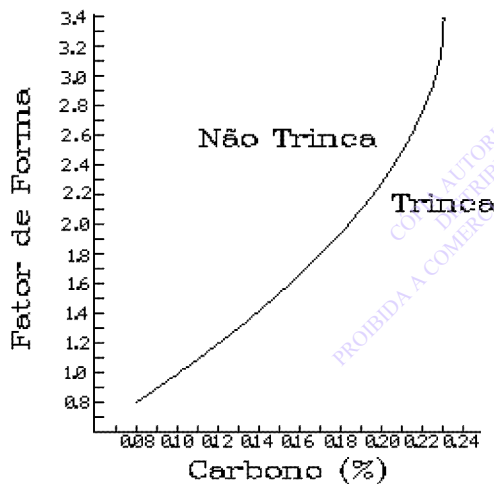


Figura 10.8 - Trinca de Solidificação, em Função da Relação entre o Teor de Carbono e o Fator de Forma do Metal de Solda.

Por outro lado, as variáveis de procedimento são importantes fatores controladores na eletroescória, sendo essencial que de suas interações resultem soldas da mais alta qualidade, obtidas pelo menor custo. A seguir são descritas aquelas principais:

▪ Corrente de Soldagem

Em fontes com curva característica tensão constante, a corrente é diretamente proporcional à velocidade de alimentação do arame. A Fig. 10.9 mostra esse fato para arame de aço ao carbono;

bitola 3,2 mm e método tubo guia consumível. Para alta tensão de soldagem, a taxa de avanço do arame é pequena, ocorrendo o contrário no caso da mesma ser baixa.

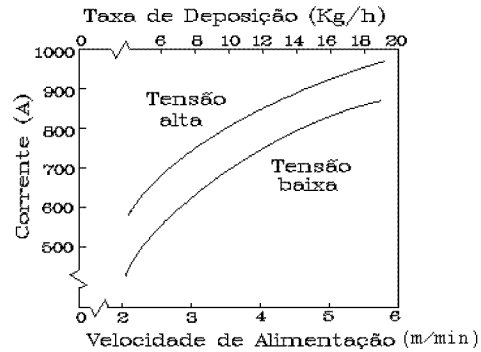
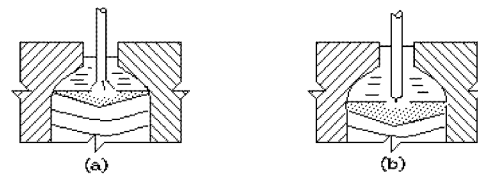


Figura 10.9 - Relação entre Velocidade de Alimentação do Arame; Corrente e Taxa de Deposição.

Outro importante efeito da corrente, é sobre a geometria da poça de fusão. Conforme ilustrado nas Figs. 10.10(a,b), o aumento da corrente provoca um poça de fusão mais profunda, com a ponta do eletrodo mergulhando na mesma por curtos períodos de tempo. A largura da solda, entretanto, se comporta de maneira diferente, dependendo da densidade de corrente. Com até cerca de 50 A/mm², o aumento da corrente leva à produção de uma solda mais larga.



Figuras 10.10 - Efeito do Aumento (a para b) da Corrente de Soldagem sobre a Geometria da Poça de Fusão.

Sendo a densidade de corrente superior a esse valor, o aumento da mesma reduz a largura da solda. Este fato tem sérias implicações sobre o fator de forma da solda e, conseqüentemente, na sua tendência em apresentar trinca de solidificação.

Não somente a intensidade, mas a polaridade da corrente influi sobre as características e propriedades da solda, como visto na eletrólise provocada pela CC. O modo de transferência do metal desde o eletrodo para a poça de fusão, também é afetado pela polaridade de uma forma bastante peculiar. Apesar da taxa de fusão do eletrodo permanecer aproximadamente constante para

CA, CCEN e CCEP, numa dada corrente, o tamanho médio das gotas diminui, enquanto a frequência de transferência aumenta, quando é alterada a polaridade na ordem apresentada.

▪ Tensão de Soldagem

Esse parâmetro é o principal responsável pela largura da solda; estabilidade do processo e diluição. As **Figs. 10.11(a,b)** ilustram o efeito descrito, com excesso de tensão mantendo a ponta do eletrodo acima da altura desejável na poça de fusão do metal líquido. Como a geometria da poça é marcadamente afetada por este parâmetro, o mesmo atua significativamente sobre o fator de forma da solda.

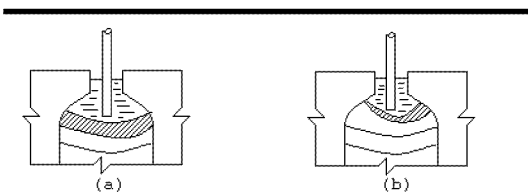


Figura 10.11 - Efeito do Aumento (a para b) da Tensão de Soldagem sobre a Geometria da Poça de Fusão.

A tensão normal de operação se situa entre 30 e 55 V. No método tubo guia consumível, entretanto, a queda de tensão deve ser compensada. Portanto, para soldas com comprimento superior a 1200 mm, a tensão inicial deve ser aumentada 2 V para cada 1200 mm adicionais, em relação àquela recomendada no procedimento geral. Após a solda ter progredido 1200 mm, a tensão deve ser reduzida 2 V e assim sucessivamente.

▪ Velocidade de Soldagem

No método convencional, em que o eletrodo se desloca conforme a solda progride (“sobe”), a velocidade de soldagem (V_s) é uma variável independente, se relacionando com a taxa de alimentação do arame (W_a); área da seção transversal do arame (A_a) e área da seção transversal do metal de solda (A_s) por:

$$V_s = W_a \cdot A_a / A_s \quad [10.2]$$

Entretanto, no método com guia consumível esse parâmetro é dependente da taxa de alimentação do arame e, portanto, da corrente de soldagem.

Por outro lado, a **Fig. 10.12** mostra a influência do número de eletrodos (sem oscilação) e da espessura da junta sobre a velocidade de solda-

gem, numa junta com espaçamento (abertura de raiz) de 30 mm em aço.

▪ Profundidade da Poça de Escória Líquida

A profundidade da poça de escória líquida afeta principalmente a largura da solda. Entretanto, indiretamente a mesma também influencia o procedimento de soldagem, pois com seu aumento, uma maior parte do eletrodo fica imerso na poça. Por um lado, esse fato leva à uma redução da corrente de soldagem mas, em contrapartida, como a área de contato entre o eletrodo e o banho aumenta, a corrente solicitada é maior. Dessa forma, entre os limites normais de operação, esses dois fatores praticamente se cancelam.

Geralmente, a profundidade da poça se situa entre 30 e 70 mm, sendo que se os outros fatores forem mantidos constantes, a mesma é diretamente proporcional à taxa de alimentação do eletrodo e inversamente proporcional à espessura da peça, por cada eletrodo.

Outrossim, a quantidade de fluxo adicionado é um óbvio regulador da profundidade da poça. Utilizando o método do tubo guia e revestindo o mesmo com fluxo, pode-se compensar as perdas de escória que ocorrem.

▪ Abertura de Raiz da Junta

A distância entre as peças que serão soldadas exerce pequeno efeito sobre o procedimento de soldagem. Entretanto, a mesma deve ser suficiente para permitir que o eletrodo, ou o guia consumível, seja inserido sem perigo de formação de arco lateral, ou curto circuito. Geralmente, essa dimensão varia entre 20 e 30 mm para chapas com espessura entre 12 e 300 mm, respectivamente. Outrossim, a largura da solda, inclusive a proporção do metal base fundido, aumenta notavelmente com a abertura de raiz.

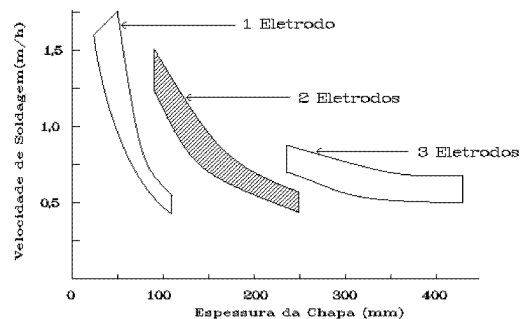


Figura 10.12 - Relação entre o Número de Eletrodos, a Espessura da Junta e a Velocidade de Soldagem.

▪ Oscilação do Eletrodo

O eletrodo é geralmente oscilado na direção da espessura da chapa, quando essa é superior a 60 mm.

Geralmente, o número máximo de eletrodos oscilados é 3 e a velocidade de deslocamento deve ser suficiente para percorrer o percurso entre 3 e 5 segundos.

Em cada extremidade, junto às sapatas, o eletrodo deve realizar uma pausa, por um tempo em torno de 3 segundos, antes de reverter o movimento. Isto é necessário para se alcançar uma adequada fusão do material base.

PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

A exemplo dos procedimentos sugeridos para outros processos, recomenda-se que as peças sejam rigorosamente limpas; o fluxo seco e as precauções usuais de segurança tomadas. Como não há arco elétrico, é dispensável o uso de filtros nos óculos de proteção. Os procedimentos a seguir apresentados, são dirigidos para aços ao carbono e baixa liga, mas podem ser adaptados para outros materiais. A **Tab. 10.2** mostra condições típicas de soldagem pelo método tubo guia consumível, com o mesmo recoberto por fluxo, sem oscilação do eletrodo. Sendo conveniente o uso de oscilação, a **Tab. 10.3** apresenta as condições básicas.

Tabela 10.2 - Condições Típicas de Soldagem por Eletroescória (Método Tubo Guia Consumível Sem Oscilação - Aços ao Carbono e Baixa Liga - Juntas à Topo e em Ângulo)

Espessura da Chapa (mm)	Diâmetro do Tubo Guia (mm)	Número de Tubos	Diâmetro do Arame (mm)	Abertura de Raiz (mm)	Corrente no Tubo* (A)	Tensão† (V)	Velocidade de Soldagem (mm/min)	Consumo de Arame (kg/m)	Consumo do Fluxo - no início (g)
13 a 19	9,5	1	2,4	19	325	30 a 35	41 a 18	2,4 a 3,4	30
16 a 25	13	1	2,4	22	400	30 a 35	31 a 18	3,0 a 4,6	60
25 a 76	16	1	3,2	29	550	35 a 45	31 a 13	4,6 a 15,2	60 a 180
76 a 130	16	2	3,2	29	500	35 a 45	20,3 a 7,6	13,7 a 24,3	180 a 300
130 a 180	16	3	3,2	29	500	35 a 45	20,3 a 7,6	22,8 a 33,4	300 a 420
180 a 230	16	4	3,2	29	500	35 a 45	20,3 a 7,6	31,9 a 42,5	420 a 540

* Variação admissível de ± 50 A; † A tensão especificada é para um comprimento do tubo guia de 1200 mm. A mesma deve ser aumentada 2 V para cada 1200 mm adicionais e reduzida 2 V para cada 1200 mm consumidos.

Tabela 10.3 - Condições Típicas de Soldagem por Eletroescória (Método Tubo Guia Consumível com Oscilação - Aços ao Carbono e Baixa Liga)*

Espessura da Chapa (mm)	Número de Tubos	Corrente Total (A)	Tensão (V)	Amplitude de Oscilação (mm)	Velocidade da Oscilação (mm/min)
60	1	750	39-41	44	500
76	1	750	39-41	60	635
130	1	750	45-47	111	1270
130	2	1500	40-42	29	250
150	2	1500	41-43	54	635
200	2	1500	44-46	105	1140
250	2	1500	47-49	156	1650
300	2	1500	50-52	206	215

* Para todos os casos, abertura de raiz igual a 32 mm.

ELETROGÁS

Nos itens anteriores foram fornecidas as principais informações sobre o processo em questão, sendo que a **Fig. 10.2** ilustrou esquematicamente seu funcionamento.

O consumível utilizado tanto pode ser arame maciço nu, quanto tubular, o qual forma um arco elétrico com a base da junta, de maneira similar à Eletroescória. Entretanto, a grande diferença entre os dois processos, reside exatamente no fato de que no Eletrogás o arco se mantém aberto durante toda a soldagem, além da proteção da poça de fusão ser realizada principalmente por gás. Conforme o consumível e o metal base fundem, a solda avança - com simultânea elevação do conjunto de soldagem - para a parte superior da junta, a qual possui os mesmos detalhes da Eletroescória, ou seja, chapas para início e fim da solda.

Uma importante peça a ser considerada neste processo é o bocal e na **Fig. 10.13** são apresentados dois tipos, sendo aquele em (a) refrigerado com água. É possível, também, oscilar o eletrodo, sendo esse método geralmente empregado para seções mais espessas do que 30 mm.

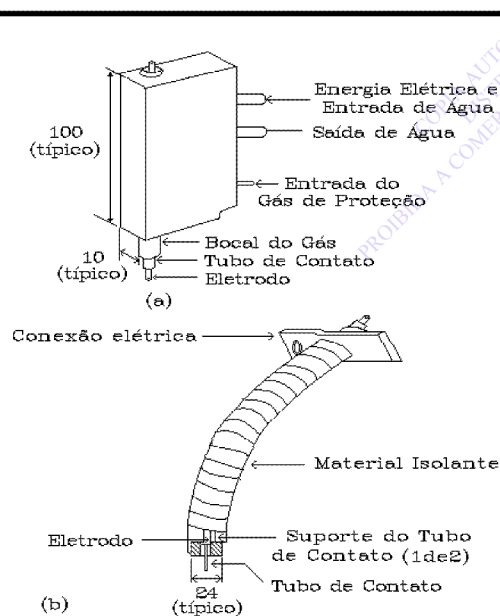


Figura 10.13 - Bocais para Eletrogás, sendo o Tipo (a) Refrigerado com Água.

Na soldagem com eletrodo maciço, o mesmo pode ser especificado pela AWS A5.18 (por exemplo) para o MIG, ou A5.26, conforme descrito no livro “Sistemas de Especificação dos Consumíveis

para Soldagem e Brasagem”. Os diâmetros de arame mais utilizados, estabelecem as seguintes relações entre tensão (U) e corrente (I) de soldagem:

- Diâmetro de 1,6 mm

$$U = 0,05.I + 20 \text{ (V)} \quad [10.3]$$

- Diâmetro de 2,4 mm

$$U = 0,05.I + 7,5 \text{ (V)} \quad [10.4]$$

Quando é empregado eletrodo tubular, ocorrerá a formação de uma pequena camada de escória na superfície do banho. Os respectivos consumíveis também são detalhados no livro “Sistemas...” já citado e designados, por exemplo, pela AWS A5.20, a qual deve ser consultada a respeito. Os diâmetros mais empregados são similares aos dos eletrodos maciços, sendo que o interior do tubo é preenchido com no máximo 6% de fluxo, pois um excesso pode provocar efeito idêntico àquele na Eletroescória.

A escolha entre os dois tipos de eletrodos deve levar em consideração que o tubular é mais caro, mas possui taxa de deposição cerca de 20% maior do que o maciço.

Os gases de proteção geralmente empregados são o CO_2 e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, principalmente o primeiro com eletrodo tubular.

O Eletrogás opera de forma similar ao método convencional de Eletroescória, ou seja, o conjunto todo se desloca verticalmente, conforme a soldagem progride, com o consumível sendo continuamente alimentado. Existe, portanto, necessidade de ser efetuado um preciso controle da velocidade de soldagem que, nesse caso, é um parâmetro independente. As condições gerais de soldagem devem, dessa forma, ser bem entendidas pelo operador.

A corrente, como nos outros processo de soldagem a arco, é o parâmetro responsável pela penetração, nesse caso entendida como a profundidade fundida do metal de solda anteriormente depositado. Aliás, o aumento da corrente diminui a largura da poça de fusão, enquanto a elevação da tensão torna-a mais larga e mais alta.

Quando se utiliza eletrodo maciço, a sua extensão após o bico de contato é cerca de 40 mm, enquanto que com eletrodo tubular auto-protégido, a mesma se situa entre 60 e 75 mm.

DESCONTINUIDADES

Devido a estes processos não serem (ainda) tão populares no Brasil, quanto outros descritos nesse livro, abaixo estão discriminadas as descontinuidades mais usuais encontradas nas soldas produzidas pelos mesmos.

Estas descontinuidades podem ocorrer tanto no metal de solda, quanto na ZAC. A seguinte relação indica a causa da descontinuidade e se a mesma ocorre na Eletroescória (EA); ou Eletrogás (EG), ou, ainda, em ambos processos, quando não especificado:

□ Porosidade

- Insuficiente ou excessiva vazão do gás de proteção (EG);
 - Gás de proteção contaminado (EG);
 - Forte deslocamento de ar (EG);
 - Falta de uma eficiente purga na junta antes da soldagem ser iniciada (EG);
 - Vazamento de água das sapatas para o interior da junta;
 - Insuficiente conteúdo de desoxidantes no arame tubular, ou no fluxo;
 - Escória pouco profunda (EA);
 - Fluxo úmido, ou contaminado (EA);
 - Reações (indesejáveis) do fluxo com o gás de proteção (EG).

□ Rechupe

Como consequência da contração do metal, podem ser formados pequenos vazios (rechupes) no interior do metal de solda, algumas vezes confundidos com porosidade. No final da junta, geralmente é produzido um grande rechupe, sendo essa a razão para utilização de chapas postizas.

□ Trincas

- Trincas induzidas pelo hidrogênio são raras nesses processos, devido à relativamente pequena taxa de resfriamento envolvida. Entretanto, principalmente na soldagem de aços baixa liga, precauções devem ser tomadas para não ser utilizado fluxo úmido, ou gás contaminado.
 - Trincas de solidificação no metal de solda, entretanto, são mais prováveis de ocorrer, provocadas principalmente por um inadequado fator de forma da poça de fusão; alta tensão na junta e elevado conteúdo de impurezas.

□ Inclusões

Podem ocorrer inclusões de escória ou não metálicas em geral, devido à solidificação da escória junto às sapatas, principalmente quando o eletrodo é oscilado. Também é possível, que um muito grosseiro acabamento das paredes internas da junta, ou planos de segregação no metal base, provoquem essas inclusões. Outrossim, partes do eletrodo não fundido podem permanecer no interior do metal de solda sob certas condições, tais como excessiva velocidade de soldagem, ou muito longo comprimento do eletrodo após o bico de contato.

□ Falta de Fusão e Penetração

- Somente num lado da junta: provocada por eletrodo deslocado do centro da mesma;
 - Em ambos os lados da junta: (a) Muito alta velocidade de soldagem; (b) Muito baixa tensão de soldagem; (c) Excessiva espessura, em relação ao número de eletrodos utilizados.

**C
A
P
Í
T
U
L
O

11**

**SOLDAGEM POR
RESISTÊNCIA ELÉTRICA**

INTRODUÇÃO	244
VARIÁVEIS DE OPERAÇÃO	245
MATERIAIS PARA OS ELETRODOS	251
EQUIPAMENTOS	252
Circuito Elétrico	252
Dispositivos Mecânicos e Controles	253
SOLDAGEM POR PONTO	255
Geometria do Eletrodo	255
Distribuição da Corrente de Soldagem	256
Dimensionamento do Ponto	257
Procedimentos de Soldagem	258
SOLDAGEM POR PROJEÇÃO	264
SOLDAGEM POR COSTURA	265

INTRODUÇÃO

Poderiam ser estudados neste Capítulo, todos os processos nos quais a resistência à passagem da corrente elétrica gera a energia utilizada para a soldagem. Entretanto, convencionalmente são excluídos aqueles que ocorrem na fase sólida, ou no intervalo sólido/líquido, bem como quando há fase líquida, mas a mesma somente indiretamente realiza a solda, sendo exemplo a Eletroescória.

Dessa forma, os métodos de soldagem por resistência denominados Projeção, Costura e Ponto são os que se enquadram no presente Capítulo, pois os mesmos possuem origem e conceituação bastante similares. O princípio básico desses processos, reside na passagem de corrente elétrica entre dois eletrodos (não consumíveis) que comprimitam peças distintas. Conseqüentemente, devido à maior resistência apresentada pelas interfaces em contato, ocorre fusão nesse local, formando a solda.

As Figs. 11.1(a-c) ilustram esquematicamente os métodos em questão. A solda Ponto emprega eletrodos com uma geometria tal, que sob cada par dos mesmos é formada uma relativamente pequena região fundida (“ponto”). Na solda por Projeção, a localização do ponto é determinada principalmente por ressaltos realizados nas peças, os quais entram em contato. Em qualquer um desses dois métodos, podem ser realizados vários pontos simultaneamente. Na solda por Costura, geralmente através de eletrodos com a forma de discos que sofrem rotação, são produzidos diversos pontos que se sobrepõem, resultando numa junta extensa e contínua.

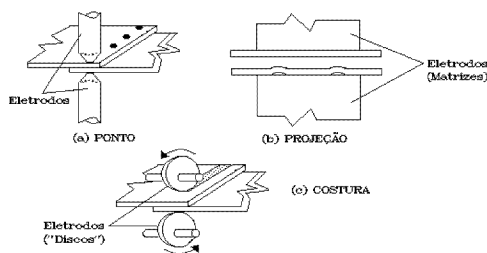


Figura 11.1 - Principais Métodos de Soldagem por Resistência Elétrica.

Portanto, uma típica seqüência desses processos é a seguinte:

- Os eletrodos pressionam as chapas;
- Circula corrente elétrica durante tempo suficiente para que ocorra a fusão, formando o “ponto”;
- A corrente é interrompida, mas os eletro-

dos continuam a pressionar as chapas, até que o metal de solda solidifique;

- Os eletrodos são, então, retraídos.

Saliente-se que esse é o mais simples ciclo que pode ser utilizado, existindo seqüências bem mais complexas, incluindo forjamento, além de pré- e pós-aquecimentos das chapas.

As soldas realizadas por esses métodos, se caracterizam por ocorrer com muito altas taxas de aquecimento e resfriamento. Conforme a região imediatamente abaixo dos eletrodos é aquecida, a resistência elétrica aumenta na interface das chapas, o que é uma condição fundamental para que se forme a solda. Após um breve período, é iniciada a fusão de um certo volume de metal, formando o chamado “ponto”. Em torno do mesmo ocorre uma Zona Afetada pelo Calor (ZAC), com a junta possuindo todas as regiões produzidas pelos processos de fusão anteriormente estudados.

Os materiais normalmente soldados por resistência elétrica são aços ao carbono, inclusive os zincados, baixa liga e inoxidáveis; além de cobre; níquel; alumínio; magnésio; titânio e suas ligas.

Sem dúvida, os aços ao carbono são os mais freqüentemente soldados por esses métodos. Nesse caso, a solda Ponto é empregada para espessuras de até 3,5 mm, ocasionalmente alcançando 6,5 mm, enquanto que aquelas por Projeção e Costura raramente excedem 3,5 mm. Excepcionalmente maiores espessuras são soldadas, mas pode ser necessário equipamento especialmente projetado para tanto além de, em geral, diminuir a resistência da união e não ser esse, provavelmente, o processo mais econômico.

A soldagem por resistência elétrica é utilizada em diversas as atividades industriais, envolvidas na montagem de componentes com chapas relativamente finas. Entretanto, destaca-se a indústria automobilística, hoje provavelmente sua maior usuária, pois um automóvel pode possuir centenas de pontos, incluindo tipicamente o tanque de combustível, o qual geralmente é soldado por Costura.

As fontes de potência podem ser de corrente alternada (CA), ou corrente contínua (CC), sendo que essa última modernamente emprega retificadores de alta potência no estado sólido, ambas operando em uma, ou três fases. Além desses tipos, também são utilizados dispositivos que acumulam energia e liberam a mesma num curto perí-

odo de tempo - tais como bancos de capacitores.

A resistência elétrica na interface entre as peças se situa geralmente no intervalo de 50 a 500 $\mu\Omega$ - mas pode ser tão baixa quanto 20 $\mu\Omega$ para o alumínio - sendo necessário corrente com intensidades entre 5000 e 100.000 A para ocorrer fusão, o que também depende da condutividade térmica

do metal envolvido, a qual é pequena para o aço e alta para o alumínio, por exemplo. As tensões empregadas variam de 1 a 20 V - muito raramente alcançam 30 V - com um tempo de aplicação da corrente variando entre menos de 0,01 s para folhas (chapas muito finas) e até vários segundos para peças mais espessas.

VARIÁVEIS DE OPERAÇÃO

Existem alguns conceitos que se aplicam aos três métodos de soldagem em questão. Entre os mesmos se encontram os seguintes:

□ Energia para Fusão

A energia para a fusão e formação do ponto, é gerada nos contatos elétricos (eletrodos) e nas peças. A mesma pode ser obtida segundo a seguinte equação (lei de Joule):

$$Q = \frac{r}{J} \int_0^t I^2 \cdot R \cdot dt \quad [11.1]$$

onde:

r = rendimento térmico (perdas por radiação e condução);

J = constante (4,185 J);

I = corrente de soldagem, ou corrente no secundário - Is (A);

t = tempo que a corrente circula (s);

$R = r_{e1} + r_{e2} + r_{ec1} + r_{ec2} + r_i + r_{c1} + r_{c2}$ (Ω).

Conforme a **Fig. 11.2(a)** mostra, $r_{e1,2}$ são as resistências dos dois eletrodos; $r_{ec1,2}$ as resistências entre os eletrodos e as peças; r_i a resistência na interface entre as peças, ou resistência de contato; e $r_{c1,2}$ as resistências das peças. Note-se que essa r_i é diretamente proporcional à raiz quadrada da razão entre as durezas das peças, nas temperaturas

de trabalho e ambiente.

Por sua vez, a **Fig. 11.2(b)** ilustra a distribuição da temperatura em um ponto durante a soldagem. Portanto, para que a solda ocorra, a região da interface entre as peças deve ser a primeira a alcançar a temperatura de fusão dos metais base. Parte do calor produzido é perdido para os eletrodos; ambiente e restante das peças. Essas perdas são máximas no início da operação, sendo o somatório das mesmas diretamente proporcional à raiz quadrada do tempo de soldagem. Portanto, soldas realizadas num menor tempo apresentarão um maior rendimento térmico.

□ Densidade da Corrente

Apesar do maior rendimento térmico ocorrer em soldas realizadas num curto período de tempo, existem limites para a densidade de corrente, os quais dependem: (a) Da intensidade de corrente; (b) Da espessura e do tipo dos materiais envolvidos. Se essa intensidade de corrente for insuficiente, nunca ocorrerá fusão, mesmo num muito longo tempo. Entretanto, sendo a mesma excessiva, o eletrodo penetrará na peça, pois grande parte (ou toda) sua espessura estará na fase plástica. Assim, para uma dada força de aplicação dos eletrodos, há uma corrente máxima, acima da qual o metal sob os mesmos é expulso violentamente, provo-

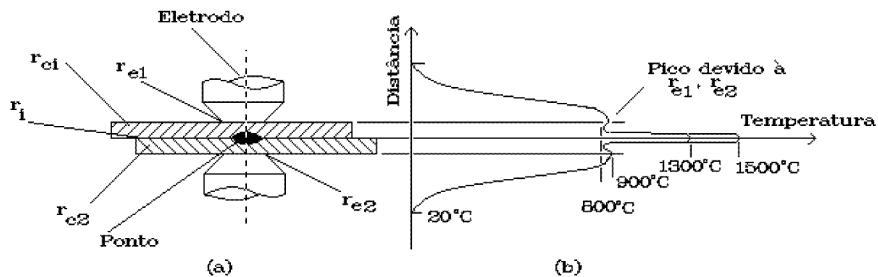


Figura 11.2 - (a) Resistências Envolvidas na Soldagem Ponto; (b) Distribuição da Temperatura em torno do Ponto

cando soldas com defeito. Praticamente, para o processo ocorrer no menor tempo possível e produzir pontos com a mais alta resistência mecânica, é usual se determinar a densidade de corrente máxima (D) exatamente anterior àquela que provoca essa expulsão, a qual pode ser estimada pela seguinte fórmula deduzida empiricamente:

$$D = 192 + 480 \cdot \text{EXP}^{-e} \quad (\text{A/mm}^2) \quad [11.2]$$

onde “e” (mm) é a espessura da chapa mais fina.

□ Força dos Eletrodos e Resistência Elétrica

Apesar de ser aparentemente uma variável independente, a força exercida pelos eletrodos sobre as peças resulta numa pressão, a qual altera a resistência de contato e a circulação de corrente na interface das mesmas. Isso se deve ao fato das superfícies dos metais apresentarem diferentes graus de rugosidade, sendo que com o aumento da pressão, os picos e vales existentes entram em contato, diminuindo a resistência elétrica e aumentando a circulação de corrente nessa interface. Entretanto, a quantidade total de calor gerada nesse local diminui, sendo necessário aumentar a intensidade de corrente e/ou tempo de sua aplicação. Além disto, a força com que os eletrodos atuam, apesar de geralmente ser especificada como estática é, na realidade, dinâmica e depende, na sua aplicação, das características mecânicas do equipamento de solda.

Portanto, a resistência de contato decresce com a pressão aplicada e é altamente suscetível ao acabamento superficial das chapas, conforme a Fig. 11.3 ilustra para a soldagem a Ponto de um aço inoxidável austenítico, onde a superfície sofreu: (a) Jateamento abrasivo (areia); (b) Jateamento de granalha metálica. Dessa forma, a energia gerada também diminui (para uma mesma corrente) e, conseqüentemente, a pressão deve ser cui-

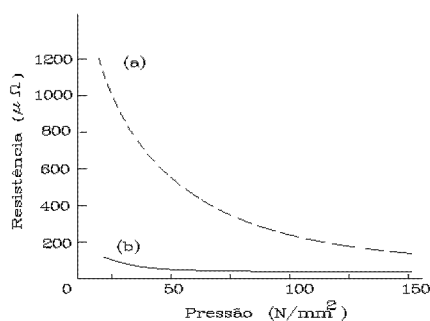


Figura 11.3 - Influência da Pressão e Acabamento Superficial sobre a Resistência de Contato na Solda Ponto.

dadosamente determinada em conjunto com a corrente.

Outrossim, essa pressão aplicada também varia com a espessura e tipo do material que está sendo soldado, sendo que a Fig. 11.4 exemplifica uma relação existente na solda Ponto para aço baixo carbono, com espessuras entre 0,5 e 3,5 mm.

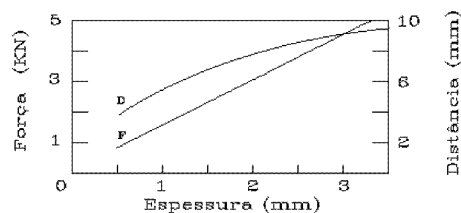


Figura 11.4 - Inter-relação entre Força (F), Diâmetro do Eletrodo (D) e Espessura da Peça na Solda Ponto.

□ Corrente e Tempo de Soldagem

Parcialmente foram analisados os efeitos dessas variáveis, quando se estudou quantitativamente como a energia é gerada nesse processo. O fato da corrente atuar elevada ao quadrado (equação 11.1), faz com que a mesma seja o principal fator a ser considerado na taxa com que a solda é realizada. É, portanto, um parâmetro crítico. Flutuações na corrente podem diminuir a qualidade, ou mesmo desqualificar uma junta, sendo as mesmas devidas, principalmente, à oscilação da tensão da rede e alterações na impedância do circuito secundário, quando CA é utilizada. A Fig. 11.5 ilustra correntes e tempos para soldagem a Ponto sobre chapas de aço ao carbono, com espessuras entre 0,5 e 3,5 mm.

Por sua vez, uma dos maiores responsáveis pela resistência da junta é a penetração, ou a profundidade que o ponto se estende nas peças. Em geral, o mínimo exigido é que o ponto alcance 20% da espessura.

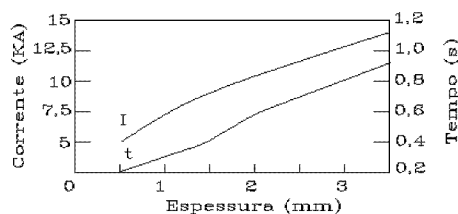


Figura 11.5 - Corrente (I) e Tempo (t) de Soldagem (Ponto) para Diferentes Espessuras de Chapas de Aço ao Carbono.

□ Ciclo de Soldagem

A Fig. 11.6 apresenta um ciclo de soldagem simples, o qual é dividido nas seguintes fases:

- Fase de Compressão

É o intervalo de tempo compreendido entre o início da operação e o início da passagem da corrente, no qual pelo menos um eletrodo se movimenta e pressiona as chapas contra o outro;

- Fase de Soldagem

É o intervalo de tempo em que a corrente circula e ocorre a fusão, formando o ponto;

- Fase de Manutenção

Também chamada de resfriamento, é o intervalo de tempo no qual, após a corrente ter sido interrompida, os eletrodos continuam a pressionar as chapas, até a completa solidificação do metal do ponto;

- Fase de Espera

Designa o intervalo de tempo entre uma solda e a próxima, a qual geralmente empregará as mesmas condições de soldagem.

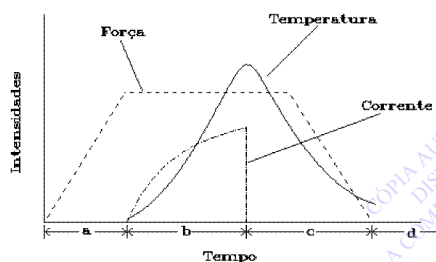


Figura 11.6 - Ciclo de Soldagem, Composto pelas Fases: (a) Compressão; (b) Soldagem; (c) Manutenção; (d) Espera.

Para uma mínima ZAC e máxima produtividade, são utilizados os mais curtos períodos de tempo de soldagem possíveis, com as restrições já descritas, se enfatizando a reprodutibilidade da solda. Todos os tempos das fases de soldagem em CA são determinados por “ciclos”, os quais não devem ser confundidos com “ciclo de soldagem”. Cada “ciclo” é igual a $1/X$, onde “X” é a frequência da corrente de soldagem. Portanto, operando com a frequência da rede, no Brasil um ciclo equivale a 1/60 segundos. Dessa forma, uma solda que se realize com 5 ciclos, demora 1/12 segundos para ocorrer. No item mais abaixo, o qual tratará dos equipamentos, serão explicadas as razões para o uso dessa unidade, e não o tempo.

Por outro lado, existem situações que exigem ciclos de soldagem bem mais complexos, aplicados com as principais finalidades de: (a) Forjar

o ponto realizado, aumentando suas propriedades mecânicas; (b) Assentar perfeitamente os eletrodos nas peças, sendo necessário, portanto, uma compressão inicial sem circulação de corrente; (c) Reduzir o gradiente térmico no início da soldagem, através da circulação de corrente para pré-aquecer as peças; (d) Reduzir a taxa de resfriamento durante a soldagem; (e) Acelerar a taxa de resfriamento logo após a soldagem, para temperar e melhorar as propriedades mecânicas da região do ponto, através da manutenção do contato com os eletrodos, sem circulação de corrente; (f) Revenir a região do ponto logo após a têmpera, com circulação de corrente; (g) Refinar os grãos do metal fundido, através de corrente aplicada após a soldagem.

A seguir serão descritas algumas dessas técnicas:

- Taxa de Aplicação da Corrente

A Fig. 11.7 mostra um ciclo de soldagem, em que a força aplicada é constante, mas a corrente aumenta gradativamente antes da fase solda iniciar e decresce após a mesma terminar. O crescimento gradual da corrente previne a expulsão do metal no início da operação e é conveniente para soldagem de peças com carepa, ou que tenha sofrido algum tipo de recobrimento protetor. O fato da corrente não cessar imediatamente após a solda, diminui a taxa de resfriamento, sendo particularmente útil em ligas suscetíveis à têmpera.

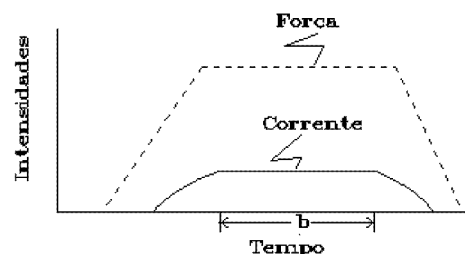


Figura 11.7 - Ciclo de Soldagem com Impulso Único com a Solda Ocorrendo no Intervalo de Tempo “b”.

- Superaquecimento dos Eletrodos

Em peças com espessuras igual ou maiores do que aproximadamente 4 mm, a realização das soldas pode necessitar grande geração de energia, o que normalmente supera aquece os eletrodos. Para minimizar esse problema, o ciclo apresentado na Fig. 11.8 utiliza uma série de pulsos de corrente, cada um seguido por uma fase de resfriamento. Dessa forma, durante a fase em que a corrente não

está circulando, os eletrodos dissipam a maior parte do calor e numa taxa muito superior à das peças, permitindo que a união se realize sem maiores problemas.

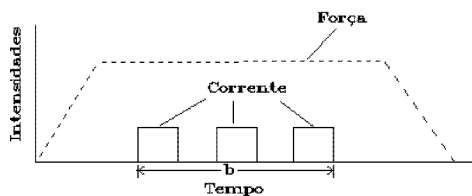


Figura 11.8 - Ciclo de Soldagem com Múltiplos Pulsos de Corrente (intervalo de tempo "b").

▪ Forjamento e Pós-Aquecimento

Em aços temperáveis e ligados, podem ser necessárias operações para refino de grão da junta, as quais não são normalmente empregadas em aços baixo carbono e a Fig. 11.9 exemplifica um ciclo típico. Após a soldagem ocorrer ("b"), há um pequeno intervalo, no qual a corrente não circula - permitindo a solidificação e resfriamento da solda - seguido por um aumento da força ("forjamento-FO") e aplicação de uma relativamente pequena intensidade de corrente ("PA"), denominada de revenimento. Em seguida à interrupção desta corrente, há uma fase de manutenção, na qual a força continua a ser aplicada até o ciclo completo.

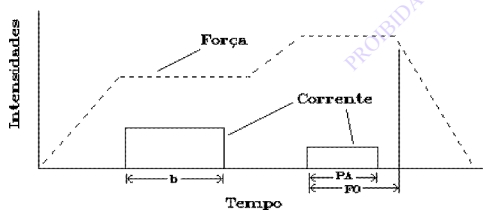


Figura 11.9 - Ciclo Típico de Soldagem para Aços Temperados.

▪ Acabamento das Superfícies

A grande importância do estado das superfícies das peças sobre a resistência de contato já foi mencionada. Para que soldas rigorosamente consistentes em qualidade e dimensões sejam obtidas, é fundamental que as superfícies sempre apresentem a mesma rugosidade e nível de limpeza. Portanto, as superfícies envolvidas devem estar livres de carepas, óleos, pinturas, etc., sendo talvez necessário o emprego de meios mecânicos ou químicos para alcançar esse objetivo. Sem entrar nos detalhes dos processos de limpeza exis-

tentes, deve ser salientado que o jateamento com areia não é recomendado, pois algumas partículas podem ficar engastadas na superfície, sendo preferível o uso de granalha fina de aço. Como numa escala microscópica as superfícies não são perfeitamente lisas, a força aplicada pelos eletrodos é um fator controlador da área efetiva de contato e, por consequência, da resistência entre as mesmas. Além disso, a interface entre o eletrodo e a peça deve apresentar a menor resistência possível pois, caso contrário, a mesma aquecerá numa taxa quase tão grande quanto naquela das peças.

Outra questão comum entre os métodos considerados, é o efeito da soldagem sobre as propriedades mecânico-metalúrgicas da junta produzida e a habilidade da mesma em realizar o serviço para a qual foi projetada. Geralmente, se denomina "soldabilidade" ao conjunto desses fatores. Esse termo, apesar de vago, fornece alguma indicação sobre (pelo menos) a facilidade com que a solda pode ser realizada. Para a soldagem por resistência elétrica, essa "soldabilidade" (S) foi empiricamente determinada como sendo:

$$S = \frac{r}{F \cdot c} \times 100 \quad (\%) \quad [11.4]$$

onde:

r = resistividade elétrica (mm.Ω);

F = ponto de fusão (°C);

c = condutividade térmica relativa (Cu=1,00).

Como consequência dessa equação, os seguintes níveis de "soldabilidade" foram estabelecidos: (a) $S < 0,25\%$, não satisfatória; (b) $0,25\% < S < 0,75\%$, aceitável; (c) $0,75\% < S < 2,00\%$, boa; (d) $S > 2,00\%$, excelente.

Portanto, em função dos diferentes aspectos que os materiais apresentam, a seguir são discutidas as principais precauções que devem ser tomadas na soldagem dos mesmos por resistência elétrica:

□ Chapas com Recobrimentos Metálicos

Entre as diversas soluções possíveis para proteção contra corrosão e outros tipos de desgaste, o recobrimento das superfícies é cada vez mais utilizado. Na Tab. 11.1 são apresentados os graus de "soldabilidade" por resistência, de chapas de aço baixo carbono revestidas. Esse enfoque é reconhecidamente subjetivo, mas indica as características que devem ser esperadas da junta, se destacando nessa tabela as chapas galvanizadas. O

maior problema do revestimento com zinco, é a necessidade de se usar corrente mais intensa do que a geralmente empregada, devido à grande fuga da mesma, resultando num superaquecimento e, conseqüentemente, menor vida do eletrodo.

Tabela 11.1 - Influência dos Revestimentos Metálicos sobre a Soldabilidade por Resistência Elétrica

Tipo de Recobrimento	Espessura da Camada (mm)	Soldabilidade*
Alumínio (metálico)	40 à 50	BM
Cádmio	8	B
Chumbo	10 à 15	B
Cromo	3 à 10	N
Estanho (Eletrolítico)	3 à 7	B
Zinco (Eletrolítico)	3 à 10	B
Zinco (à fogo)	20 à 40	BM

* Convenção: B=Boa; M=Média; N=Não recomendado.

□ Aços ao Carbono e Baixa Liga

Soldas envolvendo aços baixo carbono não apresentam dificuldades de produção. Aços de médio a alto carbono e baixa liga geralmente são revenidos imediatamente após a solidificação da junta, sendo que em alguns tipos poderá ser preciso realizar pré-aquecimento.

□ Aços Inoxidáveis

A soldagem dos aços inoxidáveis do tipo martensítico, requer as mesmas precauções tomadas com os aços do item anterior. Aqueles do tipo ferrítico apresentam excessivo crescimento dos grãos, não sendo indicados para juntas que devem possuir alta ductilidade. Entre os problemas da união por resistência dos austeníticos, se encontra a grande distorção provocada na peça. Além disso, em geral, os aços inoxidáveis possuem as seguintes particularidades, as quais devem ser consideradas no planejamento da soldagem:

▪ Condutividade Térmica e Elétrica

Essas duas propriedades físicas são menores nos aços inoxidáveis, quando comparados com os aços ao carbono. Dessa forma, a pequena condutividade elétrica provoca uma alta taxa de geração de energia, sendo as soldas realizadas mais rapidamente, ou com menor corrente, com o calor se dissipando mais lentamente, devido a baixa condutividade térmica;

▪ Alterações Microestruturais

Deve ser cuidadosamente equilibrada a necessidade de alcançar alta temperatura e mantê-la durante algum tempo para realizar a soldagem, pois há possibilidade de ocorrer precipitação de carbonetos, entre outros fenômenos, o que diminui a resistência à corrosão da junta;

▪ Acabamento das Superfícies e Resistência Mecânica

Além das medidas usuais de limpeza superficial das chapas que serão soldadas por esse processo, os aços inoxidáveis requerem especial precaução com relação à camada de óxido de cromo, a qual se forma naqueles laminados a quente. De qualquer forma, a resistência de contato desse material é maior do que a dos aços ao carbono. Esse fato, aliado à sua relativamente alta resistência mecânica, faz com que seja necessário aplicar uma maior força no eletrodo;

▪ Expansão Térmica e Temperatura de Fusão

Quando comparado com os aços ao carbono, os inoxidáveis austeníticos apresentam um coeficiente de expansão térmica cerca de 40% mais alto sofrendo, portanto, maior deformação, pois esse fator se combina com sua pequena condutividade térmica.

Por sua vez, os inoxidáveis ferríticos e martensíticos apresentam um coeficiente em torno de 26% menor, não sendo esta uma preocupação notável. Outrossim, os inoxidáveis austeníticos fundem entre 1350 e 1450 °C, enquanto os martensíticos e ferríticos no intervalo de 1380 a 1520 °C e os aços ao carbono de 1460 a 1520 °C. Portanto, a energia que deve ser gerada para soldagem varia num amplo intervalo, dificultando o estabelecimento de parâmetros exatos, mesmo em cada tipo.

□ Alumínio e Suas Ligas

As diferentes ligas de alumínio apresentam distintos graus de dificuldade para serem unidas por resistência elétrica, como será visto mais adiante (soldagem Ponto).

Outrossim, essas ligas possuem diversas características bastante distintas daquelas dos aços, ou seja :

▪ Condutividade Térmica e Elétrica

Como conseqüência desses dois coeficientes físicos serem muito maiores do que dos aços, é necessária uma mais elevada densidade de corrente, além da energia ser gerada numa taxa superior;

- **Resistência Mecânica e Estado Plástico**

O alumínio e suas ligas apresentam baixa resistência mecânica em altas temperaturas, além de pequeno intervalo no qual o material se encontra no estado plástico. Essas propriedades implicam num muito preciso controle na aplicação da força dos eletrodos, além da possibilidade dos mesmos serem rapidamente movimentados, pois a ação deve ocorrer num pequeno tempo no intervalo plástico, não acima dele. Como consequência, o método por Projeção não é geralmente empregado nesse material;

- **Camada Superficial de Óxido**

Quando expostas à atmosfera, estas ligas desenvolvem uma tenaz camada de óxido (Al_2O_3), a qual possui resistência elétrica variável. Para muitas aplicações industriais, essa camada não impede a realização de juntas aceitáveis. Entretanto, quando é primordial a obtenção de pontos iguais e com altas propriedades mecânicas, a superfície deve ser limpa com decapantes químicos e a solda realizada logo após;

- **Temperatura de Fusão e Contração na Solidificação**

A relativamente baixa temperatura de fusão do alumínio e suas ligas, requer que o sistema apresente pequena inércia mecânica, principalmente os eletrodos, pois os mesmos necessitam de ajuste da intensidade da força durante toda essa fase, acompanhando a alta taxa com que o material se deforma. Além disso, a grande contração que ocorre na solidificação dessas ligas, pode provocar porosidade e trinca na solda. Desta forma, é preciso que a força também aumente conforme o ponto solidifica, “forjando-o” de forma a produzir uma união de qualidade.

- **Cobre e Suas Ligas**

Existem certas similaridades óbvias entre a soldagem do cobre e do alumínio, relacionadas com os coeficientes físicos desses materiais. A maior aplicação desse processo se encontra nas ligas com relativamente baixa condutividade elétrica, em espessuras de até 1,5 mm. Deve ser salientado, que esse coeficiente físico varia muito nessas ligas, com o cobre isento de oxigênio sendo mais de 30 vezes superior às ligas Cu-Ni-Mn, por exemplo.

De uma forma geral, o cobre e suas ligas são materiais difíceis de serem soldados por resis-

tência elétrica. Isso é notável naquelas ligas cuja condutividade elétrica é mais alta do que 30% IACS, principalmente pela muito maior corrente que deve ser empregada - em relação a aço ao carbono - além dos eletrodos precisarem ser altamente condutivos e muito bem refrigerados. A pequena inércia mecânica que os eletrodos devem possuir, também é um ponto fundamental, pois o intervalo de temperatura que as ligas de cobre exibem no estado plástico é bastante reduzido. A limpeza superficial é outra preocupação adicional e inclui, muitas vezes, métodos químicos.

- **Ligas à Base de Níquel**

Em geral, essas ligas apresentam alta condutividade elétrica e grande resistência mecânica em elevadas temperaturas. Conseqüentemente, a força de aplicação dos eletrodos é maior do que nos aços ao carbono. Os tipos endurecidos por precipitação, como por exemplo o 713C, podem trincar durante a soldagem. Aqueles que sofrem tratamento térmico de envelhecimento, como o Monel K-500, também são suscetíveis a trincas, quando submetidos à tensão de tração numa temperatura em torno de 600 °C. Outrossim, as ligas de níquel sofrem fragilização, quando expostas em alta temperatura a elementos de baixo ponto de fusão, tais como enxôfre e chumbo.

- **Materiais Dissimilares**

A soldagem entre materiais diferentes é possível, desde que seja considerado o equilíbrio térmico na interface, de forma que a solda se divida em partes aproximadamente iguais nas peças. Deve ser gerada mais energia no lado do material que possuir maiores condutividades térmica e elétrica, ou, em materiais com esses coeficientes físicos similares, naquele que fundir em mais alta temperatura. Em materiais cuja diferença de condutividade não seja muito grande, as seguintes técnicas são empregadas no lado da peça mais condutiva: (a) O eletrodo deve possuir uma menor área de contato, ou; (b) A face da ponta de contato do eletrodo deve ser um material que possua alta resistividade, de preferência eletrodos Classes 11 ou 12 do Grupo B da RWMA (veja no item seguinte), ou; (c) A peça deve ser revestida com uma fina camada de um material que possua maior resistividade, ou; (d) A peça deve ser mais espessa.

Sendo apreciável a diferença de condutividade, duas ou mais dessas técnicas devem ser utilizadas em conjunto.

MATERIAIS PARA OS ELETRODOS

Um importantíssimo componente do equipamento da soldagem por resistência elétrica, é aquele que mantém contato com as peças, ou seja, o eletrodo. O material do mesmo deve possuir as seguintes propriedades: (a) Alta condutividade térmica e elétrica; (b) Baixa resistência de contato; (c) Grande resistência mecânica e ao desgaste nas temperaturas de trabalho.

Provavelmente, as especificações de eletrodos mais utilizadas são aquelas da “Resistance Welder Manufacturers’ Association - RWMA” (E.U.A.), a qual classifica os mesmos pela composição química e propriedades mecânicas. As Classes 1 a 3 do Grupo A são disponíveis trabalhadas a frio, em varas redondas, ou em barras com seções quadradas, retangulares e hexagonais, além de forjados e fundidos. As Classes 10 a 14 do Grupo B podem ser fornecidas em varas e barras.

Abaixo são discriminados os mais importantes aspectos das classes de interesse para soldagem por resistência elétrica, sendo que aquelas propriedades mecânicas e físicas fornecidas, são relativas à varas trabalhadas a frio, com até 1 polegada (25,4 mm) de diâmetro.

□ Ligas à base de cobre (Grupo A da RWMA)

- Classe 1: composição química nominal de 1% cádmio e o restante cobre, não tratável termicamente. Portanto, não apresenta vantagem sobre cobre não ligado no estado como fundido. A sua resistência mecânica é obtida por trabalho a frio, com mínima resistência à tração de 414 N/mm²; alongamento de 13%; dureza 65 HRB. Apresenta alta condutividade elétrica (80% AISC) e térmica, sendo recomendada para soldar por Ponto e Costura aços baixo carbono revestido com estanho, cromo e zinco, além de alguns não ferrosos, tais como latões, bronzes, alumínio, magnésio, e suas ligas.

- Classe 2: composição química nominal de 0,8% cromo e o restante cobre. Tratável termicamente, podendo ser interessante seu uso no estado como fundido, mas as máximas propriedades mecânicas são obtidas pela combinação do tratamento térmico com trabalho a frio, com resistência à tração mínima de 448 N/mm²; alongamento de 13%; dureza 75 HRB. Apresenta menor condutividade elétrica (75% AISC) e térmica do que a Classe 1. Material de uso geral e bastante difundido, para a soldagem de alta produção por Ponto e Costura de aços baixo carbono, baixa liga e inoxi-

dáveis; ligas de níquel e ligas a base de cobre de pequena condutividade.

- Classe 3: composição química nominal de 0,5% berílio; 1,0% níquel (o qual pode ser omitido); 1,0% cobalto e o restante cobre. Tratável termicamente, apresenta menor condutividade elétrica (45% AISC), mas mais altas propriedades mecânicas do que as classes precedentes, com resistência à tração mínima de 690 N/mm²; alongamento de 9%; dureza 90HRB. Esse é um material que possui alta resistência ao desgaste, sendo uma boa opção para aplicações que envolvam grandes pressões e em situações que apresentem alta resistência elétrica, como na soldagem a Ponto, ou por Costura, de aços ao carbono muito espesso; ligas de aços inoxidáveis e outras para trabalho em alta temperatura.

□ Metais Refratários (Grupo B da RWMA)

Esses materiais são produzidos por metalurgia do pó, sendo os preferidos quando as condições de trabalho são severas, pois os mesmos apresentam alta resistência à deformação. As Classes 10 a 12 são principalmente empregadas na soldagem por Projeção e em insertos. Também são utilizados em situações que exigem eletrodos de distintos materiais, para equilibrar o calor gerado nas peças, ou por grande diferença de espessura das mesmas, ou devido às suas muito distintas condutividades térmicas e elétricas, como na soldagem de cobre em aço, quando é utilizado o tipo em questão no lado do primeiro metal. Nesse Grupo, as seguintes classes são de interesse:

- Classe 10: composto cobre-tungstênio, com alto ponto de fusão; dureza de 72 HRB; resistência à compressão mínima de 931 N/mm²; condutividade elétrica de 35% AISC.

- Classe 11: composto por 58% de tungstênio em volume no cobre; dureza de 94 HRB; resistência à compressão mínima de 1103 N/mm²; condutividade elétrica de 28% AISC.

- Classe 12: composto cobre-tungstênio; dureza de 98 HRB; resistência à compressão mínima de 1172 N/mm²; condutividade elétrica de 27% AISC.

- Classe 13: tungstênio puro; dureza 69 HRA; resistência à compressão mínima de 1379 N/mm²; condutividade elétrica de 30% AISC.

- Classe 14: molibdênio puro; dureza de 85 HRB; resistência à compressão mínima não especificada; condutividade elétrica de 30% AISC.

Além desses eletrodos, é usual o emprego de ligas cobre-zircônio e cobre-cádmio-zircônio em substituição às Classes 1 e 2 que foram acima des-

critas, devido à apresentarem maior resistência em altas temperaturas.

Uma máquina para soldagem por resistência elétrica possui vários componentes, sendo que será mais facilmente entendido seu funcionamento, se forem analisados os grupos com finalidades similares.

EQUIPAMENTOS

CIRCUITO ELÉTRICO

As instalações básicas consistem de um transformador, contadores e circuito secundário, incluindo os braços e eletrodos. A solda pode ser realizada através de corrente dos tipos: (a) CA, com transformadores mono- ou tri-fásicos, operando em frequência igual, ou diferente daquela da rede; (b) CC, de polaridade contínua; pulsada com polaridade alternada; ou, ainda com picos de corrente (banco de capacitores, por exemplo).

Independentemente do tipo de equipamento utilizado, alguns conceitos importante são gerais, ou seja:

❑ Ciclo de Trabalho

O Ciclo de Trabalho está diretamente relacionado com a vida útil do equipamento. Como visto no Capítulo 3, para as máquinas de soldagem por resistência elétrica, o mesmo é definido de uma forma diferente daquelas para processos ao arco. Nesse caso, o Ciclo de Trabalho expressa a porcentagem de tempo que a potência (em kVA) pode ser fornecida num minuto de operação. Geralmente o fabricante indica a potência máxima de trabalho do equipamento (baseado na característica do transformador) para uma ciclo de 50% (ou 30 segundos em cada 1 minuto).

O ciclo de trabalho para uma nova potência, ou vice-versa, pode ser calculado através de equação similar àquela do capítulo acima referido (a potência ocupa o lugar da corrente), a qual, por conveniência, é repetida abaixo:

$$C \cdot P^2 = C_r \cdot P_f^2 \tag{11.3}$$

onde:

C, C_r = ciclos de trabalho a ser determinado e fornecido pelo fabricante, respectivamente (%);

P, P_f = potências que se deseja operar e fornecida pelo fabricante (relativa ao C_r), respectivamente (kVA).

O seguinte exemplo pode melhor esclarecer esse ponto: Suponha que um transformador possa operar com 75 kVA a 50% do Ciclo de Trabalho (informação fornecida pelo fabricante da máquina) e se deseja saber qual a potência disponível (máxima) num novo Ciclo de Trabalho de 30%.

Da equação 11.3 resulta:

$$P = (C_r \cdot P_f^2 / C)^{1/2} = (50 \cdot 75^2 / 30)^{1/2} = 96,8 \text{ kVA.}$$

❑ Corrente de soldagem

Sumariamente, no mais simples circuito monofásico, como mostrado na Fig. 11.10, tem-se que a corrente no secundário do transformador (I_s) é dada por:

$$I_s = I_p \cdot U_p / U_s \text{ (A)} \tag{11.4}$$

onde:

I_p e I_s = corrente no primário e secundário, respectivamente;

U_p e U_s = tensões no primário e secundário, respectivamente.

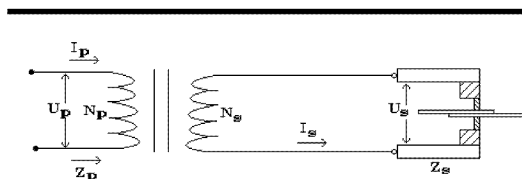


Figura 11.10 - Circuito Elétrico (monofásico) Esquemático para Soldagem por Resistência.

❑ Impedância

A utilização da corrente, com uma mínima demanda de potência, depende de uma pequena impedância do circuito.

No primário do transformador:

$$Z_p = (N_p / N_s)^2 \cdot Z_s \text{ (H)} \tag{11.5}$$

Enquanto que no circuito secundário, a mesma é dada por:

$$Z_s = (R_s + X_s)^{1/2} \quad (\text{H}) \quad [11.6]$$

onde:

N_p e N_s = número de espiras nas bobinas do primário e secundário do transformador, respectivamente;

X_s = reatância no secundário (Ω), igual à $2fL_s$, sendo f a frequência da rede e L_s a indutância no secundário (H);

R_s = resistência total do circuito no secundário, resultante da adição da resistência dos condutores, das peças e das interfaces (Ω).

A maioria das máquinas para soldagem por resistência elétrica são do tipo “energia direta”, ou seja, empregam alta corrente e baixa tensão transformadas da (baixa) corrente alternada e (alta) tensão da rede. A escolha entre um transformador mono- ou tri-fásico depende de diversos fatores, entre os quais: (a) Custo inicial; (b) Custo de manutenção; (c) Custo operacional; (d) Capacidade necessária; (e) Fator de potência; (f) Equilíbrio entre as fases da rede.

Classicamente, essas máquinas são divididas em dois grandes grupos, ou seja:

□ Equipamento Mono-Fásico

Nesse caso, como exemplificado na **Fig. 11.10**, geralmente o transformador possui somente uma espira na sua bobina primária. Na soldagem com CA, os transformadores monofásicos são mais populares, devido ao menor custo e reduzida manutenção. As desvantagens desse tipo de fonte, residem no seu baixo fator de potência e alta demanda de carga elétrica - cerca do dobro de uma trifásica de dimensão similar. Entretanto, essas máquinas podem apresentar desempenho similar às trifásicas, se possuírem controles convenientes, além de, em instalações com vários equipamentos de potência, ser possível uma distribuição equilibrada dos mesmos entre as diferentes fases.

A CC é empregada principalmente, para diminuir perdas devidas à impedância no circuito secundário do transformador. Geralmente essas máquinas retificam em onda completa a corrente através de um diodo de silício. Comparando uma mesma aplicação entre máquinas CA e CC, essa última apresentará muito menor demanda de potência, pois seu fator de potência é cerca de 90%, ou seja, em torno de 3 vezes a do outro tipo. Dessa forma, mesmo que a resistência do circuito seja maior, a demanda

de potência é pequena, permitindo uma substancial redução no tamanho do transformador.

□ Equipamento Tri-Fásico

As fontes trifásicas podem ser de dois tipos básicos, ou seja, conversor de frequência e retificador.

O transformador do equipamento conversor de frequência possui três espiras no primário, cada uma conectada a uma fase da rede, sendo que existem dois sistemas: (a) De meia onda, em que a corrente proveniente de cada fase passa, ou por dois ignitrons (nos modelos mais antigos), ou por um retificador controlado de silício (“SCR”, veja Capítulo 3); (b) De onda completa.

Por sua vez, o tipo retificador é similar àquele de máquinas monofásicas, com cada transformador conectado aos diodos de silício.

As **Tab. 11.2(a,b)** apresentam características das fontes de potência para ambos os grupos e capacidade de soldagem, o que envolve o comprimento do braço (veja logo abaixo).

DISPOSITIVOS MECÂNICOS E CONTROLES

A máquina tanto pode ser estacionária, quanto portátil. A **Fig. 11.11** ilustra esquematicamente os principais componentes de um equipamento, o qual pode ser utilizado para soldagem por Ponto, ou Projeção, ou Costura. O mesmo é composto pela base da máquina e mecanismos para movimentar os braços, os quais suportam os eletrodos e, muitas vezes, as peças.

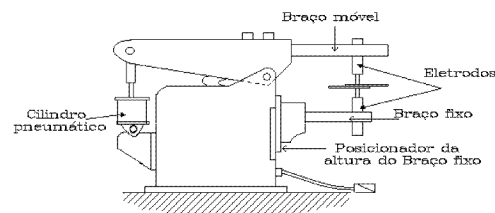


Figura 11.11 - Ilustração de uma Máquina para Soldagem por Resistência Elétrica.

O movimento do eletrodo é realizado através de alavanca (geralmente operada por pressão do pé do operador); motor, ou cilindro hidráulico. Um importante dimensão é a do braço, cujo comprimento (ou “profundidade da garganta”) influencia substancialmente a corrente disponível para soldagem, como mostrado nas duas tabelas acima mencionadas.

A máquina ainda pode ser do tipo prensa, mais utilizada para solda por Projeção. A principal diferença com relação ao modelo que foi ilustrado na última figura, reside no fato de que naquela, o braço e o eletrodo (geralmente o superior) se movimentam num caminho circular até a posição da solda, enquanto nesse caso há somente translação. Outrossim, no método de soldagem por Costura, os eletrodos são dois discos que giram pressionando a peça, sendo pelo menos um deles tracionador.

Os controles são os dispositivos responsáveis

pela manutenção do ciclo de soldagem estabelecido, podendo incluir os seguintes: (a) Magnitude da força nos eletrodos; (b) Intensidade da corrente; (c) Períodos em que a corrente e/ou força são aplicados; (d) Sincronismo no fechamento e abertura do circuito primário do transformador sobre o mesmo ponto da onda de tensão alternada; (e) Taxa com que a corrente aumenta, ou decresce.

Por sua vez, os contatores são os elementos responsáveis pela interrupção e abertura da corrente para o transformador. Esses dispositivos podem ser mecânicos; magnéticos, ou, nas máquinas

Tabela 11.2(a) - Características das Fontes de Potência de Corrente Contínua ("SCR") para Soldagem Ponto, com Alimentação Monofásica de Onda Completa

Potência* (kVA)	Corrente no Secundário (RMS-A)	Força do Eletrodo (kN)	Comprimento dos Braços do Eletrodo (mm)	Capacidade - Espessura do Material Mín./Máx. (mm)		
				Aço ao Carbono	Alumínio	Aço Inoxidável
50	27.000	4,5	750 à 1100	0,4/2,0	0,4/0,8	0,5/1,1
		5,7	750 à 900	0,4/2,4	0,4/0,8	0,5/1,3
		7,1	750	0,4/2,8	0,4/0,8	0,5/1,6
75	40.000	10,1	750 à 1200	0,5/3,6	0,5/1,6	0,6/0,2
		13,5	750 à 900	0,5/4,7	0,5/1,6	0,6/2,8
		18,0	750	0,5/6,3	0,5/1,6	0,6/3,6
125	54.000	13,5	750 à 1380	0,8/4,7	0,6/2,0	0,8/2,8
		22,5	750 à 1100	0,8/7,9	0,8/2,0	0,8/4,0
		34,2	750	0,8/9,5	0,8/2,0	0,8/5,6
250	80.000	28,3	750 à 1380	1,0/8,7	0,8/3,2	1,0/5,6
		34,2	750 à 1380	1,0/9,5	0,8/3,2	1,0/6,3
		40,9	750 à 900	1,0/11,1	1,0/3,2	1,0/9,5

* 90% Fator de Potência.

Tabela 11.2(b) - Características das Fontes de Corrente Contínua ("SCR") para Soldagem Ponto, com Alimentação Trifásica de Meia Onda

Potência* (kVA)	Corrente no Secundário (RMS-A)	Força do Eletrodo (kN)	Comprimento dos Braços dos Eletrodos (mm)	Capacidade - Espessura do Material Mín./Máx. (mm)		
				Aço ao Carbono	Alumínio	Aço Inoxidável
75	32.000	4,5	450 1100	0,4/2,0	0,4/1,0	0,5/1,1
		5,7	450 a 900	0,4/2,4	0,4/1,0	0,5/1,3
		10,1	450	0,4/3,2	0,4/1,0	0,5/1,8
150	64.000	13,5	1100 a 1400	0,8/4,7	0,6/3,2	0,8/2,8
		22,5	450 a 1100	0,8/7,9	0,8/3,2	0,8/4,0
		34,2	450 a 750	0,8/9,5	0,8/3,2	0,8/5,6
250	96.000	28,3	1100 a 1380	1,0/8,7	0,8/4,7	1,0/5,6
		34,2	900 a 1380	1,0/9,5	0,8/4,7	1,0/6,3
		40,9	600 a 900	1,0/11,1	1,0/4,7	1,0/9,5

* 85% Fator de Potência.

modernas, eletrônicos. A conexão mecânica se divide em um e dois pólos, sendo acionadas pelo operador através de uma alavanca, ou outro meio qualquer - incluindo motores - de forma que primeiro os eletrodos simplesmente aplicam pressão sobre as peças e somente após, com maior deslocamento, a corrente passa a circular. Em alguns modelos, um subsequente deslocamento da alavanca provoca a interrupção da corrente e aumenta a pressão sobre as peças. O contator magnético utiliza um eletromagneto para interromper a corrente, podendo a conexão também ser de um ou dois pólos, ou, ainda, abrindo o circuito quando a CA se aproxima da inversão. Isso aumenta a vida útil dos eletrodos, pois evita a formação de arco elétrico, o qual pode ocorrer no modelo mecânico. Ambos tipos são não-síncronos e hoje raramente empregados. Por sua vez, os contadores eletrônicos possuem a vantagem de serem síncronos, sendo que os mais antigos utilizavam ignitrons, enquanto os modernos empregam SCR. Como foi mencionado, o tempo de aplicação da corrente nesse processo é geralmente medido em relação aos "ciclos" da onda. Esse controle deve ser realizado por dispositivos síncronos (SCR), com a cor-

rente no circuito primário do transformador sendo interrompida (ou aberta) exatamente no mesmo ângulo de fase da onda da tensão, geralmente quando a corrente é zero. Portanto, é mantida constante a energia fornecida por cada ciclo. Não ocorrendo esse sincronismo, a corrente deixa de fluir em qualquer ponto sobre a sua forma de onda. Isso acarreta variação na energia de soldagem e resulta na produção de soldas com dimensões variáveis.

Esse fato é muito importante, principalmente ao soldar peças finas; materiais de alta condutividade térmica, ou com tempos inferiores a 10 ciclos.

Existem, também, dois outros importantes controles. O primeiro estabelece uma baixa corrente inicial e a eleva gradualmente, permanecendo nesse patamar por alguns (pré-determinados) ciclos. Esse procedimento é geralmente aplicado na soldagem de alumínio e aços sobre os quais foi aplicado algum tipo de revestimento protetor (tal como zinco), pois previne a expulsão do metal fundido da interface. Por outro lado, para reduzir a taxa de resfriamento da junta, principalmente na soldagem de aços temperáveis, a corrente deve decrescer lentamente.

SOLDAGEM POR PONTO

A soldagem por resistência elétrica por Ponto apresenta diversas vantagens sobre outros meios mecânicos de união, tais como rebites, ou parafusos pois, em geral, a estrutura resulta mais leve e o trabalho é realizado num menor período de tempo. Entretanto, quando é considerada a aplicação desse método, devem estar presentes suas limitações, entre as mesmas: (a) Outros processos de soldagem (ou brasagem) com junta a topo podem ser mais econômicos e/ou acrescentar menos peso à estrutura, pois é necessário a sobreposição das peças para realizar os pontos; (b) Uniões mecânicas podem ser mais práticas, caso a estrutura necessite desmontagem para inspeção, ou manutenção; (c) São relativamente baixas as propriedades mecânicas da junta, principalmente a resistência à fadiga; (d) O investimento no equipamento, é geralmente mais alto do que naqueles para soldagem ao arco elétrico com eletrodo revestido.

Várias características desse método, abaixo descritas, também são comuns àqueles por Projeção e Costura e não serão repetidas quando os mesmos forem analisados.

GEOMETRIA DO ELETRODO

Os períodos de tempo que os eletrodos necessitam manutenção, ou se tornam inutilizáveis, é uma importante consideração econômica nesse método. Grande parte desse desgaste, é devido à alta temperatura de trabalho e tempo de permanência na mesma, sendo que a vida útil dos eletrodos depende, principalmente, das corretas especificações de material e geometria para uma dada aplicação.

Em seção anterior foi descrito os materiais recomendados para os eletrodos, em função das peças que serão soldadas e das condições de trabalho. Entretanto, a funcionalidade dessa ferramenta é de fundamental importância, não somente para possibilitar a realização da junta, mas também para reduzir custos. Um conceito básico, o qual deve sempre estar presente, é que o aumento não controlado da área de contato do eletrodo com a peça, diminui a densidade da corrente e a pressão aplicada. Além disso, é primordial que as faces dos eletrodos sejam mantidas alinhadas, com respeito às peças e entre si.

Dependendo da aplicação específica, os eletrodos podem possuir os mais diversos diâmetros e diferentes geometrias. A RWMA padronizou os tamanhos dos eletrodos e tipos de faces, como apresentado na Fig. 11.12.

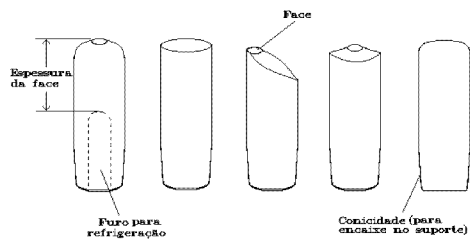


Figura 11.12 - Típicas Geometrias dos Eletrodos para Solda Ponto.

Esta padronização é realizada através de números, os quais variam de 3 a 7, sendo que multiplicados por 1/8 fornecem o maior diâmetro nominal do eletrodo em polegadas (1 polegada é igual a 25,4 mm). Como mostrado nessa figura, a distância do final do furo de refrigeração à face do eletrodo, é denominada “espessura da face”. Para uma dada taxa de extração do calor devido ao líquido de refrigeração; corrente e ciclos de soldagem, existe uma “espessura crítica” da face, para a qual a temperatura do eletrodo é mínima. Essa espessura crítica é função da distância que o calor difunde num ciclo de soldagem. Por sua vez, a refrigeração será tanto mais eficiente, quanto for otimizada a relação entre a vazão do líquido e o projeto do furo interno, incluindo a área de contato e o coeficiente de transferência de calor envolvido. Portanto, a temperatura máxima que o eletrodo alcança pode ser minimizada, dependendo dos seguintes fatores: (a) Se a espessura da face for maior do que a crítica, pela condutividade térmica do material que compõe o eletrodo; (b) Se a espessura da face for menor do que a crítica, pela taxa de extração do calor do líquido de refrigeração.

É importante salientar, que a resistência mecânica do eletrodo não deve ser afetada pelo furo de refrigeração, por onde normalmente circulará água, nem por diâmetro da ponta muito pequeno. Aliás, um superaquecimento da ponta do eletrodo provoca defeito superficial na peça, o que pode ser devido ao diâmetro se apresentar: (a) Muito pequeno, ocasionando falta de refrigeração; (b) Excessivamente grande, resultando em imperfeição no contato entre o eletrodo e a peça. Existem diversas situações, inclusive, nas quais a refrigeração deve ser realizada externamente. A Tab. 11.3 apresenta as

força máximas que podem ser aplicadas sobre os eletrodos padronizados pela RWMA.

Tabela 11.3 - Máxima Força Permitida sobre Eletrodos Padronizados pela RWMA.

Número RWMA	Máximo Diâmetro (mm)	Diâmetro da Face (mm)	Força Máxima (kN)
4	12,24	4,83	3,6
5	15,87	6,35	6,7
6	19,05	7,11	8,9
7	22,22	7,87	10,7

DISTRIBUIÇÃO DA CORRENTE DE SOLDAGEM

▪ Soldagem Direta e Indireta

Na soldagem de forma direta, a corrente e a força são aplicadas sobre as peças, por eletrodos diretamente opostos, conforme ilustrado nas Figs. 11.13(a,b), sendo o caso (a) mais usual, existindo, também, a possibilidade de se realizar múltiplos pontos, como em (b).

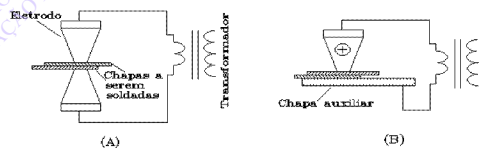


Figura 11.13 - Soldagem de Forma Direta.

Por sua vez, o modo indireto implica que a corrente percorre caminhos nas peças afastados do local exato em que será realizada a solda, com as Figs. 11.14(a,b) mostrando dois arranjos possíveis. Esse modo pode ser empregado para minimizar marcas nas superfícies das peças, provocadas pelos pontos, sendo que a Fig. 11.15 apresenta uma possível configuração.

Note-se que nas duas opções, é viável o uso de uma chapa auxiliar para conduzir a corrente, sob aquelas que sofrerão soldagem.

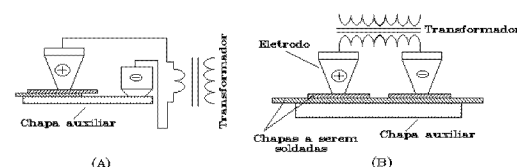


Figura 11.14 - Soldagem de Forma Indireta.

DIMENSIONAMENTO DO PONTO

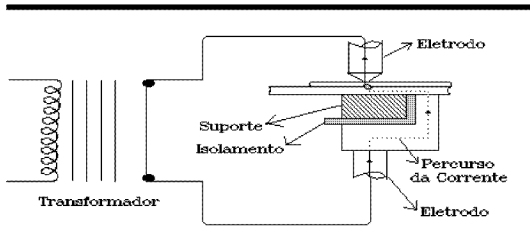


Figura 11.15 - Configuração Especial de Soldagem da Forma Indireta para Minimizar Marcas sobre a Superfície.

▪ **Soldagem em Série e Paralelo**

Essas disposições elétricas permitem que múltiplos pontos sejam realizados simultaneamente.

Na soldagem em série, a corrente circula através das peças como ilustrado nas Figs. 11.16(a,b), sendo importante observar que parte da mesma somente percorre o trajeto entre os eletrodos e, portanto, não é aproveitada para soldar. Nessa conexão, as resistências envolvidas nos diferentes pontos devem ser muito próximas, sob pena das soldas resultarem diferentes.

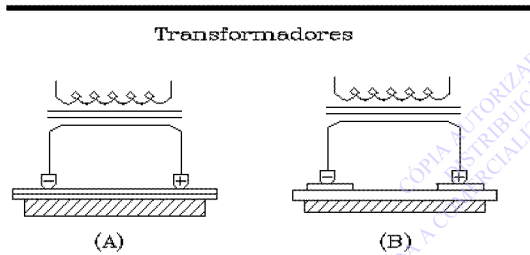


Figura 11.16 - Soldagem com Conexão Elétrica em Série.

Por outro lado, no modo de conexão elétrica em paralelo, geralmente os eletrodos estão diretamente opostos e cada par utiliza parte da corrente do circuito. A Fig. 11.17 ilustra a operação possível com um transformador trifásico.

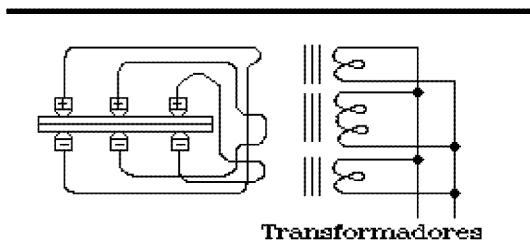


Figura 11.17 - Soldagem com Conexão Elétrica em Paralelo.

Empíricamente foram desenvolvidas equações, as quais permitem estimar o diâmetro (D) da face mais conveniente para o eletrodo. É usual relacionar este diâmetro com a espessura da peça - do lado do eletrodo considerado - sendo a relação dada por:

$$D = 5.(e)^{1/2} \text{ (mm)} \quad [11.7]$$

onde “e” (mm) é a espessura da peça.

O diâmetro do ponto assim produzido, tenderá a ser cerca de 10% maior do que o do eletrodo.

Além disso, principalmente devido à fuga de corrente que ocorre pelos pontos pré-existent, é necessário que sejam obedecidas certas regras relativas à disposição dos mesmos sobre as peças, as quais são a seguir especificadas, conforme ilustrado na Fig. 11.18.

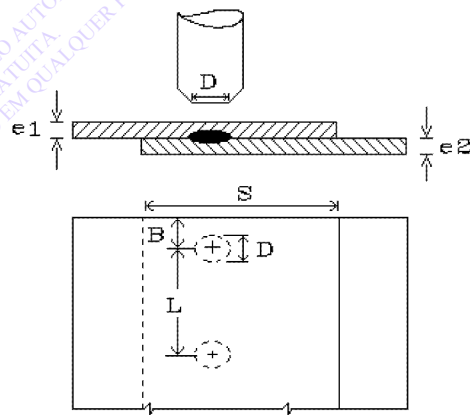


Figura 11.18 - Disposição dos Pontos sobre as Chapas.

▪ **Espaçamento Entre os Pontos**

Para peças de igual espessura ($e_1=e_2=e$), a distância entre os centros dos pontos é dada por:

$$L = 14.e+3 \text{ (mm)} \quad [11.8]$$

onde “e” (mm) é a espessura das chapas.

Com chapas de diferentes espessuras e $e_1 > e_2$ (mm), essa distância é a seguinte:

$$L = (14.e_2+3).(e_1+e_2)^{1/3} \text{ (mm)} \quad [11.9]$$

- **Largura de Sobreposição das Chapas**

Para peças de mesma espessura:

$$S = 13.(e)^{1/2} \text{ (mm)} \quad [11.10]$$

Caso as peças forem de diferentes espessuras e $e_1 > e_2$ (mm):

$$S = 13.(e_2)^{1/2} .(e_1/e_2)^{1/3} \text{ (mm)} \quad [11.11]$$

- **Distância da Borda da Peça**

Para peças de igual, ou diferentes espessuras:

$$B = S/2 \text{ (mm)} \quad [11.12]$$

PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

A seguir, sugere-se alguns procedimentos de soldagem por resistência elétrica a ponto, para diversos materiais e espessuras. As medidas de limpeza das superfícies envolvidas e outras situações específicas, analisadas nesse capítulo, devem ser consideradas no planejamento dessas soldas. Outrossim, como é possível ocorrer expulsão de metal durante a operação, medidas convenientes de segurança devem ser implementadas, principalmente a proteção dos olhos do operador e pessoal auxiliar.

- **Aços ao Carbono e Baixa Liga**

As **Tab. 11.4** e **11.5** mostram as práticas

recomendadas para soldagem do aço AISI 1010, no caso de um e múltiplos impulsos de corrente, respectivamente. Por sua vez, a **Tab.11.6** apresenta condições operacionais, com impulso único para alguns aços que necessitam ciclos de soldagem mais complexos, como têmpera e revenimento, por exemplo.

- **Aços Inoxidáveis Austeníticos**

As **Tab.11.7** e **11.8** apresentam práticas recomendadas para um e múltiplos impulsos de corrente, respectivamente.

- **Alumínio e Suas Ligas**

As **Tab. 11.9(a-d)** ilustram a possibilidade de soldagem (“soldabilidade”) entre ligas de alumínio similares e dissimilares mais usuais. Por sua vez, a **Tab. 11.10** mostra as condições de soldagem a serem empregadas para diversas dessas ligas, as quais estão especificadas na **Tab. 11.11**, juntamente com a carga média que o ponto deve resistir em cisalhamento.

- **Cobre e Suas Ligas**

A **Tab. 11.12** apresenta a soldabilidade entre várias ligas de cobre, enquanto a **Tab. 11.13** exemplifica práticas de soldagem adotadas para algumas dessas ligas, todas com espessura de 0,9 mm.

A carga média que o ponto deve suportar em cisalhamento nas ligas de latão, com mais do que 30% de zinco, é: (a) Espessura de 0,8 mm: 1,5 kN; (b) Espessura de 1,6 mm: 3,0 kN; (c) Espessura de 3,2 mm: 8,3 kN.

Tabela 11.4 - Condições de Soldagem a Ponto com Impulso Único (Aço AISI 1010)

Espessura* (mm)	Força do Eletrodo** (kN)	Corrente (kA)	Período de Soldagem (ciclos)	Carga Mínima em Cisalhamento† (kN)
0,5	1,3	6,5	6	1,4
1,0	2,2	9,5	10	4,1
1,6	3,6	12,0	14	8,3
2,4	5,8	15,5	20	15,5
3,2	8,1	19,0	26	22,5

* A espessura (e) considerada é a da chapa mais fina. A soma de espessuras das chapas não deve ultrapassar 4e. A razão máxima entre as espessuras é 2

** Eletrodos RWMA Classe 2; † Para metal base com resistência à tração menor do que 490 MPa.

Tabela 11.5 - Condições de Soldagem a Ponto com Múltiplos Impulsos (Aço AISI 1010)

Espessuras (mm)		Força do Eletrodo* (kN)	Corrente (kA)	Período da Soldagem** (ciclos)	Carga Mínima em Cisalhamento† (kN)
e1	e2				
3,2	3,2	8,1	18,0	3	22,5
3,2	4,8	8,1	18,0	3	22,5
3,2	6,3	8,1	18,0	3	22,5
4,8	4,8	8,8	19,5	6	45,0
4,8	6,3	8,8	19,5	6	45,0
4,8	7,9	8,8	19,5	6	45,0
6,3	6,3	9,7	21,5	12	67,5
6,3	7,9	9,7	21,5	12	67,5
7,9	7,9	10,8	24,0	15	90,0

* Eletrodos RWMA Classe 2; ** Cada impulso é composto de corrente circulando por 20 ciclos e desligada por 5 ciclos; † Para metal base com resistência à tração menor do que 490 MPa.

Tabela 11.6 - Condições de Soldagem a Ponto com Impulso Único (Aços que podem requerer Têmpera e Revenido na Operação)

Aço (AISI) e Condição de Fornecimento*	Espessura** (mm)	Força do Eletrodo† (kN)	Corrente (kA)		Carga Mín. em Cisalhamento (kN)	Período (ciclos)			C/T‡
			Sold.	Têmp.		Sold.	Têmp.	Reven.	
1020/LQ	1,0	6,6	16,0	14,4	6,1	6	17	6	1,48
1035/LQ	1,0	6,6	14,2	12,9	7,0	6	20	6	3,00
1045/LQ	1,0	6,6	13,8	12,1	9,0	6	24	6	2,94
4130/LQ	1,0	6,6	13,0	11,7	9,5	6	18	6	3,31
4340/NR	0,8	4,0	8,2	6,9	4,9	4	12	4	3,74
	3,2	24,7	21,8	19,2	61,6	45	240	90	3,42
8630/NR	0,8	3,6	8,6	7,6	5,5	4	12	4	2,33
	3,2	20,0	21,8	18,3	59,4	45	210	90	2,93
8715/NR	1,6	7,2	12,2	10,4	14,8	10	28	10	1,83
	3,2	20,2	22,7	19,3	57,4	45	180	90	2,83

* LQ= Laminado a Quente; NR= Normalizado e Revenido; ** Chapas de igual espessura; † Eletrodos RWMA Classe 2; ‡ C/T= Razão entre cargas de cisalhamento e tração.

Tabela 11.7 - Condições de Soldagem a Ponto com Impulso Único (Aços Inoxidáveis Austeníticos)

Espessura* (mm)	Força do Eletrodo** (kN)	Corrente (kA) para Aço com Resistência à Tração (MPa)		Período de Soldagem (ciclos)	Carga Mínima em Cisalhamento (kN) para Aços com Resistência à Tração (MPa) de		
		<1050	>1050		490-630	630-1050	>1050
0,3	1,2	2,1	2,0	3	0,8	0,9	1,1
0,5	1,8	4,0	3,2	4	1,7	2,1	2,2
1,0	4,0	7,8	6,3	6	4,5	5,7	6,3
1,6	6,7	11,0	9,0	10	8,8	10,8	13,0
2,8	12,6	17,7	14,0	18	18,9	22,5	28,8
3,2	14,8	18,0	15,5	20	22,5	27,0	34,2

* A espessura (e) considerada é a da chapa mais fina. A soma de espessuras das chapas não deve ultrapassar 4e. A razão máxima entre as espessuras é:

** Eletrodos RWMA Classes 2, 3 ou 11.

Tabela 11.8 - Condições de Soldagem a Ponto com Impulsos Múltiplos (Aços Inoxidáveis Austeníticos)

Espessura* (mm)	Força do Eletrodo** (kN)	Corrente (kA) para Aços com Resistência à Tração (MPa)		Período de Soldagem† (ciclos)	Carga Mínima em Cisalhamento (kN) para Aços com Resistência à Tração (MPa) de	
		<1050	>1050		630-1050	>1050
4,0	18,0	20,7	17,5	4	34,2	45,0
4,7	22,5	21,5	18,5	5	43,9	55,3
5,1	24,7	22,0	19,0	6	47,7	58,5
6,3	31,5	22,5	20,0	7	60,7	76,5

* A espessura (e) considerada é a da chapa mais fina. A soma de espessuras das chapas não deve ultrapassar 4e. A razão máxima entre as espessuras é:

** Eletrodos RWMA Classes 2 ou 3; † Cada impulso é composto de corrente circulando por 16 ciclos e desligada por 6 ciclos.

Tabela 11.9(a) - Soldabilidade do Alumínio e suas Ligas (Soldagem a Ponto)*

Ligas	1100-O 3003-O	1100-H12, 14, 16, 18 3003-H12, 14, 16, 18	3004-O	3004-H12, 34, 36, 38	5050-O	5050-H32, 34, 36, 38	5052-O	5052-H32, 34, 36, 38
1100-O; 3003-O	N	-	N	M	N	M	N	M(l)
1100-H12, 14, 16, 18 3003-H12, 16, 18	M	B	M(l)	B	B(l)	B(l)	M(l)	B(l)
3004-O	N	M(l)	N	M	N	M	N	M(l)
3004-H32, 34, 36, 38	M	B	M	B	M(l)	B(l)	N	B(l)
5050-O	N	M	N	M(l)	N	M(l)	N	M(l)
5050-H32, 34, 36, 38	M	B(l)	M(l)	B(l)	M(l)	B(l)	M(l)	B(l)
5052-O	N	M(l)	N	M(l)	N	M(l)	N	M(l)
5052-H32, 24, 36, 38	M(l)	B(l)	M(l)	B(l)	M(l)	B(l)	M(l)	B(l)
5056-H32, 34, 36, 38	-	-	M(l)	B(l)	-	B(l)	-	B(l)
5154-H32, 34, 36, 38	-	-	-	-	-	-	-	-
2014-T4, 6	-	-	-	-	-	-	-	B(Lc)

* Soldabilidade: B= Boa; M= Média; N= Não Recomendado.(l)= limpeza química, ou mecânica anterior à soldagem; (c)= resistência à corrosão da junta menor do que a do metal base.

Tabela 11.9(b) - Soldabilidade do Alumínio e suas Ligas (Soldagem à Ponto)*

Ligas	5056-O	5056-H32, 34, 36, 38 5154-H32, 34, 36, 38	2014-T4, 6	AlClad 2014-T4, 6 Hard-Clad R301-T3, 4, 6	2024-T3, 4	AlClad 2024-T3, 4	6061-T4, 6	6063-T5, 6	7075-T6	AlClad 7075-T6
1100-O 3003-O	-	-	-	-	-	-	M(l)	M(l)	-	-
1100-H12, 14, 16, 18 3003-H12, 16, 18	-	-	-	-	-	-	B(l)	B	-	-
3004-O	-	M(l)	-	-	-	-	M(l)	M(l)	-	-
3004-H32, 34, 36, 38	-	B(l)	-	-	-	-	B(l)	B(l)	-	-
5050-O	-	-	-	-	-	-	M(l)	M(l)	-	-
5050-H32, 34, 36, 38	-	B(l)	-	-	-	-	B(l)	B(l)	-	-
5052-O	-	-	-	-	-	-	M(l)	M(l)	-	-
5052-H32, 34, 36, 38	-	B(l)	B(l,c)	B(l)	B(l,c)	B(l)	B(l)	B(l)	B(l,c)	B(l)
5056-O	N	M	-	-	-	-	M(l)	M(l)	-	-
5056-H32, 34, 36, 385154-H32, 34, 36, 38	M	B	-	-	-	-	B(l)	B(l)	-	-
2014-T4, 6	-	-	B(l,c)	B(l)	B(l,c)	B(l,c)	B(l,c)	B(l,c)	B(l,c)	B(l,c)

* Soldabilidade: B=Boa; M=Média; (l)= limpeza química, ou mecânica anterior à soldagem; (c)= resistência à corrosão da junta menor do que a do meta base.

Tabela 11.9(c) - Soldabilidade do Alumínio e Suas Ligas (Soldagem a Ponto)*

Ligas	11100-O 33003-O	1100-H12, 14, 16 3003-H12, 14, 16, 18	3004-O	3004-O-H12, 34, 36, 38	5050-O	5050-H32, 34, 36, 38	5052-O	5052-O-H32, 34, 36, 38	5056-O
AlClad 2014-T4, 6 Hardclad R301-T3, 4, 6	-	-	-	-	-	-	-	B(l)	-
2024-T3, 4	-	-	-	-	-	-	-	B(l,c)	-
AlClad 2024-T3, 4	-	-	-	-	-	-	-	B(l)	-
6061-T4, 6	M(l)	B(l)	M(l)	B(l)	M(l)	B(l)	M(l)	B(l)	M(l)
6063-T5, 6	M(l)	B(l)	M(l)	B(l)	M(l)	B(l)	M(l)	B(l)	M(l)
7075-T6	-	-	-	-	-	-	-	B(l,c)	-
AlClad 7075-T6	-	-	-	-	-	-	-	B(l)	-

* Soldabilidade: B=Boa; M=Média; (l)= limpeza química, ou mecânica anterior à soldagem; (c)= resistência à corrosão da junta menor do que a do meta base.

Tabela 11.9(d) - Soldabilidade do Alumínio e suas Ligas (Soldagem a Ponto)*

Ligas	5056-H32, 34, 36, 38 5154-H32, 34,36, 38	2014-T4, 6	AiClad	2014-T3, 4	AiClad	6061- T4, 6	6063-T5, 6	7075- T6	AiClad
			2014-T4, 6 HardClad R301-T3, 4, 6		2014-T3, 4				7075-T6
AiClad 2024-T4, 6 HardClad R301-T3, 4, 6	-	B(l)	B(l)	B(l,c)	B(l)	B(l)	B(l)	B(l,c)	B(l)
2024-T3, 4	-	B(l,c)	B(l,c)	B(l,c)	B(l,c)	B(l,c)	B(l,c)	B(l,c)	B(l,c)
AiClad 2024-T3, 4	-	B(l,c)	B(l)	B(l,c)	B(l)	B(l)	B(l)	B(l,c)	B(l)
6061-T4, 6	B(l)	B(l,c)	B(l)	B(l,c)	B(l)	B(l)	B(l)	B(l,c)	B(l)
6063-T5, 6	B(l)	M(l,c)	B(l)	B(l,c)	B(l)	B(l)	B(l)	B(l,c)	B(l)
7075-T6	-	B(l,c)	B(l,c)	B(l,c)	B(l,c)	B(l,c)	B(l,c)	B(l,c)	B(l,c)
AiClad 7075-T6	-	B(l,c)	B(l)	B(l,c)	B(l)	B(l)	B(l)	B(l,c)	B(l,c)

* Soldabilidade: B=Boa; M=Média. l= limpeza química, ou mecânica anterior à soldagem; c= resistência à corrosão da junta menor do que a do met base.

Tabela 11.10 - Condições de Soldagem com Impulso Único para o Alumínio e suas Ligas (Diversos Tipos, Veja Tab. 11.11 para carga Mínima em Cisalhamento)

Espessuras (mm)		Força do Eletrodo* (kN)	Corrente** (kA)			Tempo† (ciclos)	
e1	e2		PA	Sold.	Pós	Sold.	Pós
0,8	0,8	2,2	7,5	25,0	15,0	8	10
0,8	1,6	2,7	8,5	28,0	17,0	10	12
0,8	2,3	3,4	10,0	33,0	20,0	12	16
0,8	3,2	4,5	11,5	38,0	23,0	12	16
1,6	1,6	3,4	10,0	33,0	20,0	12	16
1,6	2,3	4,5	11,5	38,0	23,0	12	16
1,6	3,2	5,4	12,0	40,0	24,0	12	18
2,3	2,3	5,4	12,0	40,0	24,0	12	18
2,3	3,2	7,2	13,5	45,0	27,0	14	18
3,2	3,2	9,0	15,0	50,0	30,0	15	20

* Eletrodos RWMA Classe 1; ** PA= intensidade de corrente entre o final da fase de compressão e o início da fase soldagem, sendo 30% do valor da corrente desta fase; Pós= intensidade de corrente após a fase de soldagem, até o final da operação se mantendo em 60% do valor da corrente c soldagem; † O tempo para a corrente aumentar de 30% da corrente de soldagem para o valor final da mesma, é fixo e igual a 4 ciclos, no intervalo de espessuras considerado. O mínimo tempo de compressão e manutenção deve ser de 15 ciclos.

Tabela 11.11 - Carga Mínima ao Cisalhamento (kN) para as Ligas de Alumínio Soldadas a Ponto em Condições Similares Àquelas Especificadas na Tab.11.10*.

Espessuras (mm)		5052-H34 com				6061-T6 com			3003-H14 com		2024-T3 com
e1	e2	5052-H34	6061-T6	2024-T3	3003-H14	6061-T6	2024-T3	3003-H14	3003-H14	2024-T3	2024-T3
0,8	0,8	1,8	1,8	2,0	1,4	1,8	1,8	1,4	1,3	1,3	1,8
0,8	1,6	2,9	3,0	2,9	2,5	2,9	2,9	2,4	2,5	2,8	3,1
0,8	2,3	4,7	4,2	4,3	2,7	4,7	4,0	2,7	3,8	3,0	5,2
0,8	3,2	6,5	5,2	5,8	4,7	6,5	4,9	3,6	4,9	3,3	7,2
1,6	1,6	5,1	4,7	5,3	4,5	4,7	4,9	4,0	3,4	3,8	5,2
1,6	2,3	6,5	6,5	7,4	6,3	6,5	7,0	6,5	4,9	5,2	7,2
1,6	3,2	8,3	7,4	7,9	7,6	8,3	7,5	7,0	5,4	5,4	8,8
2,3	2,3	8,1	9,0	8,12	6,7	7,4	8,2	7,0	4,9	5,8	9,0
2,3	3,2	9,0	9,7	12,1	8,0	7,6	10,8	7,4	5,6	7,4	10,1
3,2	3,2	10,1	8,5	15,7	9,0	10,1	11,7	7,2	6,7	8,1	13,5*

* Força do eletrodo 13,5 kN. Tempos iguais e correntes 10% maiores do que aquelas indicadas para a mesma combinação de espessuras na Tab.11.10.

Tabela 11.12 - Soldabilidade do Cobre e Suas Ligas (Soldagem a Ponto)

Ligas	Composição Química Nominal (%)	Soldabilidade*
Alpaca	65Cu/20Zn/15Ni	B
Bronze de AlD	91Cu/7Al/1Mn/2Fe	B
Bronze de AlE	82Cu/9,5Al/1Mn/2,5Fe/5Ni	B
Bronze de Mn-A	58,5 Cu/39Zn/1Sn/1,4Fe/0,1Mn	B
Bronze de P-A	95Cu/5Sn/0,2P	B
Bronze de Si-A	97Cu/3Si	B
Cobre/Be†	96,9Cu/0,6Be/2,5Co	B
Cobre/Be‡	98,1Cu/1,9Be	B
Cobre desoxidado ao P	99,9Cu/0,02P	N
Cobre livre de O ₂	99,95Cu	N
Latão de Al	77,5Cu/20Zn/2,2Al/0,06As	B
Latão Amarelo	65Cu/35Zn	M
Latão para Cartuchos	70Cu/30Zn	M
Latão de Mn	70Cu/28Zn/1,2Mn	B
Latão Naval	60Cu/39Zn/0,06As, ou Sb, ou P	B
Latão de Si	90Cu/8,5Zn/1,2Si	B
Latão Vermelho	85Cu/15Zn	N

* Soldabilidade: B=Boa; M=Média; N=Não recomendado. † Alta Condutividade Elétrica; ‡ Alta Resistência Mecânica.

Tabela 11.13 - Condições de Soldagem a Ponto com Impulso Único (Cobre e Suas Ligas)*

Ligas (Vide Tab.11.12)	Força do Eletrodo** (kN)	Corrente de Soldagem (kA)	Período de Soldagem (ciclos)
Bronze de Al-E	2,3	21,0	4
Bronze de P-A	2,3	19,5	6
Bronze de Si-A	1,8	16,5	6
Latão de Al	1,8	24,0	4
Latão Amarelo	1,8	24,0	4
Latão para Cartucho	1,8	25,0	4
Latão de Mn	1,8	22,0	6
Latão de Si	2,3	22,0	6
Latão Vermelho	1,8	25,0	6

* Chapas com espessura de 0,9 mm; ** Eletrodos RWMA Classe 1.

SOLDAGEM POR PROJEÇÃO

Esse método é utilizado numa grande variedade de peças, geralmente com geometrias mais complexas do que aquelas que podem ser soldadas por Ponto. O mesmo é especialmente conveniente, naquelas situações em que pelo menos uma das peças foi, ou estampada; ou forjada; ou se deseja conectar elementos, tais como parafusos, ou pinos, numa outra superfície (plana, ou não), tal como ilustrado nas **Figs. 11.19(a-c)**. A soldagem por Projeção é muito similar à por Ponto, principalmente a fonte de potência e demais dispositivos de controle, sendo que a intensidade da corrente utilizada é geralmente menor. Entretanto, uma de suas mais importantes características é a habilidade de realizar várias soldas simultâneas, cujos locais são determinados exatamente pelas projeções.

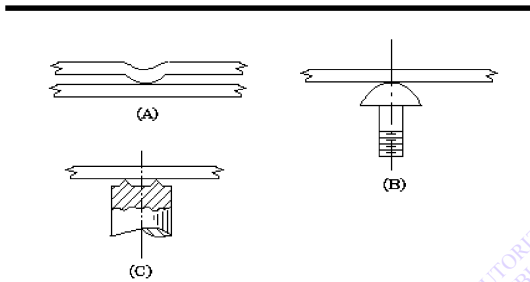


Figura 11.19 - Algumas Aplicações da Soldagem por Projeção.

Os eletrodos possuem faces planas, como o típico exemplo de solda múltipla ilustrada na **Fig. 11.20**. A razão entre os diâmetros do eletrodo e da projeção depende da técnica utilizada sendo, no mínimo, igual a: (a) 2, para uma única solda por vez; (b) 1, para soldas múltiplas.

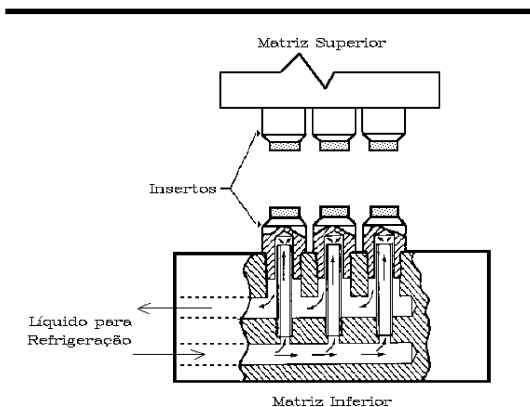


Figura 11.20 - Exemplo de Solda por Projeção Múltipla.

Os materiais para os eletrodos geralmente recaem em dois tipos da RWMA, ou seja: (a) Insertos do Grupo B sobre as faces, para grandes produções; (b) Grupo A, numa peça inteira para menores produções, pois é mais econômico.

Por outro lado, a geometria da projeção exerce grande influência sobre a densidade de corrente e, como consequência, qualidade da junta. Para que a projeção resulte com as dimensões desejadas, é preciso desenvolver o punção e a matriz, os quais podem ser construídos em aço ferramenta. A **Fig. 11.21** ilustra dimensões típicas, sendo que a **Tab. 11.14** fornece valores para as mesmas. O diâmetro do punção é constante nos seguintes intervalos de espessuras das chapas: (a) Entre 0,5 e 1,9 mm, igual a 9,5 mm; (b) Entre 2,3 e 6,2 mm, igual a 12,7 mm. Além disso, é guardada aproximadamente a razão de 0,84 entre os diâmetros da matriz e da projeção.

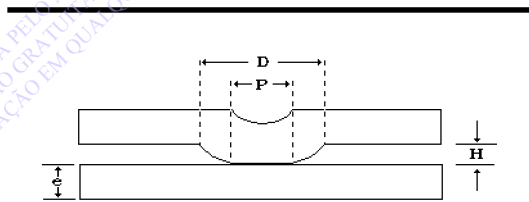


Figura 11.21 - Dimensões (referidas na Tab.11.13) para o Projeto da Projeção.

Tabela 11.14 - Soldagem por Projeção (Dimensões Ilustradas na Fig. 11.21)

Espessura da Peça-e (mm)	Altura da Projeção-H (mm)	Diâmetro da Projeção-D (mm)	Diâmetro da Ponta do Punção-P (mm)
0,5	0,6	2,5	0,7
0,7	0,7	3,0	0,8
1,0	0,9	3,5	1,2
1,5	1,1	4,2	1,6
2,0	1,3	4,8	1,6
2,5	1,4	5,2	1,9
3,0	1,5	4,4	2,0
4,0	1,7	5,0	2,3
5,0	1,8	5,3	2,4
6,0	1,9	5,6	2,5

Por sua vez, a **Tab. 11.15** apresenta algumas condições para soldagem por projeção de folhas de aço baixo carbono. Entretanto, a técnica exata de realizar a Projeção depende de cada caso, pois a taxa de aplicação da força deve ser suficientemente lenta, para não provocar um prematuro colapso (a frio) da projeção, com a aplicação da corrente ocorrendo logo após as peças manterem contato.

As soldas por Projeção apresentam menos intensas marcas superficiais do que aquelas por Ponto, além de serem posicionadas com maior precisão e realizadas com menor corrente. Entretanto, a produção da projeção é uma operação adicional, bem como há necessidade de um preciso alinhamento entre os eletrodos, principalmente na solda múltipla, sob pena de ocorrer desequilíbrio da força e corrente aplicada.

Tabela 11.15 - Condições para Soldagem por Projeção de Folhas de Aço Baixo Carbono

Tamanho da Projeção (mm)	Ciclos de Soldagem (60Hz)	Corrente (kA)	Força por Projeção (kN)
0,6	16 à 48	5,5	0,5
0,8	16	6,7	0,9
	24 à 48	6,5	0,9
1,0	24	7,7	1,5
	32 à 48	7,4	1,5
1,5	24	9,3	2,2
	32 à 48	8,9	2,2
2,0	32	10,3	3,3
	40 à 48	10,1	3,3
3,0	32	11,4	4,7
	40 à 48	11,1	4,7

SOLDAGEM POR COSTURA

Nesse método, eletrodos em forma de discos transmitem corrente e pressionam as peças. Geralmente são realizadas juntas contínuas, através da sobreposição das soldas, mas a mesma também pode ser formada por pontos isolados. Apesar de ser possível produzir soldas contínuas pelo método por Ponto (sobrepondo-os), a operação é muito menos prática.

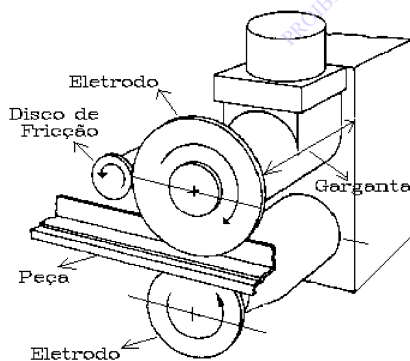


Figura 11.22(a) - Equipamento básico para Soldagem por Costura.

A **Fig. 11.22(a)** ilustra uma típica disposição para a soldagem por Costura, nesse caso com a rotação do disco superior devida à sua fricção com um disco auxiliar, resultando no tracionamento das peças. Também podem ser realizadas soldas por vários pares desses eletrodos operando lado a lado, ou com dois discos eletricamente conectados em

série, conforme mostrado na **Fig. 11.22(b)**.

Existem outras variantes desse método, tais como aqueles apresentado nas **Figs. 11.23(a-d)**, ou seja: (a) Junta obtida por conformação plástica e difusão (na fase sólida), com uma, ou ambas as peças sendo deformadas; (b) Interposição de um arame de cobre (não consumível, sendo o mesmo utilizado várias vezes) entre os eletrodos e as peças, empregado para concentrar o calor, principalmente em juntas de latas de aço revestidas com estanho (folha-de-flandres); (c) União a topo de folhas, através da soldagem de uma fina tira metálica (consumível), interposta entre o disco e a peça, num ou nos dois lados da junta; (d) Soldagem a topo de tubos, para aplicações menos exigentes, resultando sobre-metal (interna e externamente) extrudado pela pressão aplicada lateralmente, o qual não pode ser retirado.

Um outro emprego desse método, como já dito, é para a produção de pontos espaçados na junta.

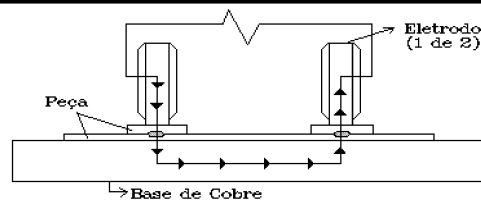


Figura 11.22(b)- Solda por Costura, com os Discos conectados eletricamente em série.

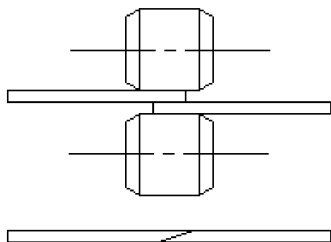


Figura 11.23(a) - Soldagem por Costura com Deformação Plástica.

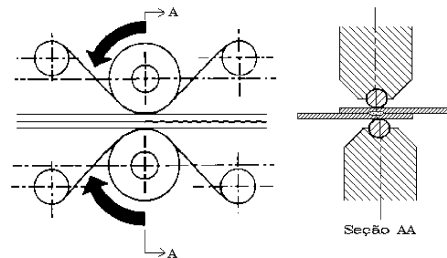


Figura 11.23(b) - Soldagem por Costura com Concentração do Calor (arame de cobre).

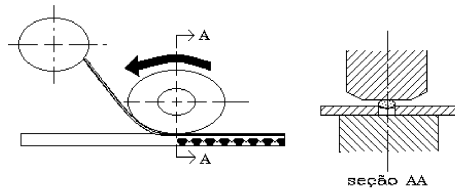


Figura 11.23(c) - Soldagem por Costura com Tira Metálica.

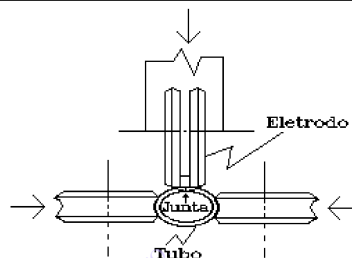


Figura 11.23(d) - Soldagem de Tubos a Topo por Costura.

Os eletrodos (discos) geralmente são produzidos com materiais do Grupo A da RWMA. Como nos casos anteriores, o projeto dos mesmos exerce grande influência sobre a vida da ferramenta e qualidade das soldas produzidas, sendo as seguintes principais dimensões que os caracterizam: (a) Diâmetro; (b) Largura da face; (c) Perfil da face. As dimensões são determinadas pelas características das peças que serão soldadas e as **Figs. 11.24(a-c)** apresentam alguns perfis mais utilizados, com o caso (b) podendo se apresentar chanfrado em ambos os lados. Entretanto, a refrigeração do disco e sua montagem são, em grande parte, responsáveis pela eficiência com que a operação é realizada. Os procedimentos mais adotados de refrigeração, são realizar a solda submersa, ou dirigir um jato de fluido contra a junta. Na hipótese de não ser alcançado o resultado desejado, o braço e o disco devem ainda ser refrigerados internamente.

A soldagem pode ser realizada com os discos

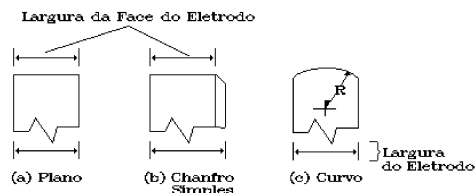


Figura 11.24 - Geometrias Típicas dos Eletrodos (Discos).

em movimentos contínuo, ou intermitente, sendo uma dessas técnicas geralmente combinadas com os seguintes tipos de correntes:

- Alternada aplicada de forma constante, com movimento contínuo dos discos.

Não é muito utilizada, pois somente pode ser empregada com velocidade baixa e, geralmente, sobre peças com 1mm de espessura cada uma no máximo, sendo que acima desse valor diminui em muito a vida do eletrodo. Além disso, é possível se produzir arco no final da solda, quando as peças deixam os eletrodos, o que pode provocar fusão superficial em ambos.

- Corrente pulsada com movimento contínuo, ou intermitente dos discos.

Esse tipo de corrente - tal como o termo é geralmente empregado na soldagem por resistência elétrica - varia entre zero e uma amplitude máxima, em períodos de tempo pré-determinados, como ilustrado na **Fig. 11.25(a)**. É a mais indicada para a maioria das operações, pois permite maior controle sobre a geometria do ponto; efetua um certo forjamento no resfriamento e minimiza a distorção.

- Corrente modulada, com movimento contínuo dos discos.

Essa corrente varia entre amplitudes míni-

ma e máxima, em períodos de tempo pré-ajustados, sendo ilustrada na Fig.11.25(b).

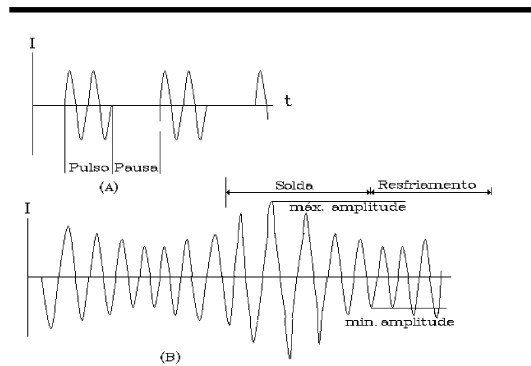


Figura 11.25 - Solda por Costura: (a) Com Pulsos de Corrente; (b) Com Corrente Modulada.

O ciclo da soldagem por Costura, é geralmente determinado pela razão entre os períodos em que a corrente circula (ou “de aquecimento”) e de resfriamento. A intensidade dessa corrente determina a penetração (profundidade do ponto nas peças) e, quando em excesso, produz entalhes superficiais. Na falta de uma prática aceita, o diâmetro do ponto deve ser cerca de 3,5 vezes a espessura da peça mais fina. A proporção de sobreposi-

ção dos pontos depende da finalidade das juntas, ou seja, esse fator é cerca de 50% para máxima resistência, enquanto que para suficiente estanqueidade, basta o mesmo alcançar 25%, sendo o número de pontos por unidade de comprimento da junta inversamente proporcional à espessura da peça. Aliás, a razão entre os números de pontos realizados por unidade de tempo e por unidade de comprimento, determina a velocidade de soldagem. Por sua vez, o número de pontos por unidade de tempo, é estabelecido pela razão entre a frequência da corrente alternada utilizada e a soma dos ciclos de aquecimento e resfriamento de uma única solda.

Conforme aumenta a velocidade de soldagem, deve também ser elevada a razão entre os períodos de aquecimento e resfriamento, para que a sobreposição e a penetração dos pontos se mantenha aproximadamente constante. Em peças com espessuras acima de cerca de 5 mm, ou cujos materiais requerem pós-aquecimento, ou forjamento, é necessário que a solda seja realizada de forma intermitente. Entretanto, em geral, a junta é produzida num movimento contínuo.

A Tab. 11.16 apresenta condições para soldagem por Costura, de chapas de aço baixo carbono em diversas espessuras.

Tabela 11.16 - Soldagem por Resistência Elétrica (Costura) do Aço AISI 1010

Espessura* (mm)	Largura do Eletrodo** (mm)		Força do Eletrodo (kN)	Aquecimento (ciclos)	Resfriamento (ciclos)	Velocidade de Soldagem (mm/s)	Corrente (kA)	Sobreposição (mm)	Número de Soldas (por cm)
	Disco	Face							
0,25	9,5	4,8	1,8	2	1	34	8,0	9,5	6
0,53	9,5	4,8	2,4	2	2	32	11,0	11,1	5
0,79	12,7	6,4	3,1	3	2	30	13,0	12,7	3,9
1,02	12,7	6,4	4,0	3	3	28	15,0	12,7	3,5
1,27	12,7	7,9	4,7	4	3	27	16,5	14,3	3,1
1,57	12,7	7,9	5,3	4	4	26	17,5	15,9	2,7
1,98	15,9	9,5	6,7	6	5	23	19,0	17,5	2,4
2,39	15,9	11,1	7,6	7	6	21	20,0	19,0	2,2
2,77	19,0	12,7	8,7	9	6	20	21,0	20,6	2,0
3,17	19,0	12,7	9,8	10	7	19	22,0	22,2	1,8

* Espessura da peça mais fina, com o somatório das espessuras não excedendo 4 vezes a mesma; ** Eletrodo RWMA Classe 2, sendo considerada a largura da face, aquela que efetivamente mantém contato com a peça

**C
A
P
Í
T
U
L
O

12**

**SOLDAGEM POR
CENTELHAMENTO**

INTRODUÇÃO	270
EQUIPAMENTOS	271
Fontes de Potência e Controles	271
Matrizes e Eletrodos	271
VARIÁVEIS DE PROCEDIMENTO	272
Distribuição de Energia	273
Parâmetros e Condições Gerais	274
PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM	275

INTRODUÇÃO

Na soldagem por centelhamento, as peças são rigidamente fixadas por distintas matrizes, com pelo menos um conjunto móvel e ambas condutoras de eletricidade.

Conforme ilustrado esquematicamente na **Fig. 12.1(a)**, inicialmente as faces das peças são aproximadas, de tal forma que somente as diminutas saliências superficiais mantêm contato, ou permanecem muito próximas. É, então, aplicada uma diferença de potencial e com a passagem da corrente elétrica, esses pontos fundem. A seguir, essas superfícies são ligeiramente afastadas, formando-se nesse momento vários pequenos arcos elétricos, ou “pontes”, mostradas na **Fig. 12.1(b)**. O suporte móvel avança novamente e o ciclo se repete, sendo que em cada etapa há expulsão do metal das “pontes” de maneira quase pirotécnica, daí derivando o nome deste processo em inglês (“flash”).

O aquecimento das superfícies é realizado pela atuação conjunta dessas pontes e da resistência elétrica entre as mesmas. Quando uma parte da superfície se encontra uniformemente aquecida no estado plástico e uma fina camada está parcialmente fundida, as superfícies são pressionadas uma contra a outra, conforme ilustrado na **Fig. 12.1(c)**. O metal fundido é expelido e aquele que está na fase plástica se deforma, fluindo para a superfície e formando um excesso em torno da junta, ou recalque (em inglês “upset”), como mostrado na **Fig. 12.1(d,e)**. Nesse instante, as impurezas superficiais existentes nas superfícies foram eliminadas e as mesmas estão metalúrgicamente unidas.

Devido às características apresentadas, o centelhamento é enquadrado como um processo de resistência elétrica e deve ter evoluído do tipo à

topo. Os equipamentos são bastante similares, com as aplicações se estendendo por: indústria aeroespacial; em estruturas maciças e tubulares; automotivas; ferramentas, onde a parte útil é unida a um material de menor custo; serras de corte; perfuratrizes; além de outros componentes como na fabricação de tubos com costura onde a chapa, após ter sido calandrada, sofre uma solda longitudinal e máquinas com até 6000 kVA são utilizadas.

Os materiais normalmente soldados por centelhamento são todos aqueles que podem ser forjados, com uniões de alta resistência mecânica e qualidade, incluindo os aços ao carbono, baixa liga e inoxidáveis; ligas de alumínio, cobre, magnésio, titânio e níquel. Ligas de muito baixo ponto de fusão, tais como chumbo, ou zinco, não podem ser soldadas por este processo, bem como aquelas tóxicas, sendo exemplo clássico as de berílio. Principalmente devido às altas taxas de resfriamento envolvidas, é difícil soldar ferros fundidos com esse processo. Entretanto, muitos materiais dissimilares podem ser soldados por centelhamento e em diversas situações é possível pré-aquecer as peças.

Por outro lado, a força necessária para a soldagem é associada ao gradiente de temperatura da peça na fase plástica e à resistência à compressão do material nessa temperatura. Especificamente para os aços, é usual classificá-los com base na resistência ao forjamento dos mesmos, ou seja: (a) Baixa resistência, sendo típicos os AISI 1020, 1112, etc.; (b) Média resistência, exemplificados pelos AISI 1045, 1065, 4130, 4140, etc.; (c) Alta resistência, entre outro, o AISI 4640; inoxidáveis; de corte rápido; para matrizes.

O processo aqui analisado é mais conveniente do que a fundição, ou o forjamento numa série de situações, principalmente se custos for uma importante consideração. Além de se adaptar perfeitamente a praticamente qualquer perfil de peça e diversos materiais, a junta pode apresentar propriedades mecânicas iguais ou maiores que as dos metais base, com uma muito pequena ZAC. Outrossim, o centelhamento é um processo adequada para alta taxa de produção, sendo que a mesma geralmente dependente dos tempos de carregamento/descarregamento da máquina e não da soldagem propriamente dita.

A operação em si do processo, entretanto, é uma das principais desvantagens do seu emprego. A grande quantidade de partículas fundidas que

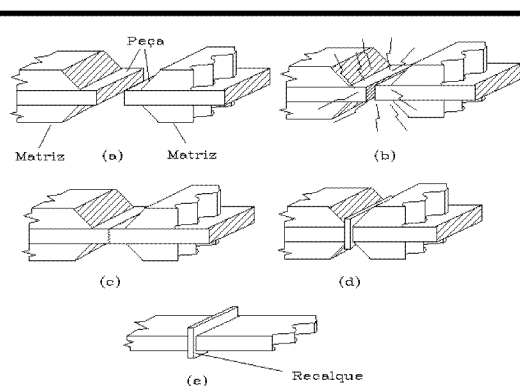


Figura 12.1 - Seqüência Esquemática da Soldagem por Centelhamento (Vide Texto).

são expelidas durante a união, determina que a solda seja realizada em câmara semi-fechada e, mesmo assim, grande parte das mesmas atingem áreas ao redor. O equipamento é relativamente volumoso; o recalque (excesso de material) na jun-

ta muitas vezes necessita ser removido por usinagem; o alinhamento entre as partes que serão soldadas é crítico e grande a pressão de forjamento, exigindo que a máquina seja muito resistente e rígida.

EQUIPAMENTOS

FONTES DE POTÊNCIA E CONTROLES

As fontes de potência utilizadas na soldagem por centelhamento são similares àquelas de resistência elétrica. Usualmente é empregada CA, com transformador monofásico de baixa impedância, capaz de fornecer tensão entre 2 e 24 V e cerca de até 180 A por mm² da área da superfície a ser soldada. Como essa área depende da corrente elétrica e da força que será exercida sobre as faces, esses são os primeiros itens que devem ser decididos para a definição do equipamento a ser adquirido, apesar dos procedimentos de soldagem geralmente não fornecerem a corrente exata para um dado trabalho. Isso se deve ao fato de que, após as peças serem posicionadas, a máquina é regulada para uma baixa tensão no secundário do transformador, permitindo que a operação de formação das pontes ocorra estavelmente, resultando do valor da mesma a corrente de soldagem.

O equipamento completo é composto, então, pela fonte de potência e as bases de suporte para as peças, sendo que pelo menos uma delas deve ser móvel, com o deslocamento e a força podendo ser aplicados manualmente; por motores, ou hidráulicamente, dependendo do nível de precisão; velocidade de operação e carga necessária. A **Tab. 12.1** apresenta as características mecânicas e potências elétricas do equipamento, necessárias para a soldagem de vários materiais. As mesmas podem ser utilizadas como orientação preliminar na definição da máquina que será adquirida.

Outrossim, uma série de controles são requeridos para a correta soldagem por este processo, sendo importante que as seguintes operações possuam medidores e atuadores disponíveis: (a) Tempos de: pré-aquecimento; formação das pontes; aplicação da pressão; circulação da corrente; soldagem; pós-aquecimento; (b) Força aplicada; (c) Corrente (a corrente durante a formação das pontes é instável); (d) Tensão (mesma observação anterior); (e) Velocidade de Deslocamento das Peças.

Tabela 12.1 - Capacidades Típicas dos Equipamentos para Soldagem por Centelhamento

Material	Área (cm ²)	Pressão de Recalque (MPa)
Aços ao C e Baixa Liga	387	192
Aços Inoxidáveis Austeníticos	258	192
Aços Inoxidáveis Martensíticos	142	350
Aços Maraging	97	513
Aço 4340 (modificado)	213	233
Ligas de Alumínio	90	549
Ligas de Cobre	26	175
Ligas de Níquel	161	308
Ligas Resistentes ao Calor	161	308
Ligas de Titânio	258	192

* A Potência Elétrica, para as áreas consideradas, é de 1500 kVA nos Aços ao carbono e baixa liga; 600 kVA para as Ligas de Cobre e 1600 kVA para todos os outros materiais

MATRIZES E ELETRODOS

As matrizes de sujeição das peças e os eletrodos, são de fundamental importância para o bom andamento do processo. Geralmente, ambas funções são realizadas pelo mesmo componente, o qual não está em contato direto com a solda - de forma diferente do processo por resistência elétrica analisado no Capítulo 11.

Os materiais utilizados devem possuir baixa condutividade elétrica, além de alta resistência mecânica e dureza (para não sofrer amassamento). Geralmente se emprega como eletrodo o especificado pela RWMA ("Resistance Welder Manufacturers' Association") classe 3 (vide Capítulo 11), sendo que aços para matrizes tipo AISI H11, 01, etc., também são utilizados, principalmente quando a soldagem será sobre alumínio.

Não existem projetos gerais para o eletrodo, pois sua geometria depende da peça; da força e da corrente envolvida. Geralmente, o mesmo deve ser

refrigerado com água circulando pelo seu interior, sendo que sua área de contato com a peça precisa ser compatível com os materiais e corrente empregada, pois a densidade de corrente nessa interface deve ser pequena. Esses elementos de fixação geralmente envolvem toda a peça, conforme ilustrado esquematicamente na **Fig. 12.2(a)**, em que o tipo I é o convencional, enquanto o II possui recesso, para permitir um mais fácil escoamento do recalque que se forma. Os eletrodos podem alcançar grande nível de complexidade, como mostrado na **Fig. 12.2(b)** para um perfil complexo, onde o mesmo possui três partes, as quais atuam na vertical e horizontal. No caso de tubos, geral-

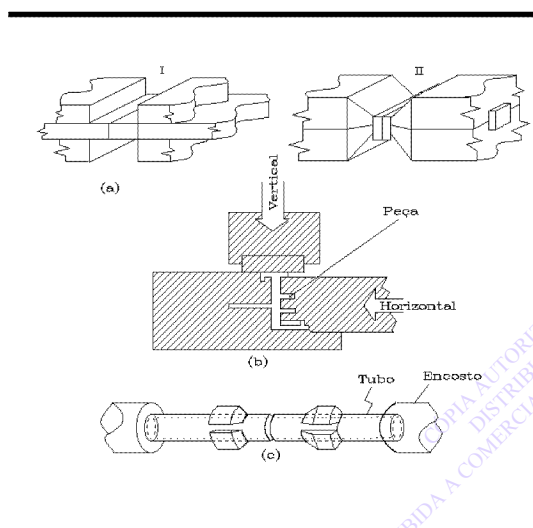


Figura 12.2 - Algumas Configurações dos Elementos de Fixação (Eletrodos) das Peças.

mente é necessário a utilização de encostos situados após o eletrodo, como exibido na **Fig. 12.2(c)** pois, caso contrário, a peça poderá sofrer deformação.

Como orientação, a **Tab. 12.2** apresenta os comprimentos mínimos que os elementos de fixação devem possuir, sendo aplicados para peças de aços com pequena e média resistência ao forjamento e nas formas maciças ou tubos, com aqueles de diâmetros superiores a 35 mm utilizando encosto.

Tabela 12.2 - Típicos Comprimentos dos Elementos de Fixação na Soldagem por Centelhamento

Mínima Dimensão da Seção (mm)	Comprimento da Matriz (mm)	
	Com Encosto	Sem Encosto
6	10	25
10	10	40
13	10	45
19	13	50
25	19	65
40	25	80
50	30	-
80	50	-
100	65	-
130	70	-
150	80	-
180	95	-
200	110	-
230	120	-

VARIÁVEIS DE PROCEDIMENTO

A seguinte seqüência pode exemplificar um ciclo simples de soldagem por centelhamento, sendo que nem sempre é necessário utilizar todas as fases apresentadas, com somente aquelas marcadas (*) essenciais para todos os materiais e aplicações:

- Carregamento da Máquina e Fixação das Partes*;
- Contato das Faces*;
- Pré-Aquecimento, através da Circulação de Corrente;
- Interrupção da Corrente e Afastamento das Faces;

- Aproximação das Faces, de forma que somente as diminutas saliências superficiais das mesmas mantenham contato*;
- Aplicação de Alta Tensão (diferente daquela de soldagem) e formação das pontes entre as saliências;
- Redução da Tensão para aquela de Soldagem e Manutenção das Pontes*;
- Compressão das Faces, formando o Recalque*;
- Interrupção da Pressão e Circulação da Corrente para realizar Pós-Aquecimento;
- Interrupção da Corrente*;
- Usinagem do Recalque;

- Soltar e Descarregar a Peça*.

Dessa forma, a **Fig. 12.3** ilustra um típico ciclo, com as relações no tempo das variáveis corrente, pressão e deslocamento das peças, destacando-se os seguintes fatores e etapas:

- Corrente (a), com as seguintes Intensidades: I_1 de pré-aquecimento; I_2 de centelhamento; I_3 de pós-aquecimento; I_r de recalque;
- Pressão (b), com as magnitudes: P_1 no pré-aquecimento; P_r no recalque;
- Deslocamento da Interface da Solda (c),

com o material perdido igual a $D_r - D_1$.

- Tempos em que Ocorrem as Operações: T_0 de pré-aquecimento; T_c do centelhamento; T_r no recalque; T_1 no resfriamento; T_p no pós-aquecimento; T_m de manutenção (corrente e pressão no seu nível base).

Portanto, o tempo total da soldagem é igual à esses tempos adicionados. Entretanto, seja qual for a seqüência adotada, o estabelecimento das condições ótimas de soldagem depende de um grande número de fatores, os quais serão analisados a seguir.

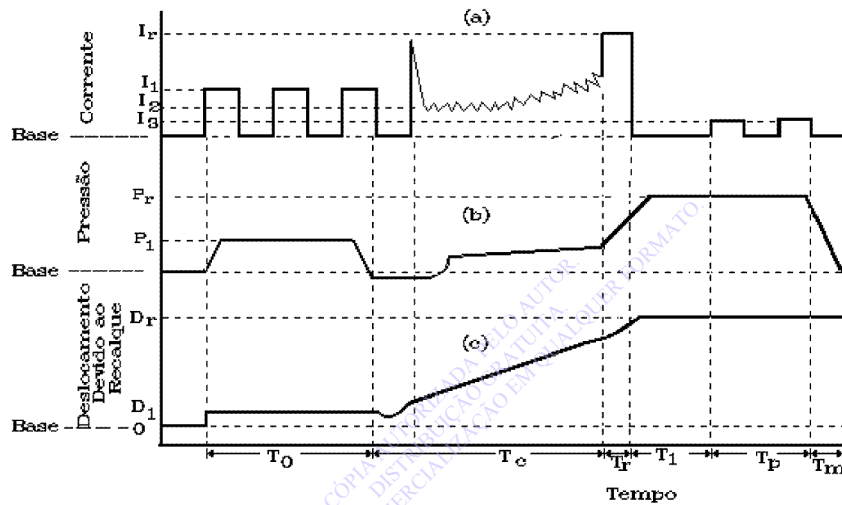


Figura 12.3 - Seqüência de Soldagem por Centelhamento.

DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

As perdas de calor durante a soldagem devem ser compensadas pela extensão da peça após o contato no eletrodo, sendo que a mesma deve ser suficientemente grande para minimizar aquelas devido à condução térmica. Essa extensão, conforme ilustrado na **Fig. 12.4** (letra "I"), também é função da necessidade do material alcançar o estado plástico, no estágio em que estão ocorrendo as pontes. Outrossim, uma extensão excessivamente grande pode provocar: (a) Redução no gradiente de temperatura, diminuindo o efeito da compressão em expulsar o metal fundido/plástico da junta; (b) Desalinhamento entre as peças; (c) Aumento da ZAC.

Sugestões para as dimensões apresentadas na última figura citada são, geralmente, fornecidas nos procedimentos de soldagem consistindo, no mínimo, das seguintes (veja **Fig. 12.4**): (a) Distância

inicial ("I") entre os eletrodos; (b) Comprimento ("P") do material perdido na operação de formação das pontes, na peça; (c) Comprimento ("R") do material perdido durante a compressão (recalque), na peça; (d) Comprimento total ("T") do material perdido, na peça; (e) Extensão ("E") inicial da peça ($=I/2$) após o eletrodo. A distância final entre as matrizes (eletrodos) é resultado da diferença $I-2T$.

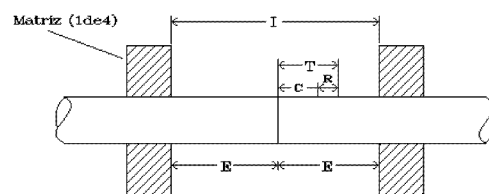


Figura 12.4 - Dimensões Características para a Soldagem por Centelhamento

Sendo de até 25% a máxima diferença entre a área das faces envolvidas e os materiais de mesmo tipo, basta que as extensões após os eletrodos sejam iguais, para que o mesmo grau de plasticidade resulte em ambas as peças. Entretanto, na soldagem de materiais dissimilares e com diferentes condutividades térmicas, ou razão superior à 25% entre as áreas das superfícies, a distribuição equilibrada de calor pode ser realizada através do uso de certos artifícios. O método mais simples e intuitivo, é aumentar a extensão após o eletrodo da peça que possui maior condutividade térmica, como mostrado na **Fig. 12.5(a)**. Pode-se, também, realizar diferentes chanfros nas peças, com aquela de menor condutividade apresentando maior face, conforme apresentado na **Fig. 12.5(b)**. Para peças com grande diferença de massa, é empregada uma “ponte”, aumentando o aquecimento por resistência elétrica, o que está representado na **Fig. 12.5(c)**.

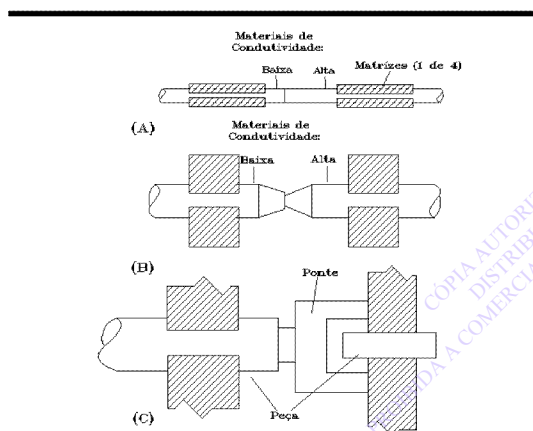


Figura 12.5 - Diferentes Métodos para Ajustar a Distribuição de Calor na Soldagem por Centelhamento.

Por outro lado, o projeto da junta é um importante fator que se deve considerar na distribuição do calor para a obtenção de soldas de boa qualidade, existindo práticas recomendadas, principalmente pela RWMA. No caso de uma peça possuir área superficial, ou massa, consideravelmente maior do que a outra - dissipando muito mais rapidamente o calor - se realiza na mesma um ressalto, cujas dimensões são aproximadamente iguais àquela da menor peça, sendo mostrado na **Fig. 12.6** a distribuição desigual e aceitável de distribuição do calor.

Entre as demais situações possíveis, com relação à geometria das peças, deve-se seguir algumas regras empíricas, ou seja: (a) Em tubos, a parede maior não deve exceder a menor por mais do

que 15%; (b) Em chapas soldadas a topo, a razão entre as larguras das mesmas pode ser elevada, desde que a espessura da mais larga não ultrapasse a da outra por mais do que 15%, sob pena de ocorrer defeito no ponto “P”, como indicado na **Fig. 12.7**.

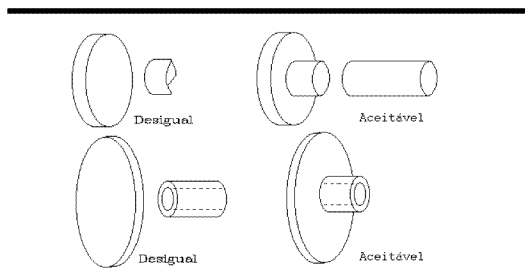


Figura 12.6 - Distribuição do Calor Devido ao Projeto da Junta na Soldagem por Centelhamento.

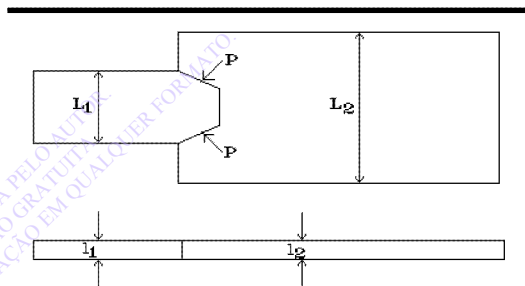


Figura 12.7 - Soldagem por Centelhamento de Chapas a Topo.

PARÂMETROS E CONDIÇÕES GERAIS

O gradiente de temperatura entre a linha central da junta e o metal base durante a fase de recalque, é de fundamental importância para a obtenção de soldas de boa qualidade. O conhecimento do mesmo permite a determinação das condições de soldagem ótimas, sem que seja necessário realizar um grande número de experiências prévias.

Uma indicação das características da junta é fornecida pela aparência do seu recalque, o qual pode ser: (a) Ângulo de inclinação do recalque entre 45° e 80° - como mostrado na **Fig. 12.8(a)** - demonstra junta com boas propriedades; (b) Ângulo do recalque muito pequeno - menor do que 45° - é sinal de que ocorreu insuficiente aplicação de calor e pressão na soldagem; (c) Excessiva pressão aplicada a baixa temperatura durante a soldagem, provoca trincas longitudinais na junta, conforme ilustrado na **Fig. 12.8(b)**.

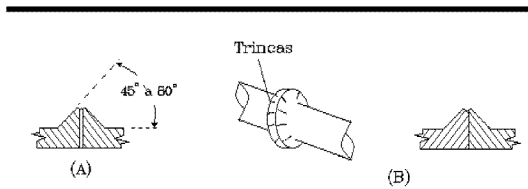


Figura 12.8 - Identificação da Qualidade (parcial) da Junta, Através da Aparência do Recalque.

Em certos materiais, a taxa de resfriamento deve ser regulada, de tal forma que não se formem microconstituintes frágeis, ou trincas sejam produzidas na junta. Para evitar esses inconvenientes, além de se equilibrar a distribuição de calor, como visto no item anterior, as peças devem ser pré-aquecidas.

Outra importante variável a ser considerada, é a formação das pontes (pequenos arcos elétricos) entre as peças. Para que ocorra ação contínua dessas pontes e seja gerado suficiente calor de modo à produzir uma zona plástica próxima ao recalque, é necessário acelerar as peças numa taxa conveniente. Isso depende das dimensões das mesmas, além da corrente e tensão de soldagem, sendo geralmente esses dois últimos parâmetros determinados pelo estabelecido no transformador, não podendo ser alterados individualmente. A taxa de aplicação da energia afeta, também, a dimensão da ZAC, sendo que maiores tempos com baixa energia provocam seu aumento. Uma excessiva taxa de aplicação da energia (num muito curto espaço de tempo) produz pontes muito compridas, com grande possibilidade de ocorrer porosidade e

inclusões na junta. De forma geral, a fase de formação das pontes é melhor estabelecida se a máquina de solda possuir um sistema de dupla tensão, com aquela mais elevada utilizada brevemente no início da operação, sendo reduzida durante a operação de manutenção. Outrossim, durante a ocorrência desses pequenos arcos elétricos, é possível que a combustão das partículas crie uma atmosfera indesejável em torno da junta, obrigando o uso de algum gás protetor.

Após o estágio das pontes ter ocorrido durante um tempo conveniente, criando uma zona plástica adequada, as faces devem ser comprimidas. Essa força de compressão precisa ser dimensionada para expelir todo o metal fundido e impurezas existentes na interface, além de forjar as zonas plásticas, formando a união. A eficácia dessa operação dependerá da magnitude e taxa de aplicação da força; da geometria das faces e do grau de plasticidade dos materiais envolvidos. Nesse momento, é necessário o correto ajuste da intensidade da corrente que continua circulando, pois se a mesma for muito baixa, será impossível expulsar os óxidos; escória, etc., sendo que em excesso provocará fusão violenta do metal, causando defeito na junta.

Outrossim, é de se notar que existe perda de material nesse processo, com o comprimento final do conjunto dependendo da estimativa realizada previamente à soldagem. Geralmente, as sugestões de procedimento mencionam valores relativos à essa perda, mas experiências preliminares devem ser sempre realizadas.

PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

Como nos processos anteriormente estudados, experiências devem sempre anteceder a realização da soldagem final. As mesmas podem ser baseadas nas sugestões de procedimentos de soldagem a seguir mencionados. Os dados de pressão; potência elétrica e dimensões dos elementos de fixação, apresentados nas **Tabs. 12.1 e 12.2**, auxiliam no estabelecimento das condições ótimas de operação.

Por outro lado, nas **Tabs. 12.3 e 12.4** a seguir mostradas, podem ser encontradas recomendações para a soldagem de tubos e barras de aços com baixa e média resistência ao forjamento, em função da espessura da parede, ou do diâmetro - ou menor dimensão da seção transversal - com as to-

lerâncias dimensionais referidas ilustradas no **Fig. 12.3**. Outrossim, a **Tab. 12.5** sugere parâmetros orientativos para outros materiais e dimensões, os quais podem servir como ponto de partida na soldagem de peças dissimilares.

Em todas as tabelas anteriormente citadas, os procedimentos sugeridos são baseados em alguma dimensão da seção transversal e não na sua área. Isso se deve, principalmente, à distribuição da corrente elétrica sobre a superfície considerada. É muito mais prontamente obtida uma solda realizada numa seção retangular, por exemplo, na qual as arestas possuem comprimentos similares, do que em outra com mesma área, mas cujas dimensões sejam muito diferentes entre si.

Tabela 12.3 - Soldagem por Centelhamento [Tempo e Tolerâncias Dimensionais Típicas - Tubos e Chapas de Aço ao Carbono e Baixa Liga - Vide Tabs. 12.1 e 12.2; Figs. 12.4 e 12.9(a)]

Espessura da Parede do Tubo ou Chapa (mm)	Tempo de Centelhamento (s)	Tolerâncias Dimensionais (mm)					
		I	I-2T	C	R	T	E
0,5	0,80	5,46	2,52	1,02	0,46	1,47	2,74
1,5	2,75	15,75	7,37	3,05	1,14	4,19	7,87
2,0	4,00	20,45	9,37	4,01	1,52	5,54	10,24
2,5	5,00	24,64	11,44	4,77	1,83	6,60	12,32
3,0	6,25	28,96	13,46	5,59	2,16	7,75	14,48
4,0	9,00	37,34	17,78	7,11	2,67	9,78	18,67
5,0	12,00	44,70	21,84	8,25	3,17	11,43	22,35
6,0	16,00	51,05	25,39	9,27	3,56	12,83	25,53
8,0	21,00	57,02	28,58	10,29	3,94	14,22	28,52
10,0	33,00	67,06	34,30	11,81	4,57	16,38	33,53
13,0	45,00	73,91	38,09	12,95	4,95	17,91	36,96
18,0	70,00	85,34	44,44	14,73	5,71	20,45	42,67
23,0	97,0	92,96	49,02	15,87	6,10	21,97	46,48
25,0	110,0	96,52	50,80	16,51	6,35	22,86	48,26

Tabela 12.4 - Soldagem por Centelhamento [Tempo e Tolerância Dimensionais Típicas - Barras Maciças (Redonda, Quadradas, Retangulares ou Hexagonais) de Aço ao Carbono e Baixa Liga - Vide Tabs. 12.1 e 12.2; Figs. 12.4 e 12.9(b)]

Diâmetro ou Menor Dimensão da Seção (mm)	Tempo de Centelhamento (s)	Tolerâncias Dimensionais (mm)					
		I	I-2T	C	R	T	E
2,5	0,75	4,62	2,54	0,79	0,25	1,04	2,31
5,0	1,50	8,89	5,09	1,40	0,51	1,90	4,45
9,0	2,75	15,24	8,90	2,29	0,89	3,17	7,62
13,0	4,25	21,59	12,71	3,17	1,27	4,44	10,79
15,0	5,50	26,03	15,21	3,89	1,52	5,41	13,03
19,0	8,25	32,00	19,04	4,77	1,70	6,48	16,00
25,0	13,00	42,16	25,40	6,35	2,03	8,38	21,08
30,0	20,00	50,29	30,47	7,62	2,29	9,91	25,15
38,0	38,00	62,48	38,10	9,52	2,67	12,19	31,24
46,0	63,00	74,67	45,71	11,43	3,05	14,48	37,34
51,0	90,00	82,80	50,80	12,70	3,30	16,00	41,40

Tabela 12.5 - Condições Típicas de Soldagem por Centelhamento - Diversos Materiais

Material/Dimensões da Seção Transversal (mm)	Abertura das Matrizes (mm)		Perda* (mm)			Tempo de Centelhamento (s)	Tensão no Centelhamento (V)
	Inicial	Final	Cent.	Recal.	Tot.		
Aço AISI 1008 com AISI 1010 / DE=28,6x2,29 (a)	19,05	6,35	-	-	12,70	4,0	-
Aço AISI 1020 / 6,3x425 (b)	50,80	19,05	19,05	12,70	31,75	12,0	6,0
Aço AISI 8640/10,3x12,8 (c)	23,87	11,18	7,87	4,83	12,70	3,5	4,5
Aço AISI 8620 com Liga HS-31 / D=38,1 (c,d)	86,61	58,67	-	-	22,35	25,0	(f)
Aço Baixo C com M10 (ferramenta) / D=22,2 (c,e)	57,15	38,10	-	-	12,70	4,0	6,3
Aço Ligado / 29,6x253 (b,f)	76,20	31,75	25,40	19,05	44,45	25,0	8,2
Aço AMS 6324 / De=125,5x13,2 (a,i,l)	82,55	51,56	21,85	9,14	30,99	32,0	6,8
Aço AMS 6427 / DE=222,2x19,81 (a,j,l)	130,05	51,31	65,28	13,46	78,74	120,0	10,9
AlClad 5056 / D=9,5 (c)	25,40	0,40	14,29	10,71	25,00	5	4,0
Alumínio 1100-O / DE=9,5x1,5 (a)	10,71	0,40	7,9	2,38	10,31	1,5	4,0
Alumínio 2014-T6 / 9,5x31,7; (c)	38,10	15,87	14,29	7,94	22,23	2,5	5,0
Alumínio 6063 / Seção em "U" (g)	25,40	4,76	15,88	4,76	20,64	5,0	10,0
Alumínio 6063 / Seção em "Z" (h)	16,27	0,40	12,70	3,17	15,87	2,5	6,0
Alumínio 6063-T5 / 63,5x3,2 (b)	22,62	0,40	15,87	6,35	22,22	3,0	6,0
Alumínio 7075-T6 / 9,5x31,75 (c)	41,27	20,64	14,28	6,35	20,63	3,0	5,0
Cobre com Alumínio 1100-O / DE=9,5x1,5 (a)	10,71	0,40	7,93	2,38	10,31	1,5	4,0
Inconel X-750 / 38,1x152,4 (b)	112,78	44,45	26,93	41,40	68,33	25,0	8,2
Titânio-6Al-4V / DE=8,9x12,7 (a,l)	66,04	38,10	13,97	13,97	27,94	30,0	5,2

Notas Relativas à Tab. 12.5:

* Cent.=Centelhamento; Recal.=Recalque; Tot.=Total.

(a) Tubo, sendo DE=diâmetro externo x espessura da parede;

(b) Chapa;

(c) Barras, com D=diâmetro (para redondos);

(d) Extensão das peças: AISI 8640=40,39; HS-31=46,23; Corrente=45 kA;

(e) Extensão das peças: Baixo C=41,15; M10=9,65; Pré-aquecimento por 3 s;

(f) Composição química: 0,20%C; 1,0%Mo; 0,1%V; 0,75%Si; 0,5%Mn;

(g) Meia-esquadria, com 645mm² de seção;

(h) Meia-esquadria, com 161 mm² de seção;

(i) AISI 8740 modificado;

(j) Composição química: 0,28%-0,33%C; 1,8%Ni; 0,85%Cr; 0,40%Mo; 0,07%V;

(l) Soldagem sob atmosfera protetora, sendo o titânio com gás argônio.

**C
A
P
Í
T
U
L
O

13**

**SOLDAGEM POR
FRICÇÃO**

INTRODUÇÃO	280
PRINCÍPIOS E VARIANTES DO PROCESSO	281
Características Fundamentais	281
Soldagem Convencional (ou Contínua)	281
Soldagem por Inércia	282
Método Linear	284
PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM	284

INTRODUÇÃO

Esse processo utiliza a transformação de energia mecânica em calor, gerado através do atrito entre as superfícies que serão unidas. A soldagem ocorre em alta temperatura, mas na fase sólida e é obtida, então, por pressão e escoamento plástico dos materiais envolvidos. Nessa operação, as impurezas são expelidas das superfícies juntamente com o metal que flui, formando um recalque (excesso) em torno da peça.

A soldagem por fricção é conhecida desde pelo menos 1891, quando foi requerida uma patente nos E.U.A., sendo que na Alemanha, durante a 2ª Grande Guerra Mundial, tubos de material termoplástico foram assim unidos. Entretanto, somente com a publicação das experiências realizadas na (ex) U.R.S.S. em 1957, renasceu o interesse sobre o processo, talvez devido ao estabelecimento dos meios práticos para implementá-lo.

As Fig. 13.1(a-d) apresentam as etapas características da soldagem por fricção, as quais são: (a) Pelo menos uma peça sofre rotação; (b) As superfícies são aproximadas, se atritam e a energia assim gerada leva as mesmas ao estado plástico; (c) As peças sofrem compressão, continuando, ou não, uma peça a sofrer rotação, dependendo do método de soldagem empregado - veja logo a seguir; (d) A operação está completa.

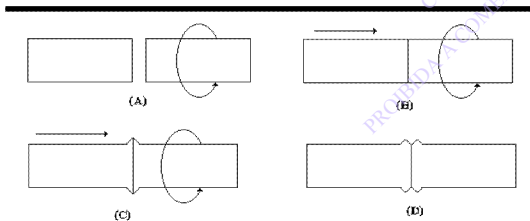


Figura 13.1 - Etapas Características na Soldagem por Fricção.

Atualmente, as variantes desse processo mais empregadas - as quais serão estudadas mais adiante - denominam-se “Convencional” e (por) “Inércia”. Para qualquer uma delas, a soldagem por fricção apresenta as seguintes vantagens:

- Não é utilizado metal de adição, ou consumível em geral;
- Não é necessário, em geral, atmosfera protetora;
- A junta apresenta muito altas propriedades mecânicas e qualidade;
- A ZAC é extremamente reduzida;
- Os gastos com energia elétrica são muito

menores do que qualquer outro processos de soldagem;

- A velocidade com que as soldas são produzidas é elevada.

Claramente existem certas limitações, entre as mesmas:

- As peças devem, em princípio, possuir geometria compatível com as características do processo;
- O equipamento de solda deve ser suficientemente rígido e resistente, para manter o alinhamento das peças sob as grandes cargas aplicadas;
- As peças devem ser capazes de resistir aos esforços aplicados, principalmente a região aquecida, próxima à interface;
- Peças com geometria não circulares, que requeiram perfeito alinhamento, podem ser soldadas, mas somente com equipamento especial;
- É relativamente grande o investimento de capital necessário.

São soldados por fricção a maioria dos metais que podem ser forjados e não possuam elementos de liga, ou microconstituintes, que agem como “lubrificantes secos” - por exemplo, os aços de corte fácil com chumbo, enxôfre e telúrio acima de 0,13% e os ferros fundidos. Metais dissimilares também são soldados com relativa facilidade, sendo essa uma ótima opção quando isso não é possível com outros processos.

Portanto, são correntemente soldados por fricção os aços ao carbono, baixa liga, ligados e inoxidáveis, entre si mesmo, ou entre diferentes tipos; ligas de alumínio e cobre, soldadas entre si mesmo, ou entre ligas dissimilares, sendo que uma importante e rara situação, permitida por este processo, é a da soldagem dessas ligas com aços, apesar de que certos problemas podem ocorrer. Adicionalmente, os seguintes materiais também são soldados: sinterizados; termoplásticos; tungstênio; molibdênio; nióbio; tântalo; titânio; zircônio; magnésio; níquel e cobalto. Note-se ainda, que a maioria das ligas de níquel e cobalto podem ser soldadas nos aços.

A soldagem por fricção é geralmente empregada em setores que devem apresentar alta produção, entre outros, na indústria automotiva; cilindros hidráulicos; eixos; válvulas; ferramentas com a ponta de material especial, além de ser um sério competidor ao forjamento, desde que as peças se adaptem às suas características.

PRINCÍPIOS E VARIANTES DO PROCESSO

CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS

A base teórica desse processo de soldagem, é a lei física que estabelece ser a força de fricção proporcional à carga normal aplicada sobre as superfícies, com o coeficiente de proporcionalidade (ou de fricção) constante sob qualquer carga.

Entretanto, conforme os óxidos e contaminantes superficiais são destruídos pelo atrito e pontos salientes sofrem elevado aquecimento, os princípios gerais aceitos para esse fenômeno não são mais aplicáveis, pois o calor é gerado por deformação plástica numa espessura finita e o coeficiente de fricção não se mantém constante, mas varia de uma forma complexa com a velocidade. Portanto, no primeiro estágio do aumento da temperatura, a destruição da camada de impurezas superficiais causa um aumento do coeficiente de fricção, com conseqüente elevação da temperatura, o que é acompanhado por ligações locais entre as superfícies, emperrando o deslocamento relativo das mesmas e criando uma resistência tangencial. Além desses fatos, o tipo do filme de óxido superficial existente afeta diferentemente o coeficiente de fricção, sendo que aquele fino e duro reduz seu valor, enquanto o espesso e dútil o aumenta. Uma superfície grosseira também eleva esse coeficiente, bem como uma muito lisa, devido às forças interatômicas.

Note-se que esses fatores exercem alguma influência no processo durante sua fase inicial. A **Fig. 13.2** ilustra o comportamento das principais variáveis de soldagem, o que auxilia no entendimento do mecanismo operante. Os tempos T_i e T_f indicam o início e o fim da rotação (forçada) da peça, mas a soldagem somente estará completa após a realização do forjamento. O pico inicial na curva do torque é devido à fricção estática, sendo que essa fase rapidamente evolui para a segunda,

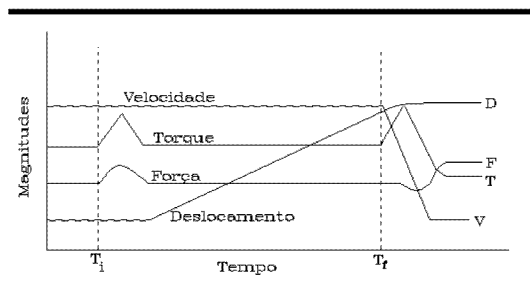


Figura 13.2 - Comportamento das Principais Variáveis no Processo de Soldagem por Fricção Convencional.

na qual muitos pontos se unem. A cada emperramento se segue uma ruptura, mostrada na curva como flutuação do registro, com o final dessa fase determinado pela ocorrência do máximo torque e iniciando a deformação plástica do material. Na terceira fase, é gerada a maior porção de calor, com aumento da temperatura e conseqüente decréscimo da resistência do material, o que provoca a extrusão do mesmo da junta e a formação de um anel externo, ou recalque.

Um aumento da velocidade de rotação, mantendo a força constante, causa redução do tempo de soldagem nas duas fases iniciais. Entretanto, na terceira fase altas velocidades resultam num maior tempo de soldagem, pois a taxa com que o calor é gerado diminui a espessura do material, o qual se deforma plasticamente.

SOLDAGEM CONVENCIONAL (OU CONTÍNUA)

Conforme ilustrado na **Fig. 13.3**, geralmente somente uma peça sofre rotação, a qual é mantida mesmo após iniciar o atrito entre as superfícies, enquanto a outra se desloca axialmente. Então, as seguintes principais etapas ocorrem: (a) O membro giratório é acelerado à velocidade desejada; (b) O outro membro ("fixo" na figura significando não giratório) avança, iniciando a fricção e a pressão entre as superfícies; (c) Fase de aquecimento, mantidas a pressão e a rotação; (d) Fase de forjamento, na qual é aplicado freio ao membro giratório e as peças sofrem compressão final.

Esse ciclo é relativamente complexo, demorando normalmente entre 1 a 100 segundos para se completar. A **Fig. 13.2** ilustrou o comportamento das variáveis torque e pressão, respectivamente, fatores os quais, juntamente com o tempo de apli-

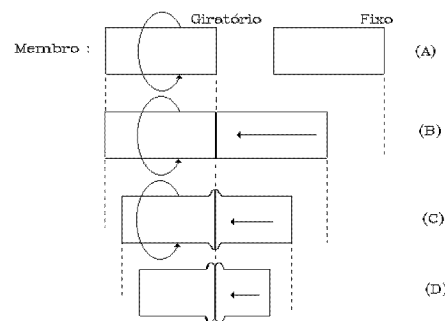


Figura 13.3 - Principais Etapas na Soldagem por Fricção Convencional.

cação da pressão, dependem: (a) Da área da seção transversal das peças que serão soldadas; (b) Do ponto de fusão e da condutividade térmica dos materiais envolvidos; (c) Das alterações microestruturais provocadas pelo ciclo térmico nos materiais. Com a duração da fase de aquecimento e pressão corretamente ajustadas, a velocidade de rotação, como mostrado, é a variável menos influente sobre as características da junta. Pode-se ter uma idéia da grandeza dessas variáveis, sabendo que: (a) A velocidade de rotação pode estar entre 1800 rpm para alumínio comercialmente puro e 8000 rpm para cobre comercialmente puro; (b) A pressão na fase de aquecimento se encontra entre 65 e 195 MPa, enquanto a de forjamento (de soldagem) se situa entre 100 e 400 MPa, no caso de aços ao carbono; (c) A potência específica desenvolvida pode alcançar até 50 W/mm².

Outro importante aspecto ainda a ser considerando nessa variante da soldagem por fricção, é que as linhas de fluxo do escoamento plástico do metal seguem um caminho radial, como ilustrado na Fig. 13.4. Isso é devido à junta ser formada por forjamento, não pela rotação das peças, o que difere fundamentalmente do método por inércia, que será visto a seguir.

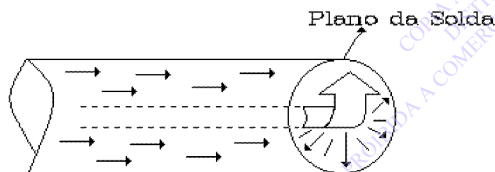


Figura 13.4 - Linhas de Fluxo (Radiais) de Escoamento do Material na Soldagem por Fricção Convencional.

SOLDAGEM POR INÉRCIA

Nesse método, uma peça é segura num sistema apropriado, enquanto a outra gira fixa a um volante com grande momento de inércia. Conforme mostrado na Fig. 13.5, as seguintes principais etapas ocorrem: (a) O volante (e o membro giratório) é rapidamente acelerado à uma velocidade de rotação conveniente e pré-determinada, sendo a mesma o fator determinante na energia disponível para a soldagem; (b) O outro membro avança, enquanto o sistema que provoca a rotação é desconectado, deixando a peça giratória livre; (c) A fricção termina quando a energia do membro giratório se esgota, e a solda é finalizada. Portanto, a pressão é mantida constante; o atrito gera calor e

não existe um tempo da “fase de aquecimento”, como na versão anterior, pois ela está incluída na presente operação. A fase de soldagem mostrada em (c) inicia num brevíssimo instante antes da peça parar de girar e prossegue após o sistema estacionar, sendo mantida a pressão, mas não é aplicada força de forjamento, como no método convencional.

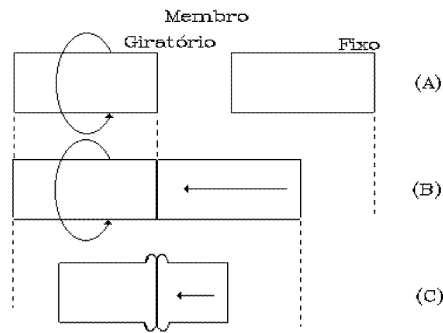


Figura 13.5 - Etapas da Soldagem por Fricção Inercial.

Por sua vez, a Fig. 13.6 apresenta os comportamentos da velocidade de rotação; torque e pressão, em função do tempo de aplicação de cada um, sendo interessante compará-la com a Fig. 13.2, a qual ilustra o caso convencional.

O período do tempo de soldagem é extremamente pequeno (geralmente entre 0,1 e 3 s) sendo que os parâmetros mais importantes sobre as características da junta são: (a) O momento de inércia do volante - o qual pode ser variado pela adição/remoção de discos; (b) A velocidade de rotação - neste caso, o mais importante é a velocidade periférica da peça; (c) A pressão, não existindo aquela de forjamento. Como dito anteriormente, o fato de não ocorrer forjamento faz com que o metal no estado plástico escoe de forma axial; radial e circular conforme deixa a junta, apresentando linhas de fluxo em espiral mostradas na Fig. 13.7.

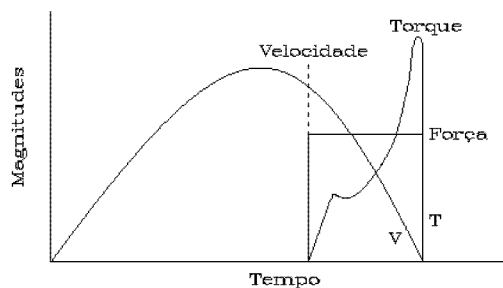


Figura 13.6 - Comportamento das Principais Variáveis na Soldagem por Fricção Inercial.

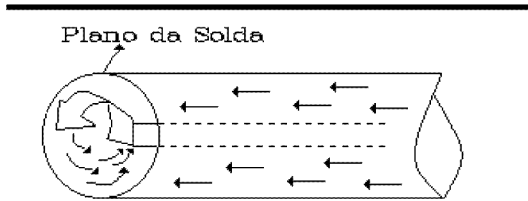


Figura 13.7 - Linhas de Escoamento Plástico na Solda por Inércia.

Neste método de soldagem, há uma fase de grande torque, na qual é refinada a microestrutura e expelida todas as impurezas das interfaces, além da energia ser aplicada numa alta taxa, sem pressão de forjamento, com rápido resfriamento, o que provoca uma pequena ZAC.

A região central de cor mais escura, das juntas que são apresentadas nas Figs. 13.8 a 13.10, é a Zona Afetada pelo Calor (ZAC). A zona da interface entre as duas peças é muito pequena, sendo representada como uma linha, não existindo o clássico “metal de solda”, pois o processo ocorre na fase sólida.

Outrossim, as propriedades mecânicas, além da qualidade e geometria da solda, dependem dos seguintes importantes fatores:

▪ Velocidade Periférica da Peça

Geralmente medida em metros de superfície por minuto (msm), sendo que a Fig. 13.8 ilustra seu efeito numa junta de aço nos seguintes casos: (a) Com baixa velocidade inicial (usualmente menor do que 90 msm), a solda não é regular, podendo ter penetração incompleta; (b) Nas velocidades intermediárias (entre 90 e 270 msm), há tendência de se estabelecer uma zona uniforme próximo da superfície da peça, onde a velocidade é maior, sendo que entre 270 e 360 msm a junta é uniforme em toda sua extensão; (c) Para velocidades superiores à 360 msm, a junta é mais larga no centro do que periferia.

▪ Pressão Axial

Como mostrado na Fig. 13.9, no caso (a) a baixa pressão provoca variação na geometria da junta; na situação (c) o excesso de pressão causa até falta de penetração completa, numa maneira similar, mas oposta, à ação da velocidade periférica. Empíricamente foi estabelecido, que a pressão axial varia com a raiz quadrada do diâmetro dividida por 5, ou seja, conhecendo-se a pressão ótima de operação para uma peça com diâmetro de 25 mm, por exemplo, a pressão que deverá ser uti-

lizada para outra com 81 mm é cerca de 1,8 vezes maior. Somente a grandeza desse fator, entretanto, não determina uma correta operação, sendo a taxa com que o mesmo é aplicada de fundamental importância para obtenção de soldas com alta qualidade.

▪ Energia do Volante

A energia liberada pelo volante é responsável não somente por geração de calor mas, também, pela intensidade do forjamento por rotação (não por pressão, como na soldagem Convencional) que ocorre na junta. As Figs. 13.10(a-c) ilustram o efeito do seu progressivo aumento (a para c) sobre a geometria da junta.

Note-se que a geometria da junta não varia muito com essa energia, mas sim o recalque, ou excesso de material expulso. Observe-se, também, que se dois procedimentos possuírem a mesma energia cinética, a combinação de um volante com pequeno momento de inércia e alta velocidade, produzirá menor forjamento do que outro, com grande momento de inércia e baixa velocidade.

Por sua vez, a energia de soldagem (E) pode ser aproximadamente calculada pela seguinte equação:

$$E \approx \frac{M \cdot Y^2 \cdot R^2}{182,2} \quad (J) \quad [13.1]$$

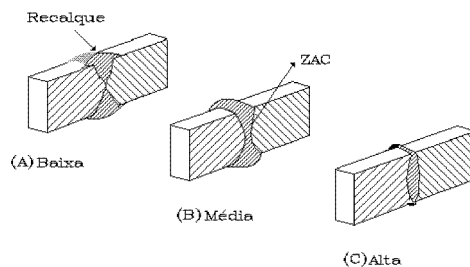


Figura 13.8 - Efeito da Velocidade Periférica da Peça sobre a Geometria da Solda na Soldagem por Inércia.

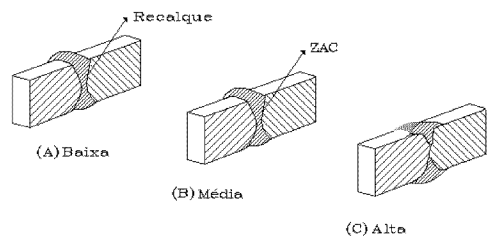


Figura 13.9 - Efeito da Pressão Axial sobre a Geometria da Junta na Soldagem por Inércia.

onde:

M = massa do volante (kg);

Y = raio de giração do sistema (m);

R = velocidade de rotação do volante (rpm)

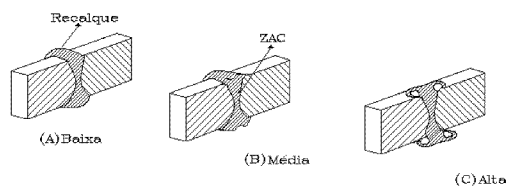


Figura 13.10 - Efeito da Energia do Volante sobre a Geometria da Solda na Soldagem por Inércia.

MÉTODO LINEAR

No denominado “método linear” de soldagem por fricção, um componente é fixo, enquanto o outro oscila linearmente, conforme ilustrado na Fig. 13.11, constando das seguintes fases: (a) As faces sofrem atrito, sendo que a peça oscilante se desloca com amplitude máxima e se aproxima da outra; (b) A oscilação diminui e a força de forjamento é máxima; (c) Não há mais oscilação, com

a força de forjamento decrescendo até ser nula, com o fim do ciclo. A vantagem deste método sobre o convencional, ou por inércia, consiste na possibilidade de soldar perfis de geometria irregular.

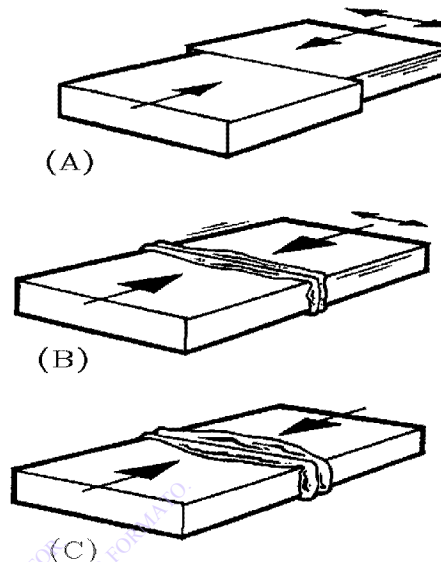


Figura 13.11 - Método Linear de Soldagem por Fricção.

PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

Além de no processo por inércia não ser possível obter escoamento radial, as principais diferenças entre o mesmo e o processo convencional são:

- Empregando o processo por inércia, é mais difícil manter estreita tolerância dimensional do comprimento final da peça soldada, pois no tipo convencional o controle do deslocamento é mais simples;

- A soldagem por inércia utiliza uma maior pressão (em partes maciças) do que a convencional. Por exemplo, na soldagem de aços médio carbono essa relação é de aproximadamente 1,7 vezes. Entretanto, para partes tubulares a pressão é equivalente entre os dois processos;

- Em geral, o tempo para a realização da solda e a ZAC são menores nas soldas realizadas por inércia;

- A potência do motor para realizar a rotação da peça, é cerca de 7 vezes maior com o processo convencional do que quando se emprega aquele por inércia.

Por outro lado, antecedendo sugestões de procedimentos para soldagem por fricção, devem ainda ser analisadas certas características exclusivas de projeto que esse processo possui.

Um detalhe bastante importante se refere às juntas, as quais podem ser de seis principais tipos, ou seja, entre: barra/barra; barra/tubo; tubo/tubo; barra/chapa; tubo/chapa e em ângulo. Chama-se atenção para os casos das juntas tubo/chapa e angulares. Com relação ao primeiro, vale notar que o mesmo não é tão resistente quanto tubo/tubo, pois geralmente há deformação do tubo e o excesso de metal pode reduzir sensivelmente a resistência à fadiga da junta. Para evitar esse problema, além de ser um recurso geral em todos os casos nos quais não se deseja que o recalque permaneça aparente, se realiza um recesso numa ou em ambas as peças, com o mostrado na Fig. 13.12. Para soldas entre o diâmetro externo e o interno de componentes, é utilizado chanfro em ambos, normalmente de 30° ou 45° impedindo, dessa forma, que a peça interna seja empurrada através do furo existente na outra.

As condições superficiais não são geralmente críticas para a soldagem por fricção, sendo aceitas

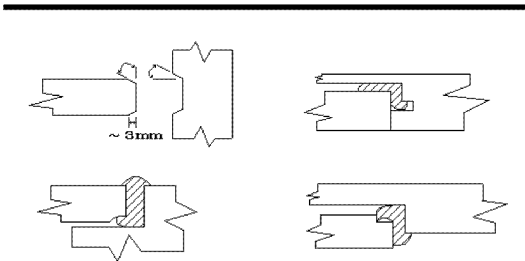


Figura 13.12 - Recesso nas Partes Soldadas para Permitir o Escoamento do Material.

marcas de ferramentas de corte e aquelas provocadas por processos térmicos. Entretanto, excesso de carepa; recobrimentos metálicos; superfícies cementadas/nitretadas; entre outras, podem impedir a soldagem e devem ser eliminadas antes da operação iniciar. Além disso, as faces das peças devem ser normais ao eixo de rotação pois, caso contrário, poderá ocorrer falta de concentricidade entre mesmas.

Uma das notáveis características desse processo, é a diversidade de materiais que o mesmo permite soldar. A seguir é apresentada uma relação daqueles metais e suas ligas que já foram testados até o momento, sendo que outras combinações poderão a ser praticadas no futuro. É possível que em algumas dessas combinações, a plena resistência mecânica da junta somente seja obtida com tratamento térmico após a soldagem, enquanto que o (*) junto ao nome da liga indica ser possível realizar a união, apesar da mesma não apresentar resistência mecânica integral.

- Aços ao carbono: Aços ao carbono; Alumínio e suas ligas*; Bronzes; Carbonetos; Cobalto e suas ligas; Cobre; Cobre/Níquel; Níquel e suas ligas; Aços ligados; Aços de usinagem fácil*; Sinterizados; Aços Inoxidável; Aços ferramenta.

- Aços ferramenta: Aços ferramenta; Aços ao carbono; carbonetos; Aços ligados.

- Aços inoxidáveis: Aços inoxidáveis; Aços ao carbono; Alumínio e suas ligas*; Cobre/Níquel; Níquel e suas ligas; Aços ligados.

- Aços ligados: Aços ligados; Aços ao carbono; Alumínio e suas ligas*; Cobalto e suas ligas; Níquel e suas ligas; Aços de usinagem fácil*; Aços maraging; Aços inoxidáveis; Aços ferramenta.

- Aços maraging: Níquel e suas ligas; Aços ligados.

- Aços de usinagem fácil: Aços de usinagem fácil*; Aços ligados*; Aços ao carbono*.

- Alumínio e suas ligas: Alumínio e suas ligas; Cobre*; Aços ligados*; Aços ao carbono*; Aços inoxidáveis*.

- Bronze: Bronze; Aços ao carbono.

- Chumbo: Chumbo.

- Cobalto e suas ligas: Aços ao carbono; Aços ligados.

- Cobre: Cobre; Alumínio e suas ligas*; Aços ao carbono; Zircônio e suas ligas.

- Cobre/Níquel: Cobre/Níquel; Aços ao carbono.

- Latão: Latão.

- Magnésio e suas ligas: Magnésio e suas ligas.

- Molibdênio: Molibdênio.

- Nióbio: Nióbio.

- Níquel e suas ligas: Níquel e suas ligas; Aços ao carbono; Aços ligados; Aços maraging; Aços inoxidáveis.

- Tântalo: Tântalo.

- Titânio e suas ligas: Titânio e suas ligas; Aços ao carbono*; Aços ligados*; Aços inoxidáveis*.

- Tungstênio: Tungstênio.

- Zircônio e suas ligas: Zircônio e suas ligas; Cobre.

Outrossim, na **Tab. 13.1** são encontradas sugestões para a soldagem por fricção pelo método convencional de diversos materiais, enquanto a **Tab. 13.2** apresenta parâmetros para a soldagem por inércia de metais similares e dissimilares, entre barras com diâmetro de 25 mm. Em todos os casos, deve ser considerado que há redução no comprimento das peças, devido à formação do recalque.

Tabela 13.1 - Condições para Soldagem por Fricção Convencional

Material	Diâmetro (mm)	Velocidade Relativa de Rotação (rpm)	Pressão de Contato (MPa)		Tempo Total (s)
			Fase de Aquecimento	Fase de Forjamento	
Aços ao Carbono	12,7	3000	35	35	7
	25,4	1500	52	52	15
Aços Inoxidáveis (Séries 300 e 400)	25,4	3000	83	111	7
	Tubo (a)	800	138	138	35
Aço Inoxidável com Aço ao Carbono	19	3000	52	104	10
Aço Ferramenta (b,c)	19	4000	104	138	10
Cobre (d)	25,4	6000	35	70	18
Alumínio (d)	19	3800	28	45	6
Aço Baixa Liga com Aço ao Carbono (c,e)	Tubo (f)	6800	18(g)	42	42
	Tubo (i)	3000	38(j)	111	26

(a) Diâmetro externo 139,7 mm e espessura da parede 25,4 mm; (b) Tipo T-1, ou equivalente; (c) É requerido tratamento térmico após a soldagem; (d) Comercialmente puro; (e) Aços AISI 4140 e 1035. Pré-aquecer o AISI 4140 a 315°C; (f) Diâmetro externo 44,45 mm e espessura da parede 12,7 mm; (g) A pressão deve aumentar de 0 até 18 MPa em 20 s; (i) Diâmetro externo 114,30 mm e espessura da parede 31,75 mm; (j) A pressão deve aumentar de até 38 MPa em 26 s.

Tabela 13.2 - Condições Sugeridas para Soldagem por Fricção Inercial - Barras com 25 mm de Diâmetro

Material	Rotação (rpm)	Força Axial (kN)	Momento de Inércia (J.m)	Tempo Total* (s)	Material Perdido** (mm)
Aço AISI 1018†	4600	53	16,2	2,0	2,54
Aço AISI 1018 em Cobre	8000	22	3,4	1,0	3,81
Aço AISI 1045†	4600	62	18,9	2,0	2,54
Aço AISI em Níquel 718	1500	177,9	314,7	2,5	3,81
Aço AISI 4140†	4600	66,7	20,1	2,0	2,54
Aço (Inox.) AISI 302†	3500	80,1	33,9	2,5	2,54
Aço (Inox.) AISI 302 em AISI 1020	3000	80,1	48,4	2,5	2,54
Aço (Inox.) AISI 410†	3000	80,1	48,4	2,5	2,54
Aço Maraging†	3000	89,0	48,4	2,5	2,54
Aço M2 (ferramenta) em AISI 1045	3000	177,9	65,3	3,0	2,54
Alumínio 1100†	5700	26,7	6,5	1,0	3,81
Alumínio 6061†	5700	31,3	7,3	1,0	3,81
Alumínio 6061 em Aço (Inox.) AISI 302	5500	22,2-66,7‡	9,4	3,0	5,08
Cobre†	8000	22,2	2,4	0,5	3,81
Cobre em Alumínio 1100	2000	33,4	26,6	1,0	5,08
Inconel 718†	1500	222,4	314,7	3,0	3,81
Latão para cartucho (70%)†	7000	22,2	2,9	0,7	3,81
Titânio - 6Al - 4V†	6000	35,6	4,1	2,0	2,54

* Inclui tempo de aquecimento e de soldagem; ** Redução total do comprimento das peças envolvidas; † Soldagem com o mesmo tipo de material; ‡ força de 22,5 kN é aplicada durante o tempo de aquecimento, mas próximo do fim da soldagem, a força é aumentada para 66,7 kN.

**C
A
P
Í
T
U
L
O

14**

**SOLDAGEM POR
LASER**

INTRODUÇÃO	288
PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS	289
ELEMENTOS ESSENCIAIS DOS EQUIPAMENTOS	292
LASER Tipo Sólido	292
LASER Tipo Gás	293
LASER EXCIMER	294
Caracterização do Feixe de Energia	294
APLICAÇÕES	296

INTRODUÇÃO

No início dos anos '60, o mundo conheceu uma nova forma de energia - a qual se apresentou num feixe luminoso, ou infravermelho - que possuía propriedades inteiramente novas e, à primeira vista, insólitas e desconcertantes.

Apesar da altíssima densidade de potência desse feixe (o qual pode atualmente ultrapassar 10^7 W/mm²) o mesmo é de muito fácil manipulação, com utilizações variando da mais delicada cirurgia de olhos, à fusão dos metais. O feixe produzido é muito pouco divergente e altamente colimado: se projetado da Terra para a Lua (distância média 386.000 km) por exemplo, formaria um círculo com somente 3 km de diâmetro. Por outro lado, duas outras propriedades desse feixe, de fundamental importância e que se tornarão claras mais adiante, não são imediatamente percebidas por um não especialista, ou seja, todas as ondas que o compõem possuem mesmo comprimento e estão em fase, ou em outras palavras, o mesmo é **coerente**.

A energia referida acima se denomina LASER, sigla formada pelas iniciais em inglês de "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" (ou Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação). Seu desenvolvimento foi acelerado com a possibilidade da amplificação de ondas eletromagnéticas (no caso microondas) aberta pelos físicos americanos P. Gordon, H. J. Zeiger e C. H. Townes, em 1954, com um aparelho denominado MASER, também sigla do inglês "Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation" (ou Amplificação de Microonda por Emissão Estimulada de Radiação) e com o trabalho de Townes e o canadense A. L. Schawlow em 1958, os quais demonstraram teoricamente, que a emissão estimulada poderia ser igualmente utilizada para amplificar ondas luminosas. Dois anos mais tarde, o também americano Théodore H. Maiman - trabalhando na Hughes Aircraft Research Laboratories - construiu o primeiro LASER com cristal de rubi, o qual no início foi denominado MASER óptico, até que o nome atual se impôs.

Por sua relativa simplicidade, é interessante analisar o funcionamento desse equipamento original. O mesmo consiste essencialmente de um potente "flash" eletrônico em forma de espiras, envolvendo um cristal cilíndrico de rubi e dois espelhos laterais, conforme ilustrado esquematicamente na **Fig. 14.1** a qual será novamente discutida mais adiante.

Na natureza, o rubi é uma pedra (preciosa) de cor vermelha muito viva, variedade de coríndon,

o qual é um mineral com estrutura cristalográfica trigonal, sesquióxido de alumínio. O rubi é um óxido de alumínio impuro, pela existência no mesmo de 0,05% de cromo sob a forma de Cr^{3+} , sendo a sua cor característica devido a absorção da luz azul, verde e amarela. Praticamente somente a luz vermelha atravessa o cristal e é visível. Além disso, a mesma pode ser realçada pela emissão fluorescente de energia tomada da luz absorvida (amarelo, azul e verde) convertida em luz vermelha pelo íon cromo. Absorver e emitir luz é raro num sólido à temperatura ambiente, sendo que esse cristal se comporta como um meio, no qual os íons de cromo estão em "suspensão". Para o LASER é utilizado rubi sintético, fabricado através da fusão de Al_2O_3 e Cr, com a germinação de um grande cristal provocada pela adição de um minúsculo rubi natural.

Portanto, o flash produz uma intensa energia, o rubi absorve a mesma num tempo muito curto (milésimos de segundo) e a reemite, em parte sob a forma de luz, sendo o resto transformado em calor. No caso do LASER a rubi, é emitido um feixe a cerca de cada 2 ms, período de tempo que corresponde aproximadamente ao intervalo de descarga do flash, o qual não pode sofrer ignição em frequência muito alta, pois causaria excessivo aquecimento do rubi e de seu tubo.

Grande parte da emissão do rubi é de cor vermelha, que se propaga axialmente pelo cristal, sendo submetida a múltiplas deflexões entre os dois espelhos colocados no cilindro. O fato essencial é que, cada vez que o feixe luminoso atravessa o cristal, o mesmo absorve mais energia fornecida pelo flash e é amplificado, de forma que sua intensidade é progressivamente aumentada. Um dos espelhos é semi-transparente e deixa passar parte de energia luminosa, a qual constitui o feixe utilizado.

Desde a sua invenção, os equipamentos LASER sofreram muitas modificações, mas mantém em comum, ainda, os seguintes aspectos:

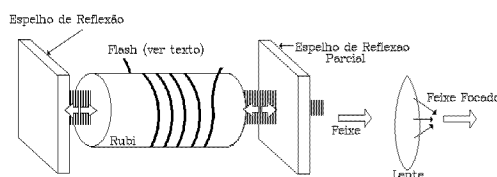


Figura 14.1 - LASER a Rubi.

- Um material ativo, como o rubi, que permite converter energia externa em ondas coerentes;
- Um meio para fornecer energia ao material ativo;
- Espelhos, sendo um semi-transparente, obrigando os raios à passarem várias vezes pelo material ativo, de forma que os mesmos sejam amplificados.

Praticamente todos os materiais podem ser soldados ou cortados por LASER, incluindo a maioria dos metais e suas ligas, com ou sem atmosfera protetora, mesmo aqueles de alta refletividade, desde que exista suficiente densidade de potência para iniciar a fusão, assunto que será analisado posteriormente. No presente, existem LASERs a gás (CO_2) com potência tão alta quanto 45 kW, podendo soldar (ou cortar) aços, por exemplo, com

mais de 50 mm de espessura. Entretanto, essa tecnologia avança tão rapidamente, que no momento da edição desse livro, é possível que LASERs muito mais potentes já se encontrem disponíveis.

No item seguinte procurar-se-á mostrar quais são as leis físicas básicas que regem o funcionamento do LASER e como as mesmas podem ser aplicadas pois, sem a menor dúvida, este será um dos mais importantes processos para soldagem e corte num futuro muito próximo. Aliás, é provável que em poucos anos o LASER seja economicamente competitivo com alguns processos ditos convencionais.

Para melhor entender a origem do feixe de energia LASER, é preciso compreender, pelo menos, como os átomos são os responsáveis pela formação das ondas eletromagnéticas, entre as mesmas a luz e o infravermelho.

PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS

As ondas eletromagnéticas são compostas por campos elétrico e magnético, ortogonais entre si, cujas intensidades variam no tempo e espaço, com suas magnitudes representadas por flechas na Fig. 14.2. Como os dois campos variam igualmente, os mesmos possuem a mesma amplitude (A) e comprimento da onda (C). Além dessas duas magnitudes indicadas, uma onda eletromagnética é caracterizada por sua frequência e velocidade.

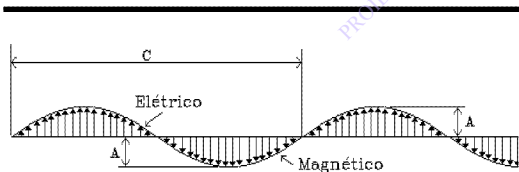


Figura 14.2 - Ondas Eletromagnéticas, compostas pelos Campos Elétrico e Magnético (ortogonais entre si.)

Por outro lado, na Fig. 14.3 é mostrado os comprimentos e frequências características do espectro eletromagnético, sendo que as ondas luminosas não representam mais do que uma muito pequena parcela do mesmo, situando-se entre 4000 Å (cor violeta) e 7000 Å (cor vermelha). Como a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas é constante (aproximadamente $3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ no vácuo) e igual ao produto da sua frequência pelo seu comprimento, as grandezas são inversamente proporcionais. Note-se que na citada figura não há correspondência entre as mesmas, pois a

escala utilizada é logarítmica, por absoluta necessidade de representá-las numa página.

Alguns fatos corriqueiros auxiliarão a entender melhor o funcionamento do LASER. Por exemplo: quando a corrente elétrica atravessa o filamento de um lâmpada, os átomos desse material são excitados, “devolvendo” o excesso de energia sob a forma de luz (incoerente) e calor; entretanto, numa descarga elétrica através de hidrogênio, os átomos desse gás absorvem a energia fornecida e a reemitem sob a forma de luz (também incoerente) e outras radiações eletromagnéticas. Apesar de que pelo simples movimento de um interruptor se pode deflagrar diversos fenômenos correlatos aos descritos, os princípios que regem a absorção e a reemissão da energia pelos átomos são baseados,

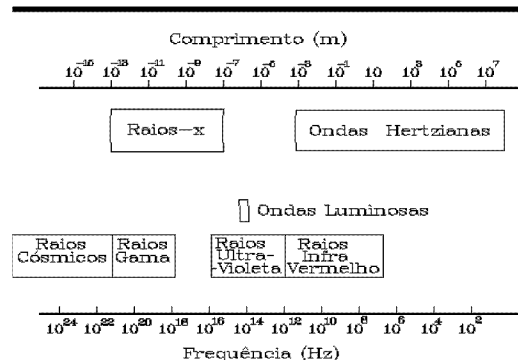


Figura 14.3 - Comprimento e Frequência do Espectro.

entretanto, em complexos conceitos da física, nem todos ainda perfeitamente entendidos.

Explicações para esses fenômenos sofreram grande impulso, quando em 1905 Albert Einstein utilizou nos seus estudos do efeito fotoelétrico a teoria quântica da luz, com conceitos desenvolvidos por Max Planck cinco anos antes, mas aos quais o mundo científico da época não teria dado o devido crédito. Planck havia postulado, que corpos suficientemente quentes para se tornarem luminosos emitem energia de forma descontínua, em pequenos pulsos chamados “quanta” (singular “quantum”). Os quanta, associados a uma frequência particular (f) de luz, possuem todos a mesma energia, dada por:

$$\Delta E = h \cdot f \quad [14.1]$$

onde ΔE é a diferença de energia entre aquela do elétron excitado e seu nível normal, enquanto “ h ” é hoje conhecida como “constante de Planck” e vale $6,63 \times 10^{-34}$ J.s.

Portanto, quando elétrons de um átomo retornam de seu estado excitado, emitem energia de uma maneira aleatória, com diferentes frequências, sendo incoerente aquela que for luminosa e apresentando décimos de W/mm^2 .

Em 1913 Niels Bohr formulou um modelo para o átomo de hidrogênio, no qual os elétrons não podem existir no mesmo, exceto em certos níveis específicos de energia. Portanto, os elétrons de um átomo podem estar, com relação ao núcleo, em vários níveis de energia, dos quais alguns são estados estáveis. Por exemplo, a **Fig. 14.4** mostra o diagrama dos níveis de energia para o hidrogênio (o qual possui somente um elétron), sendo que no momento deve ser ignorado o detalhe da figura. O elétron no menor nível ($n=1$) corresponde ao estado normal, ou fundamental do átomo possuindo, portanto, energia zero de excitação, enquanto o nível seguinte ao mais baixo ($n=2$) é excitado com 10 eV e assim por diante. Dessa forma, todos os outros níveis além do primeiro, são estados excitados, ou seja, o elétron retornará a um estado de menor energia seguindo leis físicas complexas, cuja ordem é simbolizada na figura por flechas. Essas flechas indicam a passagem do elétron de um nível de energia para outro inferior, com consequente emissão de ondas eletromagnéticas, sendo a frequência das mesmas proporcional à diferença de energia entre os níveis e dada pela equação 14.1.

Um fato importante, é que o átomo de hidrogênio, por exemplo, não pode absorver energia com magnitude inferior à 10 eV. Apesar do eV (elé-

tron-volt) ser uma unidade de energia muito pequena (um cal, que é a energia necessária para um grama d’água aumentar $1^\circ C$, equivale a centenas de trilhão de eV), qualquer pequeno volume de matéria possui trilhões de átomos (uma área com somente $1 mm^2$ e espessura de um átomo de sódio, possui cerca de 10^{13} átomos!).

Por sua vez, a excitação estimulada dos átomos estava sendo estudada por Einstein em 1917 o qual provou, que quando um átomo absorve energia de uma onda e é elevado para um nível maior, resultam fótons (“pacotes” de energia) com mesma polarização; frequência e fase dessa onda incidente. O fenômeno é aditivo e produz amplificação, mas com os fótons sendo liberados em todas as direções. Portanto, o “salto” do elétron de um nível maior para um menor, libera energia igual àquela dada pela equação 14.1 e mostrada na **Fig. 14.4**.

A teoria atômica de Bohr explicava razoavelmente bem o hidrogênio, mas era incapaz de ser estendida aos tratamentos dos espectros de átomos complexos. Em 1925 Wolfgang Pauli formulou seu “princípio de exclusão”, o qual ensina que num átomo dois elétrons não podem existir em um mesmo estado quântico, ou seja, cada elétron deve possuir um conjunto de “números quânticos”, formados pelos magnético (m_l); orbital (l); total (n) e magnético de spin (m_s). Esses números quânticos qualificam o elétron (são seu “endereço”) e, por esse princípio, num átomo complexo todos os elétrons não podem ocupar o estado quântico mais baixo. Dessa forma, elétrons com igual número quântico principal se encontram numa mesma “camada” atômica; somente grosseiramente se pode imaginar que estão à uma igual distância do núcleo. Na realidade, possuem energia tanto maior, quanto for o número quântico orbital (l), o qual apresenta denominações próprias para cada específico valor. Assim, se $l=0$, o mesmo é designado por “s”; $l=1$ por “p”; $l=2$ por “d”; $l=3$ por “f”, etc.. Portanto, na citada figura são mostrados os sub-níveis e suas denominações. Saliente-se que existem outros complicantes não mencionados, como

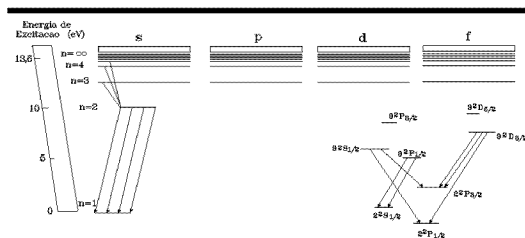


Figura 14.4 - Diagrama dos Níveis de Energia para o Átomo de Hidrogênio.

os efeitos relativísticos; acoplamento entre elétrons e flutuação de vácuo no campo eletromagnético, os quais decompõem certos níveis de energia em ainda menores sub-divisões.

Agora é possível compreender os aspectos principais dos espectros dos vários elementos, inclusive o porque de na **Fig. 14.4** se ter mostrado a ampliação de alguns níveis de energia, pois o elétron do átomo de hidrogênio pode ocupar tais sub-níveis.

Resta entender, que para obter amplificação por emissão estimulada, deve ser provocada artificialmente o que se convencionou chamar de “inversão da população”, ou seja, o número de átomos no estado excitado precisa ser maior do que no estado fundamental. Para produzir esta inversão, é necessário proceder à uma espécie de “bombeamento” de energia no meio ativo (um cristal, ou outro material, como será visto) de maneira que numerosos átomos passem para um estado superior de energia. Essa é a missão do flash, ou outra fonte de energia, cujo disparo deve ser muito rápido, pois o átomo que é excitado não permanece nesse estado mais do que alguns milésimos de segundo, retornando ao nível fundamental.

A **Fig. 14.5** ilustra esquematicamente a formação do LASER, com os círculos e os pontos cheios indicando átomos nos estados fundamental e excitado, respectivamente. Em (a) o “bombeamento” estabelece a inversão da população. Em (b) átomos excitados emitem um trem de ondas que se choca com um dos espelhos; essas ondas estimulam emissões de outros átomos e assim sucessivamente, de forma que as mesmas sofrem múltiplas reflexões nos espelhos, até que a intensidade alcançada permite ao feixe atravessar o espelho semi-transparente, ou que ocorra a súbita abertura dessa chamada cavidade ressonante.

Por diversas razões tecnológicas e econômicas, vários materiais foram e estão sendo pesqui-

sados como meio ativo. Em princípio, a procura é dirigida àqueles que possuam átomos “dissolvidos” com mesma estrutura atômica que o cromo. O neodímio (Nd) dissolvido (“dopando”) numa grante de ítrio (Y) e alumínio (denominado YAG) reúne muito boas características e, como a seguir será visto, é um dos tipos de LASER em utilização (Nd:YAG).

Nessas tentativas, os Laboratórios da Bell (E.U.A.) produziram, em 1961, um feixe LASER através da mistura hélio-neon, excitada diretamente por descarga elétrica. Outros materiais, sólidos e gasosos, também foram experimentados, como oxigênio atômico; vapor de mercúrio ionizado; vidro dopado com Nd^{3+} ; semi-condutores, entre outros. Em 1965, o físico americano C.K.N. Patel descobriu que os LASERs seriam mais eficazes com gases moleculares, sendo o dióxido de carbono (CO_2) aquele que apresentou o maior rendimento - cerca de 20%, contra 0,1% dos gases monoatômicos. Com a adição de uma pequena proporção de CO_2 ao He e N_2 aumenta ainda mais a eficácia desse LASER, emitindo num comprimento de onda de 106.000 Å (10,6 mm), situada exatamente na região infravermelha do espectro. O conceito que Patel utilizou no seu equipamento, é ligeiramente diferente do “bombeamento” descrito anteriormente, com o gás podendo ser previamente excitado, em circuito de circulação aberto ou fechado.

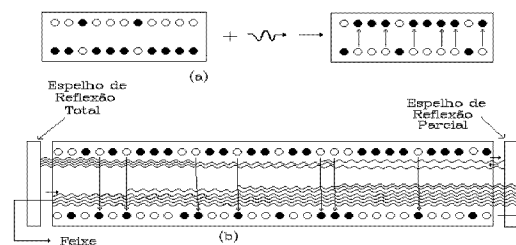


Figura 14.5 - Feixe LASER: (a) Inversão da População; (b) Produção do Trem de Ondas.

ELEMENTOS ESSENCIAIS DOS EQUIPAMENTOS

A **Fig. 14.1** apresentou esquematicamente um LASER composto por: (a) Meio ativo, podendo ser gás, ou sólido; (b) Fonte de estimulação, sendo um flash eletrônico quando (a) for sólido e descargas elétricas quando (a) for gás; (c) Espelho de reflexão total; (d) Espelho de reflexão parcial; (e) Lente para focar o feixe; (f) Feixe LASER em foco. A chamada “cavidade ressonante” é formada pelos elementos “a”, “b”, “c” e “d”. Para focar os LASER de alta e baixa potência, geralmente são utilizados espelho e lente, respectivamente. Espelhos metálicos são robustos, fáceis de resfriar e limpar, além de prontamente repostos se sofrerem algum tipo de dano.

Portanto, o feixe é dirigido contra a peça que se quer soldar e funde a mesma através de um “keyhole” (furo controlado). A coluna líquida se mantém devido à tensão superficial e capilaridade, sendo que conforme o LASER se desloca, o material solidifica e forma a união, em geral sem necessidade da adição de consumível algum.

Em soldagem e técnicas conexas, o equipamento LASER é raramente utilizado sem acessórios que automatizem, ou robotizem sua operação, geralmente formando uma “estação de trabalho”. O sistema é normalmente composto por uma mesa posicionadora da peça, com controle X-Y - em certas situações com giro e inclinação - além de outra para os componentes óticos no eixo Z, sendo os movimentos realizados por servomotores que recebem retroalimentação da velocidade e posição. Especificações típicas das mesas X-Y e Z são:

- Acuracidade de $\pm 0,08$ mm por metro de deslocamento;
- Repetibilidade de $\pm 0,04$ mm por metro de deslocamento;
- Velocidade de deslocamento (X-Y) de até 150 mm.s^{-1} , podendo alcançar até 450 mm.s^{-1} para certas aplicações.

Preferencialmente, o sistema deve ser completamente computadorizado, permitindo programar funções tais como: (a) Velocidade e posição da peça; (b) Potência do feixe; (c) Vazão de gás de proteção; (d) Características gerais do feixe.

Geralmente o equipamento é refrigerado com água (deionizada), e deve ser prevista a instalação dessa facilidade, bem como proteção aos operadores em torno do mesmo, pois há a possibilidade do feixe sofrer deflexão.

Outrossim, um feixe poder ser dividido (por espelhos) em vários outros. Dessa forma, com um único aparelho gerador do LASER, é possível realizar diversas operações diferentes no mesmo tempo, sendo que esse método encontra muitas aplicações industriais.

LASER TIPO SÓLIDO

O equipamento disponível atualmente utiliza principalmente o Nd:YAG, que produz um LASER com comprimento de onda de $1,06 \text{ mm}$, o qual pode ser focado num muito pequeno diâmetro. Esse feixe pode ser contínuo, ou pulsado.

No tipo contínuo, a excitação é geralmente produzida por lâmpada de xenônio para potências de até 10 W , e de criptônio para maiores do que 100 W . Para modo de operação fundamental, ou TEM_{00} (veja próxima seção) a potência é menor do que 20 W , encontrando aplicações na soldagem de componentes eletrônicos e semi-condutores, devido à alta densidade de energia e precisão. No modo múltiplo de operação, a potência disponível pode alcançar até 1 kW , com uso principal na medicina e medições, sendo que o diâmetro do feixe está entre 1 e 10 mm .

No LASER tipo pulsado o feixe é produzido por excitação de flash de xenônio, ou criptônio. As variáveis de maior interesse são o tempo de ação e a energia do pulso, com a potência máxima de difícil determinação e podendo variar em sequências com idênticas condições. Com tempos de pulso entre $0,1$ e 20 ms , a energia no modo múltiplo pode alcançar até 500 J/pulso , diminuindo para 5 J/pulso no modo fundamental, em frequência de até 200 Hz . O diâmetro original do feixe se encontra entre 5 e 10 mm , sendo que esse tipo é geralmente empregado tanto para solda, quanto corte.

Uma informação de interesse no LASER pulsado, é da constante de tempo térmica (τ), ou o tempo que um único pulso leva para penetrar uma espessura (e) de um dado material com difusividade térmica conhecida (a). Essa constante é dada pela seguinte função:

$$\tau = f(e^2/a) \quad [14.2]$$

Numa espessura de $2,5 \text{ mm}$, por exemplo, o τ pode ser cerca de 14 s para o cobre puro; 133 s para o aço ao carbono e 379 s no Inconel. Entretanto, raramente é utilizado um único pulso, sen-

do usual várias dezenas num mesmo ponto, reduzindo substancialmente esse tempo.

Em suma, ainda necessitam ser aprimorados os seguintes aspectos dos equipamentos baseados no Nd:YAG:

- Melhorar a dissipação do calor, permitindo operações contínuas e/ou com maior potência;
- Melhorar o rendimento da excitação, o que resultaria num aumento da potência;
- Melhorar a cavidade ressonante, dispondo de maior potência no modo fundamental;
- Aumentar sua vida útil.

LASER TIPO GÁS

Nesse LASER o meio ativo é o dióxido de carbono (CO_2), sendo adicionados (em maior proporção) os gases hélio (He) e nitrogênio (N_2), mantidos à reduzida pressão - usualmente entre 30 e 100 Torr.

A excitação do LASER a gás pode ser realizada através de: (a) Descarga elétrica (corrente contínua) corona, se deslocando entre um cátodo e ânodo ativo, ambos eletrodos posicionados no interior da cavidade ressonante; (b) Rádio frequência, com os eletrodos no exterior da cavidade ressonante, o que aumenta a vida útil dos mesmos e minimiza o consumo do gás.

Seja qual for o método empregado, o nitrogênio é prontamente excitado, pois sua molécula necessita relativamente pouca energia para alcançar o nível superior, similar à do CO_2 . Dessa forma, a energia molecular vibracional do nitrogênio excitado é transmitida para o CO_2 através de colisões. Quando as moléculas desse último gás retornam para um estado intermediário de energia, emitem um fluxo contínuo de fótons no infravermelho - com comprimento de onda de 10,6 mm. Por sua vez, colisões adicionais com o hélio fazem com que o CO_2 volte mais rapidamente ao seu nível de energia mínimo, permitindo a todo o ciclo iniciar novamente e que maiores potências possam ser alcançadas. Além disso, devido ao fato do hélio possuir alta condutividade térmica, a dissipação do calor ocorre numa taxa mais elevada.

O resfriamento da cavidade ressonante se dá principalmente por convecção, sendo mais eficiente do que no tipo sólido (por condução), alcançando desde alguns Watts até cerca de 45 kW - com a atual tecnologia. Outrossim, a dissipação do calor gerado na cavidade ressonante é um dos principais fatores limitantes da potência dos LA-

SERs, sendo que várias técnicas foram desenvolvidas e classicamente os equipamentos são classificados da seguinte forma:

❑ Fluxo Lento e Axial do Gás

Esse é um dos primeiros modelos, com o gás se deslocando muito lentamente e no mesmo sentido que o feixe. Para economizar gás, algumas vezes o mesmo é recirculado, sendo utilizado catalizadores. O calor é dissipado por condução desde o gás para as paredes da cavidade e por difusão dessas para o ambiente. A potência é proporcional ao comprimento da cavidade, sendo cerca de 80 W.m^{-1} . Portanto, razões práticas limitam esse tipo em algumas centenas de Watts, sendo possível aumentar o comprimento da cavidade dobrando-a várias vezes e alcançar, dessa forma, cerca de 1 kW. Para um equipamento com essa potência, uma típica mistura de gases empregada consiste em 70%He; 20%N₂; 10%CO₂, com vazão aproximada de 90 l.h^{-1} .

Os principais empregos desse LASER são para perfuração de alta precisão, além de corte e solda de peças muito finas. Entretanto, esses equipamentos apresentam as desvantagens de possuírem uma relativamente curta vida útil e pequena potência, com dificuldade de controle.

❑ Fluxo Rápido e Axial do Gás

O princípio de operação desse tipo é similar ao anterior, mas o gás sofre circulação forçada axialmente no interior da cavidade, alcançando alta velocidade. O resfriamento do gás se realiza por trocadores de calor situados no exterior da cavidade ressonante e, por razões econômicas, o mesmo é recirculado. Entretanto, como ocorre alteração na sua composição, esse gás é continuamente regenerado. Sendo a taxa de extração do calor muito maior do que no de fluxo lento, nesse tipo de LASER a potência gerada é de aproximadamente 2 kW para cada metro de tubo, com equipamentos que produzem entre 500 W a 6 kW. O emprego desse LASER é principalmente no corte e solda, sendo que com potência de 1,5 kW (corrente contínua para excitação) utiliza tipicamente a mistura de 70%He; 25%N₂; 5%CO₂, numa vazão de aproximadamente 100 l/h.

❑ Fluxo Transversal do Gás

Nesse tipo, o fluxo de gás - forçado por ventiladores - é continuamente renovado e ocorre ortogonalmente à direção da produção do LASER. Com isso, é minimizada a limitação do comprimento da cavidade ressonan-

te apresentada pelos outros modelos. Conforme ilustrado esquematicamente na **Fig. 14.6**, todos os espelhos são refrigerados por água e os ânodos segmentados - para prevenir a formação de arcos - provocam descargas elétricas ortogonalmente ao fluxo de gás e ao eixo óptico do feixe. Nesse sistema, também pode ser empregada a pré-ionização do gás, através de um feixe de elétrons de baixa potência, com catalizadores para reconstituir o gás. O emprego desse LASER é principalmente na soldagem e tratamento térmico de superfícies, com a composição típica dos gases para 9,5 kW de potência sendo 60%He; 25%N₂; 10%CO₂; 5%O₂, numa (alta) vazão de até 800 l/h. Por ser compacto e a extração do calor se processar numa alta taxa, esse equipamento pode produzir até mais do que 25 kW.

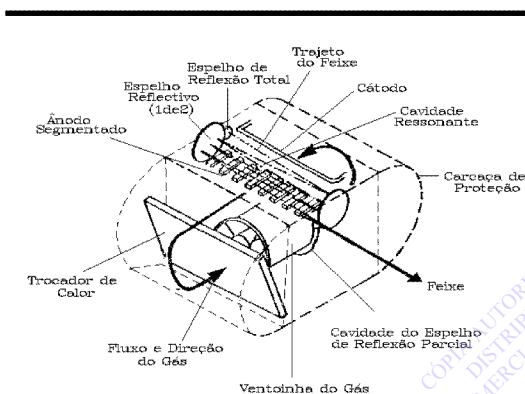


Figura 14.6 - LASER com Fluxo Transversal de Gás.

O sistema de fornecimento de potência para o LASER é denominado oscilador, sendo que os equipamentos acima descritos são, em geral, construídos com o mesmo do tipo estável. O sistema também pode empregar um oscilador instável, com ou sem elementos transmissivos no caminho ótico. Essa segunda opção - sem elementos transmissivos - aumenta a qualidade do feixe, com o mesmo apresentando forma tubular e o perfil de energia sendo anular (veja abaixo). Nesse caso, o item mais importante é a ampliação do feixe, definida como a razão entre seus diâmetros externo e interno, sendo que quanto mais alto for esse fator, maior a penetração e o foco.

LASER EXCIMER

O LASER tipo EXCIMER (do inglês “EXCited diMER”), deve seu nome ao meio ativo, o qual é formado por uma molécula diatômica, associada

à elétrons no estado estimulado e estado básico instável. Portanto, a molécula EXCIMER somente existe no estado excitado, sendo composta tipicamente por criptônio (Kr), ou xenônio (Xe) e um halogênio, tal como cloro (Cl), ou flúor (F). Dessa forma, o feixe LASER é formado pelo retorno dos átomos da molécula para seus estados não excitados, sendo o comprimento de onda do XeCl de 0,308 mm e do KrF de 0,248 mm. Os pulsos ocorrem em curtos períodos (tipicamente 30 nanosegundos) e apesar da potência dos mesmos atualmente não ultrapassar cerca de 200 W, o feixe (invisível) possui características únicas, as quais o tornam indispensável em micro-aplicações, quando um específico material necessita ser removido por ablação, ou seja, destruindo diretamente a ligação molecular existente na união. Para tanto, essas moléculas devem possuir energia de ligação inferior à do fóton do EXCIMER, como no caso dos polímeros. Outrossim, outra interessante aplicação desse LASER, é aquela sobre a superfície do alumínio, aumentando a rugosidade da mesma e reduzindo sua refletividade de cerca de 95% para menos de 14%. Como conseqüência, é possível realizar soldas por “keyhole” através do LASER CO₂ nesse material, com potência tão baixa quanto 1 kW.

CARACTERIZAÇÃO DO FEIXE DE ENERGIA

O feixe LASER possui algumas particularidades operacionais e controles únicos, tais como os seguintes

□ Absorção da Energia e Formação de Plasma

Os materiais à temperatura ambiente refletem parcialmente o LASER, principalmente considerando aquele produzido pelo CO₂ (10,6 mm). Nas aplicações iniciais desse processo, foi até imaginado que o mesmo não seria possível sobre alumínio e cobre. Entretanto, a absorção do infravermelho pelos metais aumenta rapidamente quando os pontos de fusão e vaporização são alcançados e, na realidade, o alumínio é hoje cortado - normalmente com oxigênio, ar, ou nitrogênio como gases auxiliares - com potência de 700 W e vaporizado com 1 kW. Em geral, a absorção de energia pelos metais é menor do que 10% à temperatura ambiente; 50% no ponto de fusão e alcança cerca de 90% na vaporização. Especificamente para soldagem, a densidade de potência do feixe deve ser tal, que a temperatura da superfície da peça se encontre no intervalo de fusão do material, enquanto

que no corte, a mesma pode ser suficientemente alta para vaporizá-lo, proporcionando um estreito ZAC e pequena distorção. Isso é conseguido através de um feixe com reduzido diâmetro.

Outro problema de absorção, é relativo à atmosfera que o feixe deve atravessar antes de atingir a superfície da peça, podendo existir contaminantes neste caminho e atenuação da energia do mesmo. Isto é particularmente importante no corte e na soldagem por furo controlado, ou "keyhole" (veja Capítulo 9 sobre o processo Plasma) de peças espessas em baixa velocidade, pois há formação de uma nuvem de plasma sobre a solda. Esse plasma resulta da ionização dos vapores metálicos e se a velocidade de deslocamento for menor do que cerca de 17 mm.s^{-1} (considerada baixa nesse processo), o mesmo reduz a intensidade de energia do feixe. Um dos meios utilizados para afastar esse plasma, é dirigir um jato de gás transversalmente ao feixe. Para LASER com potências de até 5 kW, os gases normalmente utilizados são misturas de He e Ar, ou N_2 e CO_2 , desde que esses dois últimos não reajam com o material base. Acima dessa potência, geralmente é empregado o He puro, pois o mesmo apresenta menor possibilidade de se ionizar sob o feixe.

□ Qualidade e Polaridade do Feixe

Quanto melhor é focado o feixe, maior sua qualidade. Por sua vez, o foco depende das características do caminho ótico empregado, bem como do Modo Transversal Eletromagnético, ou "TEM" (iniciais do inglês "Transverse Electromagnetic Mode", também conhecido como "Transverse Excitation Mode"). O TEM é consequência do forte campo eletromagnético formado pela oscilação da energia no interior da cavidade ressonante, podendo assumir diferentes formas, as quais determinam a distribuição radial de energia do feixe. O modo de distribuição dessa energia é caracterizado por dois subscritos à sigla TEM, os quais indicam o número de vales entre regiões de concentração da mesma, sendo os seguintes mais importantes:

- No "modo fundamental", ou TEM_{00} mostrado na Fig. 14.7, a distribuição da energia do feixe - na direção ortogonal à sua propagação - possui distribuição Gaussiana. Para uma dada potência, esse modo produz a máxima qualidade possível. Entretanto, o mesmo não é geralmente preferido para soldagem, mas sim em operações de furar e cortar, pois vaporiza o metal. Além disso,

vários fatores influenciam a qualidade do feixe - principalmente quando o mesmo é de alta potência - destacando-se a alteração da difração dos materiais que compõem certos dispositivos do equipamento, devido ao calor. Por outro lado, gases com grande massa molecular (como o freon) quando são atravessados pelo feixe, geralmente produzem resultados similares aos descritos no item anterior, diminuindo sua qualidade. Portanto, as soluções que atualmente se apresentam, são utilizar um modo TEM diferente do fundamental, ou um equipamento que não possua nenhum dispositivo transmissivo, normalmente o tipo com oscilador instável descrito.

- Com o "modo múltiplo", a distribuição da energia do feixe possui uma forma mais complicada, apresentando maiores ângulos de divergência e o mesmo não pode ser focado com densidade de energia similar ao "modo fundamental". Nesse modo, a energia é distribuída em dois lóbulos simétricos, conforme é ilustrado na Fig. 14.8 para o TEM_{01} , sendo que o TEM_{10} apresenta a mesma geometria, porém sofrendo um giro de 90° no plano, com os lóbulos sendo vistos no sentido longitudinal.

- O "modo misto", tal como o TEM_{00+01} , é geralmente melhor para soldagem e tratamento térmico, mas a decisão exata depende, entre outros fatores, do foco; da velocidade de deslocamento e do metal base.

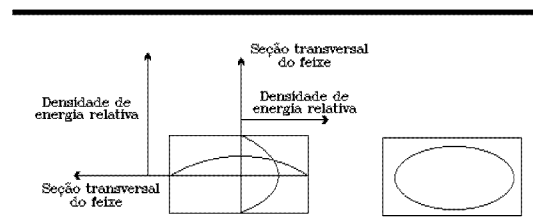


Figura 14.7 - Operação do LASER no Modo Fundamental (TEM_{00}).

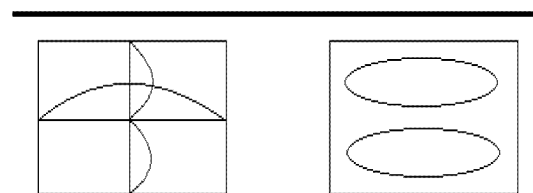


Figura 14.8 - Operação do LASER em Modo Múltiplo (TEM_{01}).

Outrossim, a polaridade do feixe é um item importante, principalmente para operações de corte. A melhor qualidade do mesmo é geralmente alcançada, quando a direção da solda/corte é paralela ao vetor de polarização do LASER. Para evitar muito baixa velocidade em soldas realizadas na direção ortogonal ao feixe, a polarização circular - ou idêntica em todas as direções - geralmente é utilizada.

❑ Foco e Densidade de Potência

A densidade de potência do LASER pode ser aumentada através de acurada focalização. O LASER sólido de baixa potência normalmente emprega lentes - revestidas com ZnSe em ambos os lados, por exemplo - enquanto o de maior potência a gás geralmente foca o feixe com espelhos metálicos refrigerados. Cobre com polimento muito fino é geralmente utilizado, mas revestimento com ouro apresenta maior refletividade, apesar de ser caro e altamente suscetível a danos. Portanto, esse último tipo geralmente pode distribuir o feixe entre as (possíveis) estações de trabalho, enquanto o espelho revestido com molibdênio opera no interior da mesma, já que é mais barato e menos suscetível a danos. Por outro lado, a facilidade de focar um feixe depende dos seguintes itens:

- Do seu comprimento de onda, o qual é fun-

ção do meio de ativação;

- Da sua divergência, que se relaciona com o Modo Transversal Eletromagnético no qual o LASER está operando.

Conforme a aplicação, o equipamento e o tipo do LASER, o diâmetro do feixe utilizado (d) pode variar desde cerca de 0,5 até 10 mm, enquanto o comprimento no qual o mesmo se mantém em foco - ou dimensão característica do equipamento (L) - deve alcançar vários milímetros, sendo que ambos obedecem às seguintes funções:

$$d = f(\lambda.F/D) \quad [14.3]$$

$$L = f[\lambda/(F/D)^2] \quad [14.4]$$

onde λ é o comprimento de onda; F a distância focal da lente e D o diâmetro do feixe antes de ser focado.

Portanto, conforme o feixe se afasta da lente, a sua densidade de energia aumenta, até alcançar um máximo no foco (menor diâmetro) e, então, decresce novamente.

Outrossim, a densidade de potência (DP) de um LASER pode ser estimada através da seguinte função:

$$DP = f(P.D^2)/(\lambda^2.F^2) \quad [14.5]$$

APLICAÇÕES

Na opção por qualquer processo, sempre se deve considerar os prós e contras. Portanto, a seguir são discriminadas algumas vantagens e desvantagens do LASER.

❑ O processo apresenta os seguintes pontos positivos, entre outros:

- Feixe com alta densidade de potência;
- Solda realizada com baixa energia;
- Muito pequena Zona Fundida a Zona Afetada pelo Calor (ZAC);
- Mínima distorção e tensão residual;
- Altas propriedades mecânicas da junta;
- Altíssimas velocidades de soldagem e/ou corte;
- Facilidade de automatização;
- O feixe não é perturbado por campos magnéticos;
- Possibilidade de operar em juntas de difícil acesso;

- Alto nível de qualidade da junta;
- Capacidade de soldar materiais dissimilares;
- Geralmente é desnecessário o uso de material de adição;
- Como óxidos, silicatos e outras impurezas são seletivamente vaporizadas, o feixe provoca uma certa “purificação” do metal de solda.

❑ Entretanto, o uso do LASER para soldagem apresenta as seguintes principais dificuldades:

- São necessários meios precisos e eficientes para posicionar a junta, pois as tolerâncias são muito estreitas;
- Alto capital inicial, quando comparado com os processos ditos convencionais;
- Devido às altas taxas de resfriamento, é possível ocorrer porosidade e formação de microestruturas frágeis na junta;
- Industrialmente, a máxima espessura con-

siderada prática para ser soldada se encontra atualmente em torno de 20 mm;

- É relativamente baixa a eficiência de conversão da energia (cerca de 10%);
- Nas operações que utilizam entre média e alta potência, é necessário empregar um dispositivo para controlar a produção do plasma que se forma, conforme descrito no item anterior.

A melhor solução industrial, é aquele equipamento que produz um feixe LASER ajustável às operações de soldagem, corte e tratamentos térmicos superficiais, para diversas espessuras e diferentes materiais. Entre os fatores mais importantes para alcançar esses objetivos, encontram-se os seguintes:

- Obtenção de um perfeito foco e conseqüente máxima densidade de energia;
- Produção de um feixe com pequeno comprimento de onda;
- Aumento da potência do equipamento;
- Redução das dimensões e custo do equipamento.

Portanto, há considerável interesse em LASER com pequeno comprimento de onda. O tipo sólido Nd:YAG está sofrendo desenvolvimentos, sendo que já é disponível com 1 kW de potência no modo contínuo. Entretanto, aquele com monóxido de carbono (CO) poderá oferecer maior potência e eficiência do que o do tipo sólido. O mesmo opera com um comprimento de onda de 5 mm e apresenta uma série de características interessantes para as necessidades acima descritas, mas enfrenta pro-

blemas com a dissipação de calor, pois trabalha em temperatura criogênica. Ambos os tipos podem ser conduzidos por fibras óticas, o que aumenta muito a facilidade e conveniência do manuseio dos mesmos.

O processo LASER de soldagem ainda não está popularizado e faltam procedimentos universalmente aceitos para cada aplicação. Isso é devido ao fato de que os mesmos dependem de diversos fatores operacionais específicos; tipo do equipamento e características intrínsecas do feixe utilizado.

A seleção da densidade de potência necessária do LASER para uma dada aplicação, pode ser realizada com o auxílio da **Fig. 14.9**, a qual apresenta as seguintes regiões: (A) Endurecimento da superfície por resfriamento muito rápido; (B) Formação de uma fina camada amorfa na superfície (taxa ultra-rápida de resfriamento); (c) Perfuração da superfície; (d) Soldagem por “keyhole”; (e) Endurecimento superficial por transformação de fase. Note-se que no tipo pulsado, é importante a energia e o tempo de sua interação com o material (ou a constante de tempo térmica - t). Além disso, às densidades de potência entre 10^7 e 10^9 W/mm², correspondem temperaturas de fontes térmicas da ordem de 20.000 a 36.000 K.

O LASER tipo pulsado é utilizado preferencialmente em solda ponto, ou a topo sobre materiais relativamente finos. Materiais mais espessos são normalmente soldados por “keyhole” (furo controlado), com gás argônio para proteção do metal fundido. Quando se adota esse procedimento, a

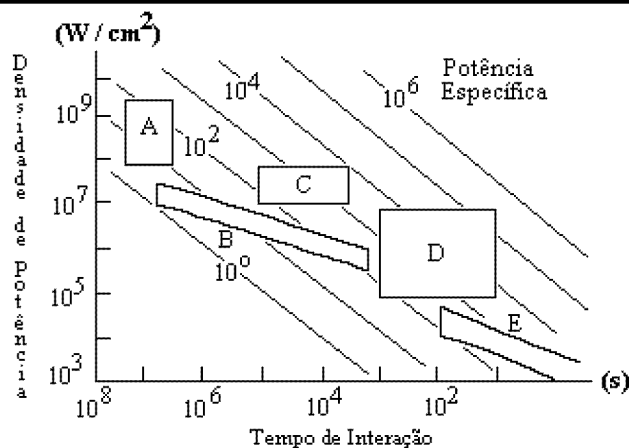


Figura 14.9 - Densidades de Potência Típicas, em Função do Tempo de Interação do Feixe com a Superfície, para Diversas Aplicações do LASER (vide texto).

soldagem deve iniciar com baixa velocidade, devido aos problemas de tolerância dimensional que possivelmente ocorrerão. No final do cordão, há tendência da formação de micro-rechue, com aparência de micro-fissura. Pode-se remediar esse problema, reduzindo a velocidade de soldagem, ou a potência, quando o feixe estiver se aproximando desse ponto.

Como mencionado previamente, as tolerâncias dimensionais da junta que será soldada por

LASER são bastante pequenas, como exemplificado na **Fig. 14.10** para juntas a topo e sobrepostas.

Outrossim, um dos fatores mais importantes na determinação das condições de soldagem por LASER é a penetração. As **Figs. 14.11** e **14.12** apresentam a variação da mesma em aço ao carbono e inoxidáveis austeníticos, respectivamente, em função da velocidade de deslocamento e da potência do feixe, com os outros parâmetros mantidos constantes.

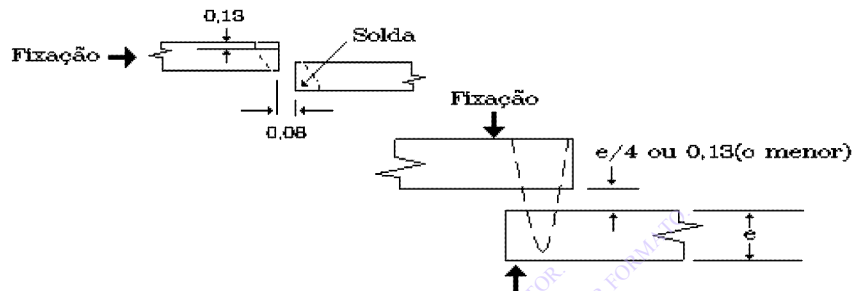


Figura 14.10 - Tolerâncias Dimensionais Típicas (em mm) para Juntas Soldadas por LASER.

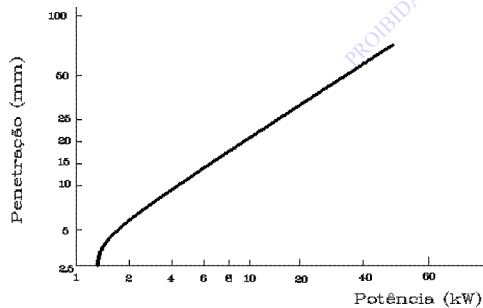


Figura 14.11 - Penetração como Função da Potência do Feixe LASER, à Velocidade de Soldagem de $25\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

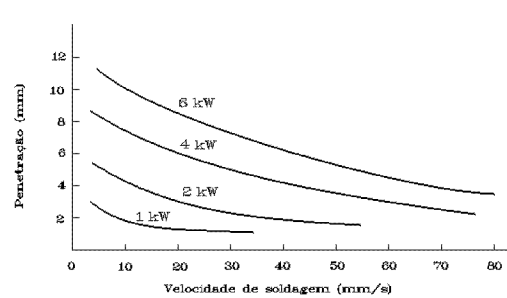


Figura 14.12 - Penetração como Função da Potência do Feixe LASER, em várias Velocidades de Soldagem.

**C
A
P
Í
T
U
L
O**

15

**SOLDAGEM POR
FEIXE DE ELÉTRONS**

INTRODUÇÃO	300
PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS	301
EQUIPAMENTO E CONTROLE DO PROCESSO	307
Juntas e Ambientes para a Soldagem	307
VARIANTES E PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM	309

INTRODUÇÃO

Este processo apresenta muito alta densidade de energia, sendo a mesma resultante do impacto de elétrons que foram acelerados no sentido da superfície de trabalho.

Dessa forma, o feixe interage com os átomos da matéria, convertendo a energia cinética dos elétrons em calor, ou energia de excitação atômica e molecular. Além de na soldagem, essa técnica é empregada desde no Microscópio Eletrônico de Varredura - onde possibilita aumentos de dezenas de milhares de vezes, com grande profundidade de foco - até na remoção de material; fusão; evaporação de filmes para revestimentos; radiação na medicina; tratamentos superficiais de materiais e implantação iônica, entre outras aplicações.

Na soldagem, a junta - que usualmente não necessita nenhum tipo de preparação - é fundida em toda sua espessura, geralmente sem metal de adição, formando a solda. Com a atual tecnologia, o metal base pode ser tão fino quanto uma folha de papel, ou até aproximadamente 150 mm em cobre; 250 mm em aço e 450 mm em ligas leves, com a solda apresentando excelentes características mecânico-metalúrgicas.

A primeira descrição conhecida de um feixe de elétrons, foi realizada por William Crookes na década de 1870, quando o mesmo estudava descargas elétricas. Cerca de vinte anos depois, Nicolai Tesla solicitou patente para um dispositivo, que produzia luz através do aquecimento de grafita por bombardeamento de elétrons num tubo evacuado. Utilizando uma metodologia similar, em 1895 Wilhelm Konrad von Röntgen descobriu os Raios-X.

A utilização do Feixe de Elétrons (FE) como processo industrial se deve, entretanto, às bem sucedidas experiências realizadas em 1905 por Marcello von Pirani, na fusão de metais refratários, tendo o mesmo solicitado a patente de um forno. Infelizmente, naquela época a engenharia do vácuo e a "ótica" dos elétrons estavam na infância, inviabilizando, dessa forma, maiores desenvolvimentos do assunto. Em torno de 1948, a Fundação Carl Zeiss (Alemanha) desenvolveu um equipamento capaz de realizar corte e solda de metais, utilizando uma relativamente alta tensão. Posteriores avanços teóricos e tecnológicos permitiram entre 1957 e 1961, que alguns Centros de Pesquisa (destacando-se a Comissão de Energia Atômica da França) construísem equipamentos altamente eficientes para fusão por feixe de elétrons, sendo dessa época em diante contínuo o

desenvolvimento dos mesmos para as mais diversas aplicações, incluindo a soldagem.

A Fig. 15.1 mostra esquematicamente os principais componentes de um equipamento. Os elétrons são produzidos pelo aquecimento de um cátodo emissor, geralmente tungstênio ou tântalo operando à temperatura de 2600 °C ou mais, os quais sofrem aceleração por diferença de potencial. O feixe é focalizado por "lentes" eletromagnéticas, com todo o conjunto (denominado canhão) mantido em alto vácuo (de 10^{-4} a 10^{-5} torr, ou ainda menor).

A peça, sobre a qual os elétrons serão lançados é mantida numa câmara, que normalmente é de alto vácuo (10^{-4} torr). Câmaras de médio vácuo (de 10^{-1} a 10^{-2} torr) ou sem vácuo algum, também são utilizadas, com essas últimas apresentando previsíveis problemas de diminuição na energia do feixe - por choque dos elétrons com as moléculas de ar e impurezas na atmosfera. Os canhões de elétrons para soldagem são normalmente produzidos com tensões de acelerações entre 15 e 175 kV e corrente do feixe entre 50 e 100 mA. Esse feixe é usualmente focado para diâmetros entre 0,1 e 0,5 mm, resultando em típicas densidades de potência na soldagem entre 10^7 e 10^9 W.mm⁻².

Algumas das características desse processo, que podem ser utilizadas com vantagem na soldagem, são:

- Menor energia de soldagem do que qualquer outro processo, para realizar trabalhos equívales;
- Transferência precisamente localizada de energia e definida para um restrito volume de material;

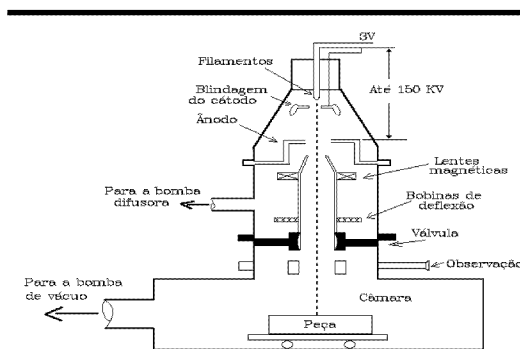


Figura 15.1- Elementos Essenciais do Equipamento Feixe de Elétrons (Canhão e Câmara).

- Atmosfera de alta pureza (vácuo), ou com gás inerte de proteção;
- Grande penetração, sendo possível variar a razão entre a altura e a largura do cordão desde 1:1, até cerca de 40:1;
- Muito alta velocidade de soldagem;
- Preciso controle dos parâmetros de soldagem e da geometria do cordão;
- Alta taxa de produção, com a possibilidade de ser utilizada grande câmara com várias peças no seu interior, ou câmara pequena e rápida operação de troca das peças, devido ao pequeno tempo gasto na obtenção do vácuo;
- Mínimas dimensões do metal de solda e ZAC, com conseqüente menor distorção das peças;
- Possibilidade de soldar peças no estado final de acabamento;
- Soldagem em locais de difícil acesso, através da deflexão magnética do feixe;
- Alguns favoráveis pré-requisitos para automação;
- Soldagem de um maior número de materiais do que por arco elétrico, além de entre dissimilares.

A **Tab. 15.1** ilustra alguns desses aspectos, quando o FE é comparado com o TIG e o MIG, para a soldagem do alumínio 2024-T6 em espessura de 13 mm.

Por sua vez, entre as principais dificuldades para se empregar esse processo, encontram-se as seguintes:

- O choque dos elétrons contra a superfície da peça produz Raios-X; elétrons secundários e, possivelmente, emissão termoiónica. Esse fato requer que a câmara seja blindada contra radiações;
- O alto custo do equipamento e acessórios;
- O relativamente alto custo da preparação precisa das juntas, pois o feixe possui geralmente um muito pequeno diâmetro, além da meticulosa limpeza necessária;
- As limitações dimensionais à peça imposta pela câmara;
- O tempo para obter alto vácuo em câmaras grandes;
- A exemplo do processo LASER, ocorre a formação de um plasma de baixa densidade na superfície da solda, quando essa é do tipo “keyhole”.

Tabela 15.1 - Energia e Velocidade de Soldagem* - Comparação entre os Processos Feixe de Elétron (FE), TIG e MIG

Processo	Características	Velocidade de Soldagem (mm/s)	Energia de Soldagem (kJ/mm)	Metal de Adição
FE	150 kV (1 passe)	14,8	0,15	Não
FE	55 kV (1 passe)	42,3	0,27	Não
MIG	Semi-automático (1 passe)	5,1	1,10	Sim
TIG	Manual (2 passes)	1,3	9,76	Sim
TIG	Automático (1 passe)	4,2	1,25	Sim

* Metal Base: Alumínio 2024-T6, com 13 mm de espessura.

PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS

Para utilizar com a máxima eficácia o FE na soldagem, é necessário estudar alguns dos princípios fundamentais que norteiam seu funcionamento.

A tensão de aceleração projeta os elétrons com velocidades que alcançam entre 20 e 60% aquela da luz. Geralmente se utiliza na soldagem tensões maiores do que 100 kV e, portanto, é necessário considerar os efeitos relativísticos. Nesses casos, a energia cinética absorvida pelos elétrons durante suas trajetórias através do campo de aceleração, é dada pela seguinte equação [15.1]:

$$E_c = \frac{m_e}{2} \cdot V_e \cdot \left(1 + \frac{3}{4} + \frac{V_e}{c^2} + \frac{5}{8} \frac{V_e^2}{c^4} + \dots \right) = e \cdot U$$

onde:

- me = massa do elétron em repouso (9,107.10⁻³¹ kg);
- V_e = velocidade que o elétron alcança (m.s⁻¹);
- c = velocidade da luz (no vácuo = 2,998.10⁸ m.s⁻¹);
- e = carga do elétron (1,602.10⁻¹⁰ A.s);
- U = tensão de aceleração do elétron (V).

Desta forma, as equações a seguir apresentadas - as quais descrevem os parâmetros mais importantes para a soldagem por FE - não foram obtidas através de um tratamento matemático simples.

Entre os fatores de maior interesse para a soldagem por FE encontram-se os seguintes:

❑ Potência e Grandezas Relacionadas

A potência do feixe é resultante do produto da tensão de aceleração U (V) pela sua corrente I (mA), ou seja:

$$P = U \cdot I \quad (\text{W}) \quad [15.3]$$

A densidade de potência depende da área da seção transversal do feixe A_o , com diâmetro d_o , dada por:

$$P_o = U \cdot \frac{I}{A_o} = 4U \cdot \frac{I}{(\pi \cdot d_o^2)} = U \cdot j \quad [15.4]$$

onde j é a densidade de corrente.

Por outro lado, a potência por unidade de volume do metal atingido pelo feixe é dada por:

$$P_v = \frac{P}{V} = \eta \cdot \frac{(U \cdot j)}{R} \quad [15.4]$$

onde η é o rendimento do processo, ou seja, a razão entre a potência absorvida pelo material e a potência do feixe incidente, enquanto R é a dis-

tância no material, na qual o elétron transfere praticamente toda sua energia, tomada numa ortogonal à superfície. Uma das fórmulas propostas para a estimativa de R é:

$$R \cong 2,1 \cdot 10^{-12} \cdot U^2 / \rho \quad [15.5]$$

sendo ρ a massa específica do material considerado.

Dessa forma, a Eq. 15.4 pode ser re-escrita como:

$$P_v \cong j/U \quad [15.6]$$

Portanto, P_v somente pode ser aumentada através de j , sendo muito importante sua consideração em processos não térmicos, ou processos térmicos onde o aquecimento do material no ponto de ação ocorre numa forma quase-adiabática, isto é, sem condução notável de calor durante a incidência do feixe.

Para melhor apreciar o emprego do FE, na Fig. 15.2 é exibida a relação entre a potência (P) e a densidade de potência (P_o), além das regiões em que se situam os processos mais importantes, com as respectivas tensões de aceleração e diâmetro do feixe em cada caso. Enfatiza-se que nem toda potência do feixe é aproveitada, sendo a perda média para alto e médio vácuo entre 5 e 15%, enquanto no caso sem vácuo a mesma pode ser maior do que 50%.

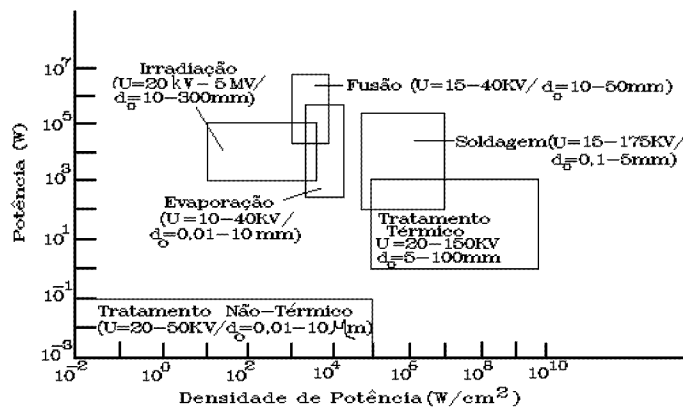


Figura 15.2-Aplicações do FE, em função da potência e densidade de potência do feixe (com tensão “ U ” e diâmetro “ d_o ”).

□ Geração dos Elétrons

Os elétrons devem ser produzidos; acelerados por campos eletrostáticos e modelados num feixe. O tungstênio permanece o mais importante material do cátodo, seguindo pelo tântalo, assim com tungstênio ligado com elementos que aumentam a emissividade e o hexaboreto de lantânio (LaB_6).

O mais importante elemento individual na coluna do canhão é a fonte de elétrons, a qual pode ter vida útil tão curta quanto 20 horas, ou alcançar até 500 horas. Além do tipo de material, o perfil do cátodo afeta a distribuição da densidade de energia; posição do foco e ângulo de convergência, entre outros fatores. Nos primeiros equipamentos, era padrão o uso de finos filamentos aquecidos diretamente, os quais apresentavam inconsistentes propriedades e sofriam deslocamento devido ao calor. Ainda mais importante que isto, era o fato de ocorrer grande distorção da densidade de potência, pois a superfície de emissão possuía a forma elipsoidal. Com o passar dos anos, este tipo de filamento foi preterido em relação àquele em forma de fita, também diretamente aquecido. Em densidades de correntes não excessivas e a emissão sendo limitada à uma área circular, o filamento em fita diminui a aberração do feixe. Entretanto, em altas potências a superfície de emissão desses filamentos sofre alteração na geometria. Com a constatação de que qualquer filamento diretamente aquecido, tem associado um forte campo magnético produzido pela corrente, estão sendo utilizados modernamente cátodos rígidos indiretamente aquecidos evitando, dessa forma, a distorção do mesmo e a geração de campos magnéticos auto-induzidos.

□ Carga Espacial do Feixe

O efeito da carga espacial intrínseca é caracterizada por um fator independente do tipo do canhão de elétrons, sendo dado por:

$$Z = I \cdot U^{-3/2} (A \cdot V^{-3/2}) \quad [15.7]$$

Se Z for menor do que $10^{-8} A \cdot V^{-3/2}$, os efeitos da carga espacial do feixe são negligenciáveis. Ocorrendo o contrário, a geometria do feixe é principalmente influenciada por esse fator.

□ Corrente do Feixe

A Fig. 15.3 apresenta algumas das principais geometrias empregadas para o canhão de elétrons.

Nessa figura estão ilustrados cátodos com pe-

quena (a-c) e grande (d) área superficial, sendo que alguns casos (b-d) apresentam eletrodos de foco (EF) e de controle (EC) na mesma posição. Portanto, os elétrons, após deixarem o cátodo, formam um feixe após passarem pelo eletrodo de focalização e/ou de controle e ânodo.

A corrente desse feixe é função da tensão de controle, guardando a seguinte relação com a mesma:

$$I = G \cdot U_c^{3/2} \quad [15.8]$$

onde G é um fator geométrico, que considera a configuração do eletrodo de controle e da superfície emissora. Por sua vez, U_c é função do potencial do eletrodo de controle e da tensão de aceleração.

□ Diâmetro e Abertura do Feixe

O menor diâmetro do feixe não é de simples determinação, sendo usualmente tomado, no foco, como:

$$d = 2 \cdot F \cdot (U_0/U)^{1/2} \quad [15.9]$$

onde F é o comprimento focal do sistema de imersão, ou seja, depende da tensão do eletrodo de controle, enquanto U_0 representa a energia inicial (diferença de potencial).

Por sua vez, o ângulo de abertura do feixe é dado por:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \left(\frac{U_0}{U} \right)^{1/2} \quad (rad) \quad [15.10]$$

Como α é da ordem de 10^{-2} rad, com $d = 0,5$ mm o feixe aumenta cerca de 1 mm numa distância de 43 mm do plano de foco. Em consequên-

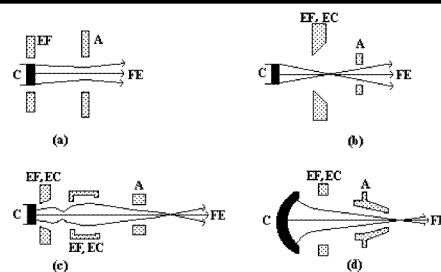


Figura 15.3 - Algumas Geometrias de Canhões Tipo Axial para o Feixe de Elétrons (vide texto). A=Ânodo; C=Cátodo; EC=Eletrodo de Controle; EF=Eletrodo de Foco; FE=Feixe de Elétrons.

cia, a densidade de potência média nesse comprimento é reduzida em torno de 1/4 daquela no ponto focal. Dessa forma, a posição do ponto de focalização do feixe em relação à superfície da peça, afeta a geometria do cordão e a penetração da solda, sendo superfocalizado, quando focado acima da superfície da peça e subfocalizado se estiver abaixo da mesma.

□ Formação da Solda

Dois modelos complementares tentam explicar como ocorre a formação do furo controlado (“keyhole”), o qual é responsável pela realização da solda de grande penetração permitida por esse processo.

A Fig. 15.4 ilustra o primeiro modelo. Para o mesmo este fenômeno é descrito através das seguintes etapas: (a) O feixe de elétrons atinge a superfície da peça e produz uma poça de fusão; (b) O metal assim fundido é deformado devido ao equilíbrio entre as pressões do vapor e hidrostática, sendo iniciada a formação do furo no material base; (c) A densidade de potência do feixe aumenta, bem como a temperatura local, sendo produzido vapor de saturação (cuja pressão é estimada em $3 \cdot 10^2$ Pa); (d) Ocorre uma ainda maior densidade de potência, grande produção de vapor e elevado aumento da temperatura, com expulsão do metal fundido desde o interior da cavidade formada.

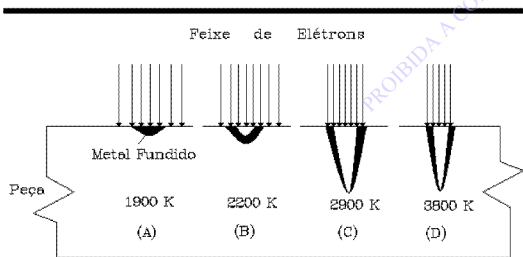


Figura 15.4 - Primeiro Modelo da Formação do “Keyhole” no Feixe de Elétrons.

Entretanto, quanto mais o feixe penetra num material, sua ação também é diminuída, pois é finita a distância na qual o mesmo perde praticamente toda a energia, sendo isso dado pela Eq. 15.5. Portanto, o segundo modelo descreve o fenômeno como ocorrendo nas seguintes etapas, apresentadas na Fig. 15.5: (a) Há super-aquecimento sob a superfície do material base, numa intensidade que não pode ser compensada pela condução do calor pelo restante da peça; (b) Ocorre fusão do material base; (c) A pressão de vapor expulsa o metal líquido e o ciclo reinicia.

Portanto, ambas as teorias se complementam, pois aquela que supõe ser o “furo” obtido numa operação somente, têm sido comprovada para condições de baixa e média densidade de potência, sobre materiais com alta condutividade térmica e elementos de grande número atômico. O modelo do furo realizado por etapas, somente se aplica com altas densidade de potência e energia dos elétrons, sobre elementos com menor número atômico.

O movimento da peça (ou do feixe) provoca distorção no furo, conforme ilustrado na Fig. 15.6. Forma-se uma frente de fusão, com geometria determinada pelos parâmetros do feixe, bem como de solidificação, da maneira indicada naquela figura. O material alcança, então, temperaturas de 1,1 à 1,6 vezes àquela de sua fusão.

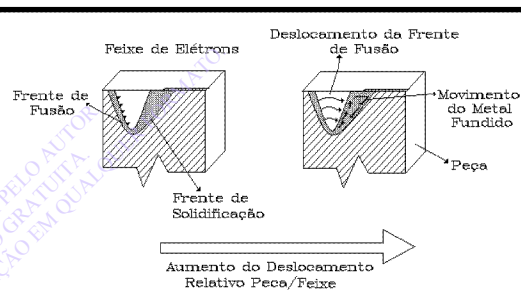


Figura 15.6 - Efeito do Deslocamento Relativo Peça/Feixe de Elétrons sobre a Formação da Zona Fundida Periférica.

□ Penetração da Solda

Uma estimativa prévia deste fator apresenta alto interesse, pois diminui o número de experimentos que se fazem necessários antes da real operação de soldagem. As fórmulas apresentadas variam no grau de complexidade, sendo que duas geralmente utilizadas são apresentadas nas Eqs. 15.11 e 15.12 a seguir:

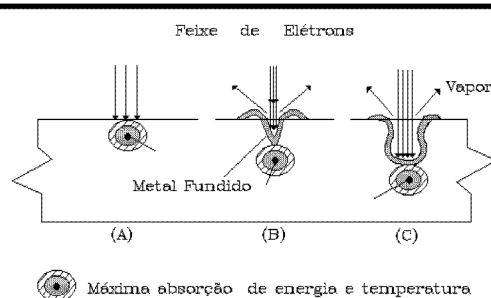


Figura 15.5 - Segundo Modelo da Formação do “Keyhole” no Feixe de Elétrons.

$$h = 2 \frac{U \cdot I}{d_F \cdot V} \left(\frac{I}{c \cdot \rho \cdot (T_g - T_o) + H} \right) \cdot \left(\frac{I}{1 + 1,2 \cdot 10^{-6} \lambda \cdot \left[\frac{I}{d_F \cdot V} + \frac{I}{2a} \right]} \right) \quad (m) \quad [15.11]$$

onde:

U = tensão de aceleração (V);

I = corrente do feixe (A);

d_F = diâmetro do feixe sobre a peça (m);

V = velocidade de soldagem ($m \cdot s^{-1}$);

c = calor específico do material ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$);

ρ = massa específica do material ($kg \cdot m^{-3}$);

T_g = temperatura de fusão do material (K);

T_o = temperatura que o material se encontra no momento da soldagem, ou pré-aquecimento (K);

H = entalpia de fusão ($J \cdot m^{-3}$);

λ = condutividade térmica do material ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$);

a = difusividade térmica ($m^2 \cdot s^{-1}$).

Desde que $\alpha_F \gg d_F/2h$, onde α_F é a abertura do feixe no ponto de foco (rad) e d_F como acima descrito, a seguinte equação (muito mais simples do que a anterior) pode ser utilizada:

$$h = \left(\frac{U \cdot I}{\alpha_F \cdot V} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (m) \quad [15.12]$$

Por sua vez, a penetração atinge um máximo, quando:

$$\alpha_F = \left(0,735 \cdot \frac{Q \cdot V}{R \cdot U} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (rad) \quad [15.13]$$

onde:

Q = quantidade total de calor para aquecer e evaporar a unidade de volume do material;

R = “brilho” do feixe (veja abaixo), sendo que na soldagem esse fator deve ser alto.

Assumindo densidade de corrente uniforme sobre a área do foco e no ângulo sólido, no momento em que a corrente de saturação for atingida, o “brilho” do feixe neste instante é:

$$R_s = \frac{I}{\pi} j_s \frac{e \cdot U}{K \cdot T_k} \quad [15.14]$$

onde:

j_s = densidade da corrente de saturação;

e.U = energia do elétron (sua carga x tensão de aceleração);

K = fator de proporcionalidade.

Portanto, é possível aumentar R_s atuando sobre a tensão de aceleração e densidade de corrente. Essa última pode ser tornada maior, através da troca, por exemplo, do cátodo de tungstênio pelo de LaB_6 .

Entretanto, diversos fatores não foram aqui considerados, ou seja:

- A posição do foco do feixe com relação à superfície da peça - assunto que será tratado mais adiante;
- A distribuição da densidade de corrente;
- A deflexão do feixe na zona fundida periférica do “keyhole”;
- O plasma produzido sobre o “keyhole”, assim como a oscilação do mesmo agindo sobre o feixe;
- A dinâmica dos processos que ocorrem no “keyhole”.

Apesar destes fatores não terem sérias implicações sobre a penetração, os mesmos podem alterar a geometria e a formação da solda, além de influírem sobre o desenvolvimento de discontinuidades, como porosidade e trincas, entre outras.

Para evitar os relativamente complicados procedimentos utilizados nas equações acima, necessários para a determinação do diâmetro do feixe no ponto focal, ou da abertura do mesmo, a seguinte estimativa também pode ser empregada para a penetração:

$$h = k_m \cdot \frac{U^a \cdot I^b}{V^c} \cdot f \quad (m) \quad [15.15]$$

onde:

k_m = característica específica da máquina;

f(m) = constante que engloba as propriedades dos materiais;

a = constante entre 1 e 1,5;

b = constante, aproximadamente 1;

c = constante entre 0,2 e 0,6.

❑ Energia de Soldagem

Considerando-se o rendimento térmico r do processo, a energia de soldagem por unidade de comprimento do cordão de solda é dada por:

$$E = rx \frac{UxI}{V} \quad (J/mm) \quad [15.16]$$

Como na soldagem ao arco elétrico, esse é um importante fator para a determinação das características e propriedades mecânico/metalúrgicas da junta. Para uma dada energia de soldagem, o feixe deve ser subfocalizado cerca de 50 à 75% da espessura da peça que será soldada. Dessa forma, se obtém a máxima penetração e razão penetração/largura do cordão. Além disso, a combinação da energia e potência de soldagem determina, praticamente, a espessura de um dado material que pode ser soldado com penetração total, conforme ilustrado na **Fig. 15.7**. Entretanto, a redução da velocidade para permitir a penetração desejada, pode ser em muitas situações inaceitável sob o ponto de vista metalúrgico.

Por sua vez, a área da superfície fundida normal à direção de soldagem é função da energia, sendo dada pela seguinte equação, desde que $V_1 < V < V_2$ (fato que ocorre na maioria das vezes):

$$A = \eta \frac{E}{\rho c \cdot (v \cdot T_s - T_o) + H} \quad [15.17]$$

onde:

η = eficiência interna, determinada pelas perdas devido à condução de calor;

ρ = massa específica do material soldado;

\bar{c} = calor específico médio entre temperaturas T_o e vT_s ;

v = razão entre a temperatura média na zona fundida periférica do cordão e a temperatura de fusão do material soldado, com os seguintes valores: aço = 1,1 à 1,2; titânio e suas ligas = 1,2; alumínio e suas ligas = 1,5 à 1,6;

T_s = temperatura de fusão do material;

T_o = temperatura de pré-aquecimento da peça;

H = entalpia de fusão;

V_1 = velocidade de soldagem tão baixa, na qual as perdas de calor, e como consequência h , se tornam dependentes do material;

V_2 = velocidade de soldagem tão alta, que provoca uma relação direta entre a mesma e a taxa de material vaporizado, afetando substancialmente o equilíbrio de energia;

V = velocidade de soldagem, geralmente maior do que V_1 e menor do que V_2 .

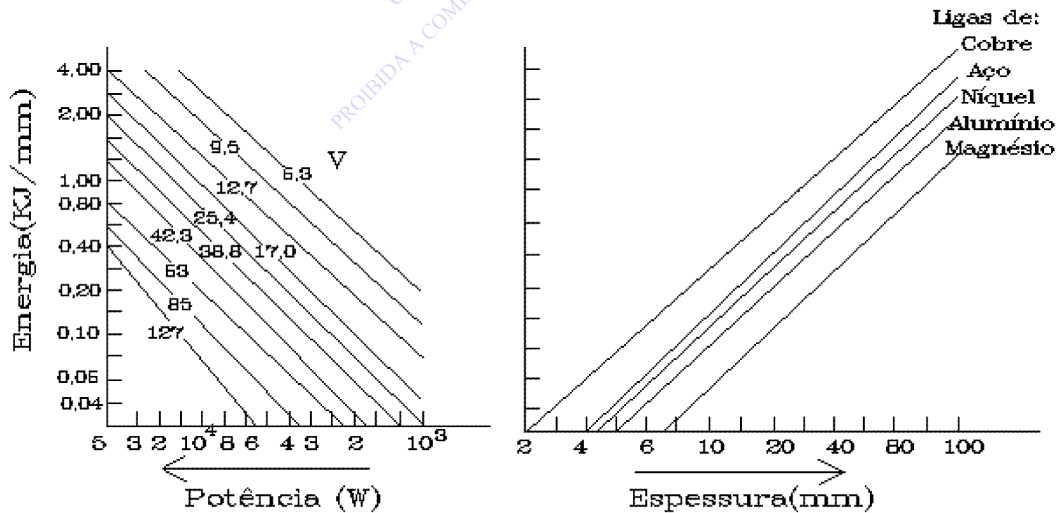


Figura 15.7 - Determinação das Condições de Soldagem (“keyhole”) por Feixe de Elétrons, para um dado Tipo e Espessura de Material (V= Velocidade de Soldagem mm.s⁻¹).

EQUIPAMENTO E CONTROLE DO PROCESSO

O equipamento para soldagem por feixe de elétrons (FE) possui alguns componentes básicos, os quais são: (a) Canhão de elétrons; (b) Sistema para acompanhamento visual da solda (direto, ou indireto); (c) Câmara de vácuo; (d) Sistema de bombeamento de vácuo e controles; (e) Sistema de fornecimento da potência requerida e controles; (f) Sistema de manipulação e posicionamento da peça e controles; (g) Sistema de manipulação do canhão de elétrons e controles.

O item (c) é obviamente dispensável, se a solda for realizada fora do vácuo, enquanto o (d) sempre é necessário, pois o canhão opera no vácuo, sendo o (g) dependente do grau de sofisticação e/ou técnica utilizada como, por exemplo, oscilar o feixe. Todos os outros itens são essenciais.

Um dos problemas apresentados pelo sistema de foco convencional, é que nas soldas com penetração parcial, a sublimação dos metais e os íons positivos produzidos na cavidade não tem outro caminho para saída à não ser o mesmo do feixe. Esse fato provoca defeitos na raiz da solda. Para resolver esse problema, outras soluções estão sendo modernamente aplicadas tais como, por exemplo, o sistema com “lentes” magnéticas duplas, mostrado na **Fig. 15.8**. O mesmo permite variar não somente a posição do foco mas, também, o ângulo de convergência do feixe focado. Isso altera a distribuição tri-dimensional da densidade de potência na vizinhança do ponto de interesse. Através da seleção de diferentes correntes na lente superior, a configuração do feixe pode ser alterada, enquanto a lente inferior é utilizada para controlar a posição final do foco com respeito à peça.

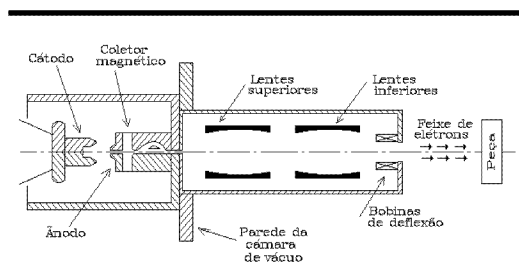


Figura 15.8 - Sistema de Lentes Magnéticas Duplas no Feixe de Elétrons.

JUNTAS E AMBIENTES PARA A SOLDAGEM

No item anterior foram estudados os principais fatores que caracterizam o feixe e, de maneira geral, para realizar praticamente a solda, deve-se atuar sobre as variáveis operacionais básicas do mesmo, as quais são: (a) Tensão de Aceleração; (b) Corrente do Feixe; (c) Velocidade de Soldagem; (d) Corrente de Focalização; (e) Distância do Canhão à Peça.

O diâmetro do feixe no foco é determinado pelos seguintes principais fatores: (a) Tipo particular de canhão utilizado; (b) Corrente de focalização (responsável pela distância focal do feixe); (c) Distância do canhão à peça; (d) Tensão de aceleração; (e) Corrente do feixe; (f) Posição do foco em relação à superfície da peça. Como foi ilustrado na **Fig. 15.7**, a penetração não é influenciada pela posição de soldagem, sendo a combinação dos parâmetros a principal responsável pela mesma.

A máxima eficácia técnico/econômica do FE somente poderá ser obtida, se forem inteligentemente exploradas as novas concepções que o processo possibilita. Talvez a alteração mais significativa sobre a soldagem a arco convencional, reside no projeto da junta, com a **Fig. 15.9** exemplificando algumas situações. Além disso, como foi mostrado na **Tab. 15.1**, o FE apresenta menores tempo e energia para realizar uma dada solda, quando comparado com qualquer outro processo.

Por outro lado, dependendo da aplicação específica; nível de qualidade desejado; volume da

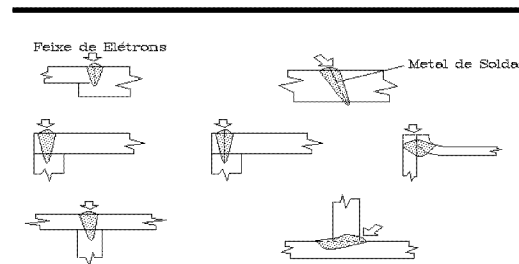


Figura 15.9 - Típicas Juntas Utilizadas para o Feixe de Elétrons.

produção e capital disponível, existem três opções para operar com o FE, as quais possuem características próprias e que são as seguintes:

□ Alto vácuo

Convencionalmente a soldagem está sendo realizada em alto vácuo, quando a câmara possui no máximo 10^{-4} torr, sendo que o canhão é mantido entre 10^{-4} a 10^{-5} torr. A interação dos elétrons do feixe com as moléculas da atmosfera, é proporcional à concentração das mesmas, sendo que a frequência relativa de colisões entre 10^{-5} torr e 1 atm aumenta cerca de 100 milhões de vezes (!). Esse dado é importante, pois além desses choques reduzirem a energia dos elétrons - e por consequência a penetração na peça - o feixe se torna maior.

Os equipamentos utilizados nesta condição geralmente operam com tensão de aceleração entre 15 e 150 kV, em potências que raramente ultrapassam 30 kW e permitem que a distância canhão/peça varie desde cerca de 250 mm com 30 kV, até mais do que 1 m na máxima tensão.

A junta soldada em alto vácuo apresenta menores ZAC e dimensões do metal de solda, do que quando realizada à pressão atmosférica, sendo esta a melhor opção para materiais altamente reativos; metal de solda praticamente sem contaminação alguma e desgaseificado.

Nesse caso, a câmara impede a soldagem de peças de qualquer tamanho, além do que, o tempo para evacuar a mesma pode se tornar um impedimento para alta produtividade. Atualmente, o vácuo é obtido por uma bomba mecânica (de pistão) em conjunto com outra de difusão (óleo), cujas características dependem da rapidez que se deseja alcançar a pressão adequada, bem como do volume da câmara. Por exemplo, uma câmara com cerca de 8 m³, utilizando uma combinação de bombas mecânicas e de difusão, com capacidade de 17 e 1100 m³/minuto, respectivamente, pode alcançar 10^{-4} torr em torno de 9 minutos.

□ Médio Vácuo

Esse nível de vácuo é usualmente entendido como entre 10^{-1} e 10^{-2} torr, mas também pode ser referido ao intervalo 2×10^{-1} a 10^{-3} torr, com o canhão mantido à mesma pressão do alto vácuo. Para o canhão, a bomba utilizada é de difusão, enquanto que a câmara é normalmente evacuada com uma bomba mecânica. Geralmente, as tensões de aceleração se situam entre 60 e 150 kV, com máxima potência de 25 a 30 kW e a peça devendo se situar à menos de 1 m do canhão, na máxima tensão.

A principal vantagem de utilizar o médio vácuo, é a rapidez com que a câmara alcança a pressão necessária, tornando o processo mais versátil do que o alto vácuo. Entretanto, os gases na atmosfera podem inviabilizar a soldagem de metais altamente reativos, ou que não admitam contaminação, pois à pressão de 10^{-3} torr a proporção desses gases é cerca de 1,3 ppm (partes por milhão), enquanto que à 10^{-1} torr eles estão numa concentração 100 vezes maior. Mesmo assim, a atmosfera é menos contaminada do que aquela existente nos processos de soldagem a arco com gás de proteção inerte. Por outro lado, a penetração é reduzida em cerca de 10%, com relação ao alto vácuo, além do feixe ser ligeiramente maior.

□ Pressão Atmosférica

Nesse caso, os elétrons são gerados no canhão mantido em alto vácuo, como nas situações anteriores. Após deixar o canhão, o feixe passa por uma coluna de transferência, emergindo para a atmosfera. Essa coluna consiste de várias câmaras distintas de bombeamento, separadas por pequenos orifícios mantidos em níveis de pressão progressivamente crescentes até a saída.

Os equipamentos normalmente trabalham com tensão de aceleração altas (entre 150 e 175 kV), potência de 12 a 25 kW e a distância peça-canhão raramente ultrapassa 15 mm, sendo que numa distância superior à 150 mm o feixe deixa de ser efetivo para soldagem.

Apesar dessa opção apresentar menor custo, pois possibilita maior produção e não necessitar câmara, sua aplicação nem sempre é possível sobre todos os metais, devido ao direto contato com a atmosfera. Entretanto, este ponto negativo pode ser minimizado, à exemplo da soldagem a arco, através do uso de um gás de proteção. Nesse caso, a penetração é profundamente influenciada pelo tipo de gás de proteção empregado, sendo maior para aquele que possuir a menor massa molecular e densidade, conforme exibido na **Fig. 15.10** para um aço baixa liga sob argônio, hélio e ar. Na mesma figura também é mostrado, que o aumento da velocidade diminui significativamente a penetração. Por outro lado, para mesmas condições de soldagem, quanto maior a distância canhão-peça, menor a penetração.

No ambiente da atmosfera, as condições de operação diferem substancialmente daquelas de alto e médio vácuo. Há grande dispersão do feixe e perda de energia dos elétrons; a soldagem geralmente se realiza com distância canhão-peça menor do que 10 mm e a penetração é notavelmente

reduzida, raramente ultrapassando 15 mm, podendo alcançar 30 mm em casos excepcionais.

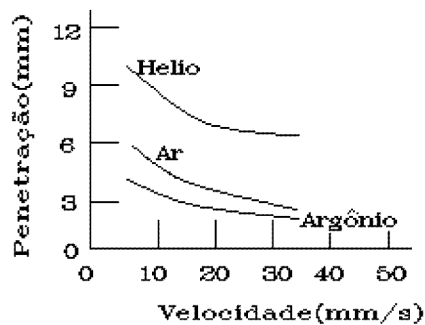


Figura 15.10 - Efeito da Atmosfera e Velocidade de Soldagem do Feixe de Elétrons sobre a Penetração.

A largura do cordão de solda, medida na metade de sua altura, varia muito pouco em função da penetração do feixe; distância do canhão à peça e velocidade de soldagem. Entretanto, a penetração e a largura da solda na sua superfície são notavelmente influenciadas, principalmente pela potência e velocidade de soldagem. A Fig. 15.11 mostra o efeito da potência do feixe sobre a penetração e a largura do cordão de solda (medida na sua superfície), para uma distância canhão-peça de 15 mm e velocidade de soldagem de 15 mm.s⁻¹. Por outro lado, a Fig. 15.12 ilustra a influência da velocidade de soldagem sobre as mesmas dimensões do cordão, com uma distância canhão-peça de 18 mm e potência de 50 kW.

As duas últimas figuras citadas apresentam dados obtidos com a soldagem ao ar de um aço carbono-mangânês.

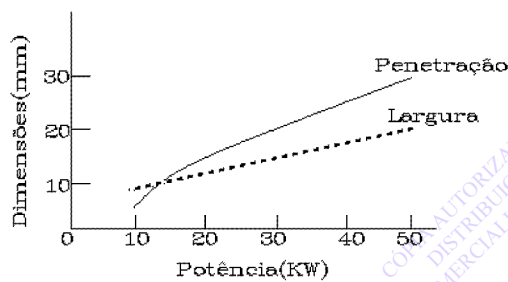


Figura 15.11 - Influência da Potência (Feixe de Elétrons) sobre a Geometria da Solda.

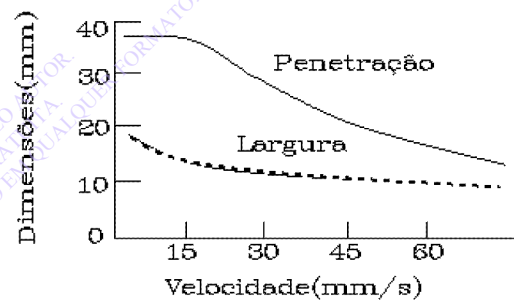


Figura 15.12 - Efeito da Velocidade de Soldagem (Feixe de Elétrons) sobre a Geometria da Solda.

VARIANTES E PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

Um dos dispositivos essenciais para que a solda por FE seja realizada com a precisão geralmente exigida, é aquele relacionado com o controle e direcionamento do feixe. Talvez o mais antigo sistema, seja aquele em que, antecedendo o canhão, um estilete percorre a junta e atua sobre seu posicionamento. Entretanto, entre outros tipos de desvio que este feixe pode sofrer, há a deflexão magnética causada pela peça, ou elementos de fixação da mesma, sendo esse fenômeno notável em soldas longas. O sistema de estilete nada informa sobre o desvio do feixe, só indica o caminho que ele deve percorrer. Modernamente, sistemas de varredura de luz com feixe secundário de elétrons de baixa potência, ou com LASER, estão sendo empregados em combinação com robôs.

A oscilação do feixe é um artifício que pode ser empregado na soldagem de juntas mal posicionadas; muito largas; ou nas quais se deseja maior uniformidade da geometria do cordão e/ou menor taxa de resfriamento da solda. Essa oscilação normalmente possui amplitudes entre 0,2 e 3,0 mm, em frequências de 30 à 1000 Hz, também reduzindo a porosidade através da melhor retirada de voláteis do metal de solda. Em relação à junta, essa oscilação pode ser efetuada no sentido transversal, ou longitudinal, geralmente de forma circular; senoidal; ou reta. A exata combinação da frequência e amplitude a ser empregada, deve ser estabelecida através de experiências, já que a frequência natural de vibração da peça de fusão deve ser evitada pois, entre outros problemas, pode causar

deformação da mesma.

A máxima penetração que pode ser atingida é uma questão relacionada à física da soldagem, mas não leva em consideração restrições operacionais de outra natureza. Entre as mesmas, encontra-se a alta pressão hidrostática do metal fundido em grandes espessuras, sendo que seções de até 100 mm são soldadas na posição plana, enquanto maiores seções devem ser executadas na posição horizontal. Caso o feixe atue somente na vertical, o mesmo pode ser desviado magneticamente, com vantagens, se for considerada a possibilidade da ocorrência de arco pela alta tensão no método convencional. Outrossim, a adição de metal e solda multi-passe é uma solução, quando há problemas de origem metalúrgica na realização do cordão num passe único.

Os materiais geralmente soldados pelo feixe de elétrons, são todos os tipos de aços; alumínio, titânio, cobre, zircônio e suas ligas, além das várias combinações possíveis relacionadas a seguir:

- Aços: Aços; Tântalo e suas ligas; Titânio e suas ligas; Vanádio; Tungstênio e suas ligas; Zircônio; Aços; Berílio e suas ligas; Cobre e suas ligas; Molibdênio e suas ligas; Níquel e suas ligas; Ouro; Platina; Prata e suas ligas; Alumínio e suas ligas.
- Alumínio e suas ligas: Alumínio e suas ligas; Berílio e suas ligas; Germânio; Ouro; Cobre e suas ligas; Magnésio e suas ligas; Molibdênio e suas ligas; Níquel e suas ligas; Platina; Prata e suas ligas; Silício; Aços; Tântalo e suas ligas; Titânio e suas ligas; Vanádio; Tungstênio e suas ligas; Estanho; Zircônio.
- Berílio e suas ligas: Berílio e suas ligas; Cobre e suas ligas; Aços; Titânio e suas ligas.
- Chumbo: Chumbo.
- Cobalto: Cobalto.
- Cobre e suas ligas: Cobre e suas ligas; Molibdênio e suas ligas; Níquel e suas ligas; Platina; Prata e suas ligas; Aços; Titânio e suas ligas; Tungstênio e suas ligas; Estanho; Zircônio; Ouro; Alumínio e suas ligas; Berílio e suas ligas.
- Estanho: Estanho; Alumínio e suas ligas; Tungstênio e suas ligas; Cobre e suas ligas.
- Germânio: Ouro; Platina; Prata e suas ligas; Alumínio e suas ligas.
- Háfnio: Háfnio.
- Magnésio e suas ligas: Magnésio e suas ligas; Prata e suas ligas; Alumínio e suas ligas.
- Molibdênio e suas ligas: Molibdênio e suas ligas; Níquel e suas ligas; Nióbio; Prata e suas li-

gas; Aços; Tântalo e suas ligas; Titânio e suas ligas; Tungstênio e suas ligas; Zircônio; Alumínio e suas ligas; Cobre e suas ligas.

- Nióbio: Nióbio; Aços; Vanádio; Tungstênio e suas ligas; Zircônio; Molibdênio e suas ligas.
- Níquel e suas ligas: Níquel e suas ligas; Platina; Aços; Tântalo e suas ligas; Titânio e suas ligas; Vanádio; Tungstênio e suas ligas; Alumínio e suas ligas; Cobre e suas ligas; Ouro.
- Ouro: Ouro; Cobre e suas ligas; Níquel e suas ligas; Platina; Silício; Aços; Alumínio e suas ligas; Germânio.
- Paládio: Paládio; Prata e suas ligas.
- Platina: Platina; Silício; Aços; Alumínio e suas ligas; Níquel e suas ligas; Ouro; Cobre e suas ligas; Germânio.
- Prata e suas ligas: Prata e suas ligas; Molibdênio e suas ligas; Silício; Aços; Tântalo e suas ligas; Magnésio e suas ligas; Zircônio; Paládio; Germânio; Alumínio e suas ligas; Cobre e suas ligas.
- Silício: Ouro; Tântalo e suas ligas; Alumínio e suas ligas; Platina; Prata e suas ligas.
- Tântalo e suas ligas: Tântalo e suas ligas; Titânio e suas ligas; Vanádio; Tungstênio e suas ligas; Alumínio e suas ligas; Prata e suas ligas; Níquel e suas ligas; Silício; Aços; Molibdênio e suas ligas.
- Titânio e suas ligas: Titânio e suas ligas; Vanádio; Tungstênio e suas ligas; Aços; Alumínio e suas ligas; Berílio; Cobre e suas ligas; Molibdênio e suas ligas; Níquel e suas ligas; Tântalo e suas ligas.
- Tungstênio e suas ligas: Tungstênio e suas ligas; Estanho; Tântalo e suas ligas; Níquel e suas ligas; Nióbio; Molibdênio e suas ligas; Cobre e suas ligas; Aços; Alumínio e suas ligas; Titânio e suas ligas.
- Vanádio: Vanádio; Zircônio; Tântalo e suas ligas; Alumínio e suas ligas; Nióbio; Níquel e suas ligas; Aços; Titânio e suas ligas.
- Zircônio: Zircônio; Prata e suas ligas; Nióbio; Molibdênio e suas ligas; Aços; Alumínio e suas ligas; Cobre e suas ligas; Vanádio.

Para a soldagem dos materiais acima relacionados, os seguintes pontos devem ser considerados: (a) É relativamente boa a soldabilidade dos metais que forem mutuamente solúveis, não ocorrendo a formação de uma fase intermetálica; (b) Em certos casos, será necessário adicionar pelo menos um terceiro metal para permitir a soldagem; (c) Os aços ao carbono não desoxidados podem apresentar excessiva porosidade no metal de solda, sendo que uma fina folha de alumínio pode ser

colocada na junta para minimizar esse problema; (d) As ligas Al-Zn podem ser soldadas sem defeitos, se for utilizado metal de adição; (e) Em cobre puro, a solda poderá apresentar porosidades; (f) As ligas de titânio na fase beta podem necessitar tratamentos térmicos; (g) As ligas de magnésio, com mais de 1% de zinco, não são geralmente sol-

dáveis.

Outrossim, na **Tab. 15.2** são apresentadas energias médias de soldagem para penetração completa sobre diferentes materiais, enquanto na **Tab. 15.3** estão relacionadas condições detalhadas para a soldagem de algumas ligas de alumínio.

Tabela 15.2 - Energia Média da Soldagem por Feixe de Elétrons, com Penetração Completa sobre Diferentes Materiais*

Penetração (mm)	Energia (kJ/mm) para Soldagem dos seguintes Metais e Suas Ligas**			
	Cobre	Ferro	Níquel	Magnésio
6	0,27	0,20	0,16	0,04
13	0,59	0,39	0,31	0,12
19	0,98	0,71	0,59	0,20
25	1,46	1,06	0,87	0,31
38	2,44	1,81	1,53	0,59
50	3,42	2,68	2,36	0,87
60	4,41	3,54	3,15	1,14
75	5,39	4,41	3,94	1,42

(*) Passe Único; Alto Vácuo (10-5 torr). (**) Os valores apresentados são apenas indicativos. A exata energia de Soldagem depende das condições específicas em que a mesma se realiza (veja Tab. 15.3 para algumas ligas de alumínio).

Tabela 15.3 - Condições Típicas para a Soldagem de Algumas Ligas de Alumínio por Feixe de Elétrons

Liga de Alumínio*	Espessura (mm)	Condições de Soldagem			
		Tensão (kV)	Corrente (mA)	Velocidade (mm/s)	Energia (J/mm)
2014-T6(a)	1,3	27	21	30,0	18,9
	3,0	29	54	31,7	49,4
2219(b)	9,5	175	40	23,3	300,4
2219(a)	19,0	145	38	21,2	259,9
2219-T81(a)	12,7	30	200	40,2	149,2
5083(a)	152,4	58	525	4,2	7250,0
6061-T6(a)	1,3	18	33	42,3	14,0
	3,2	26	52	33,9	39,9
	15,9	29	325	40,2	234,4
7039(a)	50,8	40	350	12,7	1102,4
7075-T6(a)	3,2	25	80	38,1	52,5

(*) (a) Ambiente: Vácuo; 10-5 torr; Sem Metal de Adição; (b) Ambiente: Gás hélio; Sem Metal de Adição; Distância Canhão/Peça 9,5 mm.

**C
A
P
Í
T
U
L
O

16**

**SOLDAGEM POR
OXIGÁS**

INTRODUÇÃO	314
PRINCÍPIOS DO PROCESSO	314
Gases para a Soldagem	314
A Chama de Soldagem	317
Equipamentos e Acessórios	319
PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM	323

INTRODUÇÃO

Existem pelo menos três métodos distintos de união dos materiais, os quais utilizam como fonte de energia a chama resultante da combustão de um gás com o comburente oxigênio. Os mesmos são principalmente empregados nas seguintes formas:

- Fusão do metal base e, se for utilizado, também do metal de adição;
- Fusão somente do metal de adição, o qual “molha” e se une ao metal base (ou Brasagem) como será visto no Capítulo 17;
- Aquecimento, sem fusão, de peças que serão unidas por pressão (a quente).

Nesse Capítulo será estudado somente o primeiro caso, denominado Soldagem por Oxigás.

Aparentemente, a história desse processo começa com o desenvolvimento da chama oxihídrica em torno de 1850, seguido pelos estudos da oxiacetilênica por Le Chatelier em 1895. Entretanto, o uso econômico da combustão como fonte de calor para corte e solda de metais, somente foi possível a partir de 1893, quando Linde desenvolveu e iniciou na Alemanha a fabricação em larga escala do oxigênio obtido desde ar líquido.

Desta forma, estava disponível o essencial, mas a implementação prática da soldagem se deve aos franceses Fouche e Picard, que em 1903 inventaram um dispositivo (“tocha”) para a mistura do oxigênio com o acetileno, o qual permitia razoável controle da vazão dos gases e precisão da operação.

Apesar desse processo ter tido enorme importância industrial no passado, hoje é pouco representativo entre as opções disponíveis para a soldagem com alta produtividade e qualidade. Entretanto, como logo ficará claro, o mesmo ocupa certos nichos aplicativos, dos quais dificilmente será

desbancado nos próximos anos.

Com o oxigás é possível se obter chamas de alta temperatura (3000 °C ou mais), apesar de muito menor do que aquela atingida pelos processos a arco elétrico, sendo a soldagem realizada mais lentamente. Por outro lado, é inerente a baixa densidade de energia das chamas assim produzidas e, em geral, é grande a geração de compostos indesejáveis para soldagem da maioria dos metais e suas ligas. Como consequência, as juntas são incapazes de apresentar as (altas) propriedades mecânico-metalúrgicas (notavelmente tenacidade) necessárias para as modernas estruturas soldadas.

Apesar dessas características negativas, o oxigás possui a vantagem de ser realizado com um sumarríssimo; normalmente portátil e relativamente barato equipamento, o qual essencialmente é composto por cilindros para os gases; reguladores de pressão; válvulas de segurança; mangueiras e maçarico. A maioria das ligas ferrosas e não ferrosas podem ser soldadas por esse processo, ainda que algumas precariamente, incluindo aços; ferros fundidos; além de níquel, alumínio, cobre e suas ligas. Metais altamente reativos, como titânio e zircônio, bem como refratários, como nióbio e tungstênio, por exemplo, não podem ser soldados por esse processo. Apesar de ser possível a solda de chapas espessas, o oxigás pode ser mais econômico em peças finas, incluindo tubos (típicamente aqueles empregados em sistemas de refrigeração), devido ao grande controle que o soldador exerce sobre a poça de fusão, possibilitando fácil preenchimento de juntas irregulares, ou com muito grande abertura de raiz. Outrossim, existem várias situações em que esse processo é aplicado com vantagem na soldagem de manutenção das mais diversas peças e materiais.

PRINCÍPIOS DO PROCESSO

GASES PARA A SOLDAGEM

Para serem utilizados na soldagem, os gases combustíveis, em combinação com o oxigênio, devem produzir:

- Chama de alta temperatura e numa região a mais bem definida possível;
- Calor numa alta taxa;
- Chama com alta velocidade de combustão

(alta taxa de propagação);

- Chama cujos produtos das reações químicas possuam a menor interação possível com o metal de solda.

Vários são os gases que potencialmente podem ser empregados nesse processo, entre os mesmos encontrando-se o propano; propileno; gás natural (principalmente composto por metano e etano); acetileno; hidrogênio; uma mistura estabilizada de me-

til acetileno com propadieno (MAP), além de misturas patenteadas.

Como a temperatura da chama é um muito importante fator na escolha do gás mais conveniente, pois determina em grande parte a velocidade de soldagem, dentre os combustíveis acima listados diversos seriam adequados. Entretanto, praticamente foi constatado, que o critério mais correto para avaliar a efetividade para a soldagem de um gás combustível, deve ser baseado na análise conjunta da temperatura da sua chama e intensidade de combustão do mesmo. Como será mais abaixo visto, esse último conceito considera a velocidade de combustão da chama e o calor de combustão do gás empregado.

A combustão é um fenômeno complexo, sendo a seguir apresentados alguns dos seus conceitos básicos:

❑ Razão de Combustão

Indica o volume de oxigênio necessário para causar a combustão completa de um volume unitário do gás combustível, sendo obtido através da equação química que descreve a reação. Este valor teórico não é aquele realmente empregado na soldagem, pois parte da chama produzida no maçarico utiliza o oxigênio do ar.

❑ Calor de Combustão

É a quantidade de calor gerada pela reação de combustão. Com alguns gases, a reação ocorre em mais de uma etapa - duas para o acetileno e uma para o hidrogênio, por exemplo - existindo, portanto, o calor de combustão primário e secundário, cuja adição fornece o calor de combustão total. Geralmente, a reação que ocorre na segunda etapa utiliza somente o oxigênio do ar e, como consequência, a razão volumétrica entre o gás combustível e o oxigênio regulada no maçarico de soldagem, não é igual àquela calculada teoricamente.

❑ Temperatura da Chama

É difícil a precisa medição da temperatura de uma chama. Para um dado gás combustível, a temperatura da mesma depende da proporção de oxigênio na mistura. A Fig. 16.1 demonstra esse fato para diversos gases combustíveis, juntamente com o teor do comburente na chama neutra.

Considerando uma específica mistura, a temperatura da chama é função dos seguintes fatores: (a) Taxa de extração do calor para o ambi-

ente; (b) Calor específico dos gases envolvidos; (c) Calor de combustão líquido do gás combustível.

Por sua vez, o calor é transferido da chama para o ambiente e peça soldada, através dos seguintes modos:

- Convecção forçada, proporcional à diferença de temperatura entre a chama e a peça e à vazão do gás;
- Radiação, proporcional à temperatura absoluta da chama elevada a quarta potência (lei de Stefan-Boltzmann).

Dessa forma, teoricamente um pequeno aumento na temperatura da chama provocaria grande elevação da quantidade do calor transferido para a peça, permitindo que a soldagem fosse realizada mais rapidamente. Entretanto, empiricamente foi constatado que somente cerca de 15% do calor é transferido por radiação e, portanto, a temperatura da chama não é o único fator a ser considerado na seleção do gás mais conveniente para soldagem.

❑ Velocidade de Combustão (“Taxa de Propagação”)

Considerando uma dada mistura gasosa, essa propriedade depende da razão entre o combustível e o oxigênio, sendo a velocidade com que a chama se desloca na direção normal à sua superfície e no sentido do gás ainda não queimado. Este fator possui grande influência sobre a dimensão e temperatura da região em que ocorre a combustão primária, além de determinar a velocidade com que o gás pode fluir no maçarico sem ocorrer “retorno” da chama - um importante assunto que se voltará a discutir.

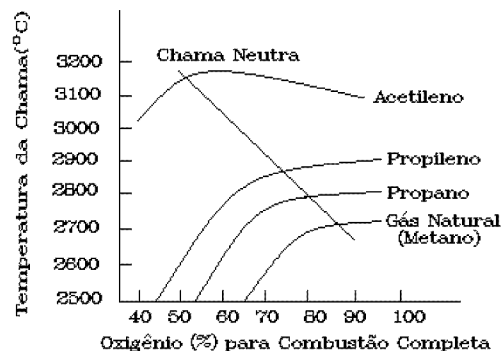


Figura 16.1 - Efeito da Proporção de Oxigênio sobre a Temperatura da Chama de Diversas Misturas Combustíveis.

□ Intensidade de Combustão

Uma chama é melhor caracterizada se for conhecida sua intensidade de combustão (I_c) a qual, como o calor de combustão, também depende das etapas da reação e é dada pela seguinte equação:

$$I_c = V_c \cdot C_c \quad (\text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}) \quad [16.1]$$

onde:

V_c = velocidade de combustão (“taxa de propagação”) da chama (m.s^{-1});

C_c = calor de combustão da mistura (J.m^{-3}).

A **Tab. 16.1** apresenta algumas características dos gases geralmente utilizados como combustível, sendo o acetileno aquele que produz a chama com mais alta temperatura. Por sua vez, a **Fig. 16.2** mostra a intensidade de combustão total de vários gases, em função do conteúdo de oxigênio na mistura, sendo novamente o acetileno aquele que se destaca. Outrossim, os outros gases somente poderiam apresentar chamas suficientemente quentes para a soldagem, quando excessivamente oxidantes, o que inviabilizaria a aplicação dos mes-

mos. Com relação a esse ponto, comparando a razão entre a proporção de gases redutores e oxidantes, formados por chamas neutras de diversas misturas, têm-se aproximadamente a seguinte situação: (a) Hidrogênio: 1,1; (b) Etileno: 0,8; (c) Metano: 0,7; (d) Butano: 0,8; (e) Acetileno: 25. Como consequência, a chama oxiacetilênica é aquela que oxida em menor escala o metal da poça de fusão.

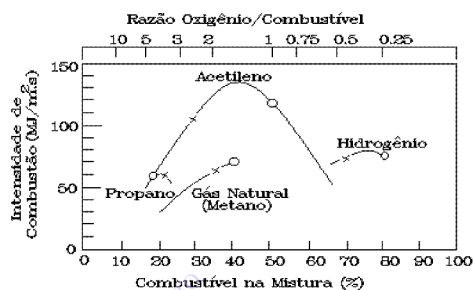


Figura 16.2 - Intensidade de Combustão Total para Diferentes Misturas de Gases (Neutra=0; Estequiométrica=X).

Tabela 16.1 - Algumas Características de Gases Combustíveis Mais Empregados

Gás	Fórmula Química	Razão Volume/Massa à 15,6 °C (m^3/kg)	Razão de Combustão*	Temperatura da Chama (°C)		Calor de Combustão (MJ/m^3)	
				Neutra	Máxima	Primária	Total
Acetileno	C_2H_2	0,91	2,5	3100	3102	19	5
Propano	C_3H_8	0,54	5,0	2450	2777	10	104
MAP**	C_3H_4	0,55	4,0	2600	2902	21	91
Propileno	C_3H_6	0,55	4,5	2500	2857	16	89
Gás Natural	CH_4	1,44	2,0	2350	2742	0,4	37

* Volumes de oxigênio necessários para a combustão completa do gás, segundo a equação de reação química; ** Mistura estabilizada de Metil Acetileno com Propadieno.

Portanto, o acetileno é o gás utilizado na imensa maioria das operações de soldagem e aquele aqui considerado no estudo desse processo. Entretanto, gases, como hidrogênio; gás natural; MAP e outras misturas patenteadas, podem ser empregados em brasagem, corte térmico e pulverização térmica, assuntos que serão abordados nos três Capítulos subseqüentes. Esses gases também são utilizados na soldagem de metais com baixo ponto de fusão, como alumínio, chumbo e magnésio. Adicionalmente, o hidrogênio encontra emprego na soldagem de chapas muito finas de aço, onde sua baixa intensidade de combustão pode ser vantajosa.

Então, os dois gases geralmente envolvidos no processo de soldagem em questão, apresentam os seguintes principais aspectos:

□ Oxigênio

Apesar de ser um conceito elementar, deve-se enfatizar o fato do oxigênio não entrar em combustão, sendo o comburente dessa reação. Como no ar existe somente cerca de 21% desse elemento, seu uso em elevada proporção acelera muito a combustão de qualquer material e, por essa razão, não deve ser empregado em substituição ao ar comprimido, ou outro gás, nas operações de limpeza, etc., pois isso tem provocado sérias explosões.

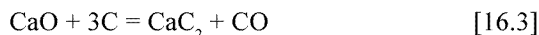
O oxigênio é um gás inodoro, incolor e insípido, cujo peso específico é 1,105 vezes maior que o do ar, sendo extraído do mesmo por liquefação. O ar é comprimido a pressões tão altas quanto 20 MPa e descomprimido subitamente, provocando assim seu resfriamento - na taxa de 0,25 °C por cada atmosfera de diferença de pressão - sendo repetido várias vezes este ciclo, até ser alcançada cerca de -140 °C, ou sua temperatura crítica. O ar líquido é então desdobrado em separadores, principalmente em oxigênio e nitrogênio. Por este processo de destilação fracionada, esse ar líquido se torna cada vez mais rico em oxigênio, até ser alcançado o nível desejado.

Deve-se considerar, ainda, que a eficiência de combustão é muito afetada pela presença de impurezas no oxigênio, principalmente argônio, vapor d'água e nitrogênio. Desta forma, esse combustível deve ser utilizado com pureza mínima de 99,5%, sendo fornecido no estado gasoso, ou, para grande demanda, líquido.

□ Acetileno

Atualmente, a grande aplicação do acetileno (cerca de 70% da demanda) é como matéria prima para compostos orgânicos, os quais são utilizados para fabricar desde drogas farmacêuticas, até solventes. A soldagem; oxicorte; tratamento térmico e outros processo conexos, consomem o restante da produção.

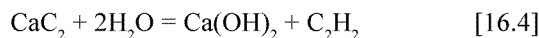
Esse hidrocarboneto (C₂H₂) pode ser obtido através da reação da água com carboneto (carbureto) de cálcio (CaC₂). O CaC₂ é fabricado em fornos a arco elétrico, com grande consumo de energia, pela fusão do carbonato de cálcio e carbono (normalmente coque), ocorrendo nas seguintes etapas:



Portanto, para produzir 100 kg de CaC₂, são necessários cerca de 88 kg de CaCO₃ e 56 kg de C, formando-se em torno de 44 kg de CO puro. Esse monóxido de carbono pode ser utilizado para pré-aquecer a matéria prima, aumentando o rendimento do processo. O carboneto é resfriado e briquetado em diversas granulometrias, apresentando cor que varia do cinza escuro ao azulado. O mesmo é incombustível; muito higroscópico; dissolve-se na água, sendo insolúvel em todos os solventes anidros.

A obtenção do acetileno pode, então, ser

realizada segundo a reação:

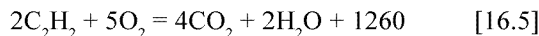


A equação acima indica que 1 kg de CaC₂ deve produzir, aproximadamente, 347 l de acetileno (pois 1,17 kg desse gás ocupa 1 m³). Entretanto, devido às perdas do processo, 1 kg do carboneto gera somente cerca de 280 l de acetileno (a 98,1 Pa, ou 1 atm e à 15 °C) o qual possui um característico odor, similar ao do alho, alterado pelas impurezas. Quando esse gás é fornecido em cilindros, o odor é devido à presença da acetona (veja mais abaixo em "Equipamentos e Acessórios").

Antes de seu uso, o acetileno deve ser purificado, pois as matérias primas empregadas na sua fabricação contém impurezas, principalmente ácido sulfídrico; fosfamina; amoníaco; hidreto de silício; vapor d'água; monóxido e dióxido de carbono; ar e metano. A fosfamina e o ácido sulfídrico são venenosos, além da primeira atacar violentamente as canalizações do acetileno. Outrossim, todas as impurezas são indesejáveis, ou por prejudicar a qualidade do metal de solda, ou por reduzir o rendimento do processo. Por exemplo, cada 1% de vapor d'água diminui em 3,6% a velocidade de soldagem, tendo sido constatado que geradores individuais (descritos mais abaixo) podem produzir esse gás com até cerca de 6% deste vapor.

A CHAMA DE SOLDAGEM

Pode-se descrever a combustão completa de uma mistura de oxigênio com acetileno, pela seguinte reação química (energia resultante em J/mol):



Essa equação indica que são necessários 2,5 volumes de oxigênio para a combustão completa de 1 volume de acetileno, resultando vapor d'água e dióxido de carbono, além de calor. Entretanto, a combustão do acetileno se processa em duas etapas, com a participação do ar que envolve a chama e, portanto, o oxigênio aqui considerado não deverá ser suprido integralmente ao maçarico.

Dessa forma, é necessária uma análise das regiões da chama, com suas distintas reações químicas. Para tanto, é utilizada na discussão a seguir uma chama oxiacetilênica, quando são fornecidos aproximadamente iguais volumes de oxigênio e acetileno no maçarico - na realidade um pequeno volume (menos de 10%) maior de acetileno - a qual caracteristicamente exhibe o aspecto mostrado na **Fig. 16.3**.

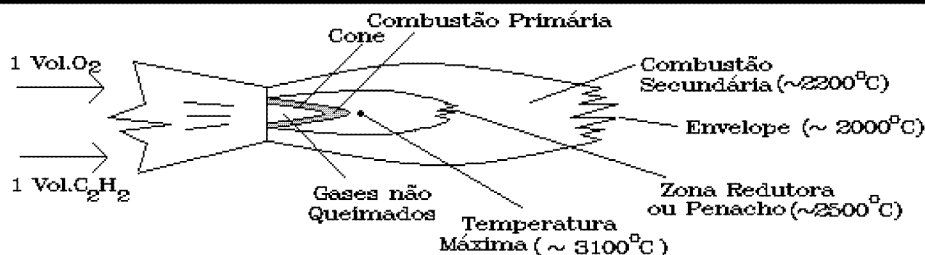
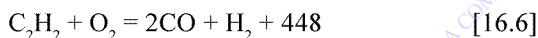


Figura 16.3 - Aparência Característica de uma Chama Oxi-Acetileno.

Portanto, destacam-se as seguintes regiões nessa chama:

▪ Cone e Dardo

Logo após a ponta da extensão do maçarico, ocorre a base da chama, de forma cônica, com os gases sendo aquecidos nesta região até a temperatura de inflamação, a qual é definida como aquela em que um material entra em combustão pela simples presença de oxigênio. Para a mistura acetileno/oxigênio, essa temperatura se encontra entre 300 e 380 °C, dependendo da proporção desses gases. No cone não há combustão da mistura, com a mesma ocorrendo numa fina região que o envolve, sendo todo o conjunto de cor azul claro denominado dardo. Nessa camada, se processa uma reação incompleta (primária), segundo a seguinte equação (energia resultante em J/mol):



Há, então, uma brusca elevação de temperatura e, logo após o ápex deste cone - cerca de 2 a 4 mm do mesmo, dependendo das condições estabelecidas - se encontra a máxima temperatura que uma chama pode apresentar. Essa região é a mais efetiva para a soldagem, sendo aquela que apresenta maior densidade de energia.

▪ Região Redutora

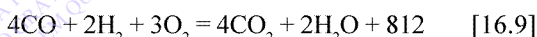
Os produtos da combustão primária se avolumam, então, numa região de cor verde claro, que envolve o dardo e é denominada “penacho”, existindo na mesma aproximadamente 60% CO; 20% H₂ e 20% H. Essa região é redutora devido à característica desses gases, ou seja, sendo M um metal qualquer e MO seu óxido, o mesmo é reduzido segundo as reações:



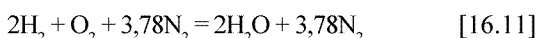
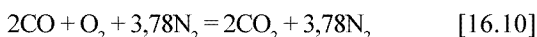
Esta parte da chama mantém o mais íntimo contato com o metal de solda e determina, sob o ponto de vista metalúrgico, suas características.

▪ Combustão Secundária e Envelope

A combustão incompleta vai, então, progredindo devido à incorporação do ar atmosférico. Essa reação secundária ocorre no interior do envelope de cor azul e é dada por (energia resultante em J/mol):



As bordas deste envelope apresentam cor rosa claro, ocorrendo as seguintes principais reações, essencialmente com os elementos do ar:



Portanto, essa região é oxidante; contém alta proporção de nitrogênio e vapor d’água, além de possuir baixa temperatura.

Como a equação 16.5 mostra, somente cerca de 2/5 do oxigênio que participa da formação da chama oxiacetilênica é fornecido pelo maçarico, sendo o restante proveniente da atmosfera. Quando a vazão do acetileno no maçarico é ligeiramente superior à do oxigênio (caso da chama analisada) a reação primária possui caráter redutor, mas é denominada “neutra”, por servir como conveniente ponto de referência em relação à outras misturas e/ou gases combustíveis.

A simples alteração da razão entre as vazões do oxigênio e acetileno, permite ao soldador obter a chama com as características desejadas.

Estas chamas são a seguir caracterizadas por seus aspectos:

❑ Acetilênica

A combustão do acetileno puro reagindo com o ar, em geral não apresenta interesse para a soldagem. A chama é de cor amarelo perto do bico, tendendo à laranja avermelhada conforme se afasta do mesmo, sendo que a combustão incompleta do carbono produz grande volume de picumã.

❑ Carburizante

Com o aumento da vazão do oxigênio, toda a chama se torna mais luminosa. Ela é considerada do tipo carburizante, quando uma região brilhante (penacho) se contrai em direção ao bico e permanece distinta no interior do envelope azul. Conforme mostrado na **Fig. 16.4(a)**, o penacho é de 2 a 3 vezes mais comprido que o cone. Esse tipo de chama é dita “suave” pelos soldadores, possuindo baixa temperatura, sendo utilizada tanto na soldagem do chumbo, quanto na brasagem e solda branda da prata. É importante se reconhecer o fato, de que o carbono livre poderá formar carboneto e CO, com conseqüências sobre as propriedades mecânicas do metal de solda e possível porosidade.

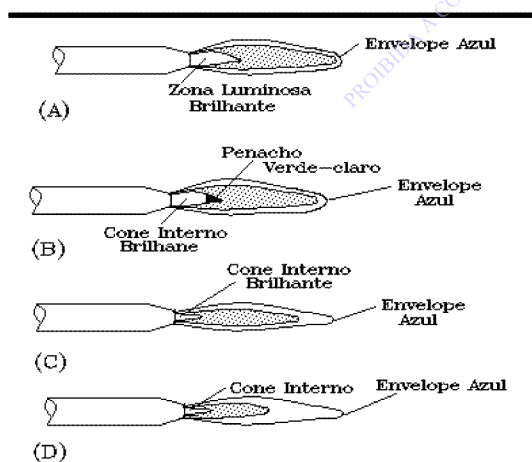


Figura 16.4 - Tipos de Chamas em Função da Razão Oxigênio/Acetileno.

❑ Redutora

Um maior aumento do oxigênio provoca crescente contração da região próxima ao bico, se formando um cone interno brilhante e o penacho verde claro, cuja cor é devida ao leve excesso de acetileno, conforme mostrado na **Fig. 16.4(b)**. Essa

chama apresenta temperatura máxima em torno de 3000 °C e o penacho deve ser ajustado para um comprimento entre 1/8 e 1/4 daquele do cone.

❑ Neutra

Quando a razão entre o oxigênio e o acetileno se aproxima da unidade, o penacho tende à desaparecer (perde a cor) sendo mantido o cone brilhante e o envelope de azulado à laranja, como ilustrado na **Fig. 16.4(c)**. A temperatura desta chama é maior do que a da anterior, sendo de difícil obtenção a razão exata 1,1 entre os volumes de O_2/C_2H_2 .

❑ Oxidante

Esse é o tipo de chama que possui a mais alta temperatura dentre todas (maior do que 3280 °C) e está representado na **Fig. 16.4(d)**, existindo um cone branco envolto por uma região laranja tendendo à púrpura. O ajuste da mesma também apresenta dificuldade relativa, pois não pode ser feito tomando como base sua luminosidade. Uma técnica é, à partir de uma chama neutra, aumentar o oxigênio até que o cone seja reduzido para cerca de 1/8 a 1/10 de seu comprimento original. Outra indicação de que o tipo oxidante foi alcançado, é a formação de um pequeno pescoço entre a base do cone e o bico. A solda produz fagulhas características, além de óxidos frágeis se formarem na superfície da poça de fusão.

EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS

Os equipamentos devem ser robustos; de fácil manejo; eficientes; econômicos e fornecerem os gases oxigênio e acetileno corretamente misturados, numa vazão; pressão e velocidade constantes. Nesse processo de soldagem, o desempenho do equipamento se reflete nos seguintes principais fatores:

- Vazão dos gases: determina fundamentalmente a taxa de fusão;
- Pressão e Velocidade dos Gases: afeta a manipulação da poça de fusão e a taxa de aquecimento;
- Razão Volumétrica O_2/C_2H_2 : estabelece o tipo de chama, cuja atmosfera deve ser compatível com o metal soldado, além da máxima temperatura da mesma, a qual se relaciona com a velocidade de soldagem.

A **Fig. 16.5** exhibe os equipamentos e acessórios essenciais, os quais são: (a) Cilindros de oxigênio e acetileno, sendo que esse último pode ser produzido num gerador (veja abaixo); (b) Canali-

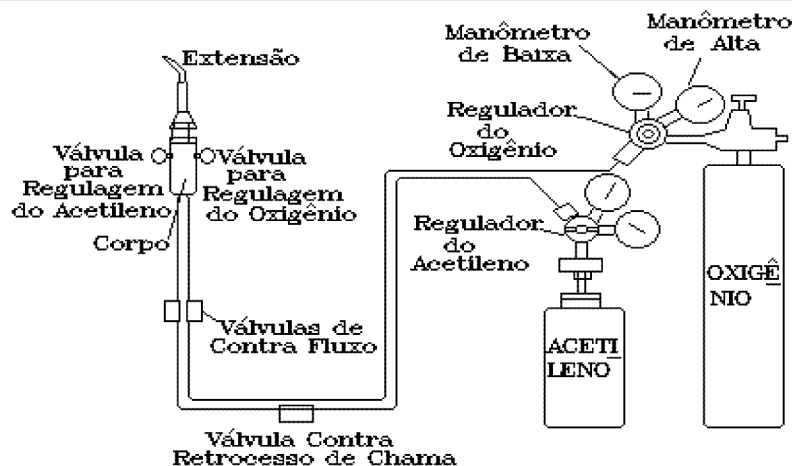


Figura 16.5 - Equipamento Básico para a Soldagem com Oxi-Acetileno.

zação dos gases; (c) Reguladores de pressão; (d) Válvulas contra retrocesso de chama; (e) Mangueiras; (f) Válvulas de contra fluxo; (g) Maçarico.

O trabalho com gases exige algumas precauções, além da necessidade de atender a certas normas de procedimento, os quais são as seguintes:

❑ Oxigênio

Para relativamente pequenos consumos, esse gás é estocado no estado gasoso e comprimido em cilindros padronizados de aço, normalmente contendo de 2 a 10 m³, numa pressão inicial geralmente menor do que 15 MPa. Para consumos maiores, pode ser necessário bancos de cilindros, ou quando o mesmo excede cerca de 80 m³ por semana, a forma líquida de estocagem.

O oxigênio líquido é estocado em cilindro com cerca de 85 m³ do gás, ou em tanque criogênico, numa (baixa) pressão de 0,17 MPa. Esse tanque deve possuir parede dupla, com isolamento térmico entre as mesmas, sendo que a temperatura de estocagem varia entre -176 °C e -115 °C. A conversão do líquido em gás se efetua através de um vaporizador, o qual consiste essencialmente numa serpentina aquecida e um regulador de pressão.

❑ Acetileno

As seguintes principais precauções devem ser tomada no manuseio desse gás, afim de não o instabilizar e evitar, assim, sua explosão:

- Sob pressão ou temperatura maior do que cerca de 206 Pa e 771 °C, respectivamente, um leve choque mecânico no recipiente pode levar este gás a explodir. Esta explosão pode alcançar temperatura da ordem de 2800 °C e pressão maior do

que 11 vezes a inicial (!);

- São explosivas as misturas, em volume, de 2% à 93% de acetileno com oxigênio, ou 2,5% à 80% de acetileno com ar. A máxima taxa de explosão da mistura com o ar ocorre, quando há cerca de 7,7% de acetileno na mesma;

- Em geradores (veja abaixo) a temperatura da água não pode ultrapassar cerca de 70 °C, pois há perigo de explosão;

- Fogo, fagulhas e similares somente podem ser produzidos a uma segura distância das instalações de acetileno;

- Os componentes que conduzem acetileno, com exceção do bico, nunca devem utilizar peças que contenham mercúrio, prata, ou ligas com mais de 67% de cobre. Com esse último elemento químico, por exemplo, se forma uma combinação explosiva $C_2Cu_2 + H_2O$, que é um precipitado insolúvel na água, de cor roxa. Em geral, esses compostos explodem violentamente quando a peça sofre algum leve choque mecânico, ou é aquecida.

O acetileno é geralmente fornecido em cilindros especialmente fabricados para esse fim, mas também pode ser obtido por geradores.

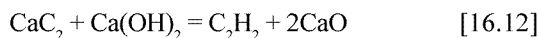
Os geradores de acetileno nada mais são, do que aparelhos especialmente projetados para controlar a reação entre o carbureto de cálcio e a água, a qual foi descrita na equação 16.4. A popularidade desses equipamentos já não é tão grande atualmente, provavelmente devido ao grande número de acidentes ocorridos no passado, os quais, digase de passagem, foram provocados principalmente por inépcia dos operadores. Seguindo estritamente as recomendações para operação fornecidas pelos fabricantes dos equipamentos, essa pode

ser uma opção econômica e prática de se obter esse gás, desde em unidades portáteis, até em grandes plantas, com produção variando de 0,3 m³/h para mais do que 170 m³/h.

Existem diversas maneiras de classificar os geradores, ou seja: pelo modo de carregamento do carbureto; por sua granulometria; pela capacidade de carga; pela pressão do gás; pela disposição da câmara de gaseificação e pela maneira de se efetuar a reação carbureto/água. O tipo preferido nos E.U.A. e Brasil, trabalha geralmente com pressão baixa (menor do que 3 kPa), ou média (entre 3 e 50 kPa), permitindo que pequenos briquetes de carbureto sejam adicionados em grande volume de água. O procedimento inverso (ou seja, colocar a água no acetileno) encontra-se mais difundido na Europa, sendo que um relativamente pequeno volume d'água é vazado sobre briquetes de carbureto de grande granulometria, como uma forma de reduzir a taxa com que a reação se processa.

As maiores causas de acidentes com este equipamento são devidas, principalmente, aos seguintes fatores:

- Entrada de ar no interior do gerador;
- Descongelamento de tubos, etc., com chama;
- Oxidação das peças;
- Desrespeito à relação de 20 vezes mais água do que aquela necessária para a decomposição do carbureto;
 - Conforme já mencionado, o gás produzido num gerador possui elevado conteúdo de impurezas e umidade. A purificação pode ser realizada pela passagem consecutiva do mesmo em torres que contêm ácido sulfúrico e soda cáustica, as quais devem ser periodicamente limpas;
 - Limpeza, na devida ocasião, dos sub-produtos da reação. O carbureto de cálcio é um forte desidratante e, quando os resíduos - principalmente Ca(OH)₂ - são levados para fossas, ou áreas de despejo de dejetos industriais, é usual existir ainda parte do mesmo não gaseificado, ocorrendo a seguinte (perigosa) reação:



Como mencionado, a forma mais usual de fornecimento do acetileno é em cilindros, pronto para uso. Entretanto, devido à instabilidade desse gás e para permitir seu transporte e estocagem com segurança, esses cilindros são especiais, contendo uma massa porosa e acetona no seu interior, sendo o conteúdo geralmente denominado “acetileno dis-

solvido” (AD).

O acetileno se dissolve em muitos fluidos, tais como (em volume) álcool (1/6); benzol (1/4), etc., mas 1 l de acetona dissolve 25 l desse gás, à pressão atmosférica, aumentando em torno de 5% seu volume original, sendo normalmente esse o solvente escolhido. Em quase todos os fluidos, a solubilidade do acetileno nos mesmos aumenta com a temperatura e pressão. É exceção a água sob baixa pressão, na qual a solubilidade se reduz conforme a temperatura se torna maior. À 1,5 MPa, por exemplo, a acetona dissolve cerca de 360 l de acetileno, sendo todas essas relações aproximadas, pois dependem da massa porosa colocada no interior do cilindro. Como o acetileno dissolvido na acetona não é explosivo, mas sim o gás comprimido que se encontra sobre o líquido, é necessário empregar substâncias com grande porosidade, dividindo a mistura e evitando a desintegração do gás. Emprega-se para esta massa porosa materiais tais como pedra-pome; argila; carvão vegetal; amianto, ou outras, ocupando no máximo 1/5 do volume do cilindro. Dessa forma, a pressão do mesmo pode alcançar cerca de 2,5 MPa durante o enchimento, sendo reduzida para em torno de 2 MPa após resfriado, no fornecimento. Para uma segura operação, a pressão de trabalho não deve ultrapassar 0,12 MPa (1,2 kgf/cm², ou 17,4 psi), além da vazão por hora não ser maior do que 1/7 do volume do cilindro, pois acima deste valor pode ocorrer arraste da acetona para a chama.

Considerando a **Fig. 16.5**, devem existir os seguintes acessórios após os cilindros:

- Manômetros que indicam a (alta) pressão dos cilindros, seguidos pelas canalizações individuais de acetileno e oxigênio;
- Manômetros, os quais regulam a (baixa) pressão de trabalho e a estabilizam, mesmo que a pressão de fornecimento não seja constante. Geralmente apresentam escala máxima de pressão igual à 3,92 MPa (40,0 kgf/cm²) para o oxigênio e 0,24 MPa (2,5 kgf/cm²) para o acetileno. Conforme pode ser visto no **Anexo 01**, os manômetros são de um, ou dois estágios, com esse último mantendo a pressão determinada dentro de estreita tolerância, o que já não acontece com o primeiro tipo. Entretanto, um regulador de dois estágios fornece pressão (quase) constante, somente enquanto não for atingida aquela na qual o primeiro estágio do mesmo foi calibrado;

- Válvulas contra retrocesso de chama, que também desconectam o suprimento de gás, sob estímulo de uma maior pressão (determinada pelo fabricante) além de extinguírem a chama que porventura retroceder;

- Mangueiras, então, transportam os gases até o maçarico, sendo as seguintes cores convencionais para as mesmas: (a) **Vermelha** para o **acetileno**, possuindo bico na ponta e porca com rosca esquerda; (b) **Verde, azul ou preta** para o **oxigênio**, contendo bico na ponta e porca com rosca direita;

- A conexão das mangueiras ao corpo do maçarico, deve ser realizada através das válvulas contra fluxo, cuja função é somente impedir que um gás penetre no sistema do outro e não o de evitar retrocesso de chama;

- Maçarico, composto pelo corpo; válvulas de regulagem da vazão dos gases; câmara de mistura; extensão e bico. O conjunto pode apresentar diferentes graus de robustez, a qual depende da aplicação específica, geralmente relacionada com a vazão do acetileno, sendo os seguintes intervalos usuais: (a) Tipo leve, entre 7 e 1000 l/h; (b) Tipo médio, de 28 à 2800 l/h; (c) Tipo para serviço pesado, até 11.000 l/h.

Por representar um sistema mais complexo, serão a seguir analisados com maiores detalhes os componentes do maçarico.

O corpo é a parte que o soldador empunha o maçarico, contendo os tubos que conduzem os gases até a câmara de mistura e as válvulas (de agulha) que permitem a regulagem da vazão de ambos os gases. Essas válvulas são muito sensíveis e nunca devem ser apertadas em excesso, pois deformam (tanto a agulha quanto o assento).

A câmara de mistura, ou misturador, se encontra no fim do corpo, podendo fazer parte do mesmo, ou ser postíça. Sua função é realizar uma perfeita mistura dos gases, obtida pela geração da máxima possível turbulência, além de agir como um trocador de calor, reduzindo a temperatura do conjunto e a possibilidade do retorno de chama. Claramente, o fluxo deve ser laminar na chama e este regime é obtido no percurso existente após o misturador.

Apesar de se poder classificar os maçaricos de diversas formas, provavelmente aquela mais usual é pela pressão de alimentação dos gases. Entretanto, seja qual for o tipo, a mistura desses gases

não deve possuir pressão inferior à cerca de 10 kPa. Portanto, os maçaricos podem ser:

- **Pressão média** (também denominado de pressão igual, ou positiva)

Esse tipo está ilustrado na **Fig. 16.6(a)**, sendo o acetileno fornecido entre cerca de 10 kPa (0,1 kgf/cm²) e 100 kPa (1,0 kgf/cm²), com o oxigênio aproximadamente na mesma pressão. Nada impede, entretanto, que a pressão do oxigênio seja maior, alcançando até 172 kPa (1,8 kgf/cm²) em grandes maçaricos. Misturadores desse tipo são normalmente removíveis, com o acetileno passando através de um tubo venturi central, envolto por vários orifícios pelos quais penetra o oxigênio.

- **Injetor** (também chamado de baixa pressão)

O maçarico é projetado para utilizar acetileno fornecido com pressão abaixo de 10 kPa (0,1 kgf/cm²). Esse misturador está mostrado na **Fig. 16.6(b)**, sendo que o mesmo atua fazendo uso de um tubo venturi central e pelo qual, diferentemente do caso anterior, passa oxigênio, cercado por orifícios menores que conduzem o acetileno. O oxigênio, com pressão variando entre 70 kPa (0,7 kgf/cm²) e 275 kPa (2,8 kgf/cm²), flui em alta velocidade e, exatamente onde o venturi provoca uma queda de pressão devido à restrição no tubo, aspira o acetileno numa alta taxa. Este tipo de misturador é geralmente parte integrante do corpo do maçarico.

A extensão é geralmente utilizada, quando a chama é empregada para pré-aquecimento, ou goivagem (veja **Capítulo 19** sobre Corte Térmico). Na soldagem, o bico é geralmente conectado diretamente à câmara de mistura (ao corpo), sendo esse componente responsável pela quantidade de calor gerado pela chama e velocidade com que os gases são expelidos. Estes dois fatores dependem, por sua vez, da combinação entre a pressão de trabalho e diâmetro do bico, sendo que ambos podem operar em conjunto num limitado intervalo. Uma excessiva velocidade dos gases provocará separação da chama do bico, ou sua interrupção, enquanto que se esta velocidade for inferior àquela de propagação do combustível, ocorrerá retorno da mesma. Para a pressão de trabalho as considerações são análogas: sendo a mesma muito alta, há distúrbio do metal na poça de fusão e abaixo do mínimo, se forma uma chama com pouca quantidade de calor (“fraca”).

O bico é fabricado geralmente com ligas de

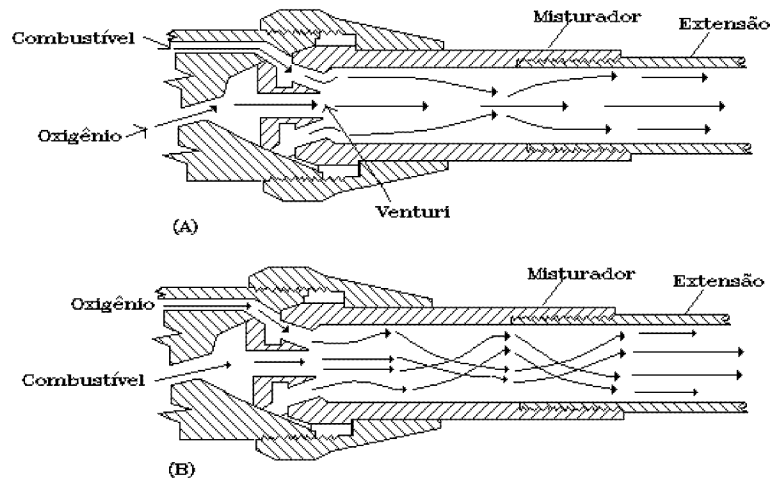


Figura 16.6 - Tipos de Maçaricos: (a) Pressão Positiva; (b) Injetor.

cobre relativamente dúcteis e, conseqüentemente, o seu manuseio requer cuidado, pois pode facilmente sofrer deformação. Portanto, a limpeza interna dos mesmos somente deve ser realizada com ferramentas apropriadas, ou seja, agulhas calibradas.

Os maçaricos normalmente são fabricados em

dois tipos, com relação à extensão: (a) Aqueles nos quais cada extensão é fixa num misturador; (b) Um misturador sendo utilizada para diversas extensões. Em qualquer caso, a área do furo do maçarico (e portanto seu diâmetro) é diretamente proporcional à espessura da chapa que será soldada, existindo um intervalo típico ótimo de operação.

PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

As medidas usuais de segurança no trabalho devem ser tomadas, sendo que o soldador necessita luvas e vestimentas adequadas, além de filtros para óculos protetores, conforme descrito no **Anexo 02**.

Devido ao grande componente empírico desse processo, os comentários sobre os procedimentos de soldagem serão aqui ampliados, sendo importante o estabelecimento prévio das seguintes condições:

□ Técnicas Operacionais de Soldagem

Existem diversos métodos disponíveis para a condução do maçarico e do consumível com esse processo. A escolha daquele mais conveniente depende principalmente da espessura da peça e posição de soldagem, sendo os geralmente empregados descritos a seguir e ilustrados na **Fig. 16.7**.

▪ Soldagem à Esquerda

Esse método é geralmente preferido na soldagem dos materiais com espessuras de até aproximadamente 5 mm. A chama deve ser do tipo neutra, com a vareta precedendo o maçarico, ambos se deslocando da direita para esquerda e man-

tendo entre si um ângulo próximo de 60° , conforme ilustrado na **Fig. 16.7(a)**. A solda inicia com o ápex do cone da chama formando uma poça de fusão no metal base. Nesse instante, então, a ponta da vareta é introduzida na poça e não fundida sob a chama, pois isso produziria excesso de metal de adição; reduziria a temperatura do metal da poça e a fusão do metal base seria prejudicada.

Um detalhe importante, é que a operação ocorre com a vareta se deslocando em linha reta, enquanto a chama é movida em zigue-zague, ou circularmente, produzindo fusão uniforme em toda a junta. Para chapas de espessura até 2,5 mm, é possível soldar somente dobrando as bordas da mesma, sem metal de adição. Em espessuras entre 2,5 e 3,5 mm, a junta pode ser a topo sem chanfro, com distância de raiz de 1 a 2,5 mm. Entre 3,5 e 5 mm de espessura, é necessário o uso de um chanfro (V simples), com ângulo da junta de 80° a 90° e distância de raiz 1,5 a 3 mm. Ângulos menores do que 80° produzem solda com falta de fusão.

Caso esse método continuasse a ser empregado para espessuras maiores do que aproximadamente 5 mm, o volume do metal de adição necessário para preencher o chanfro se tornaria muito

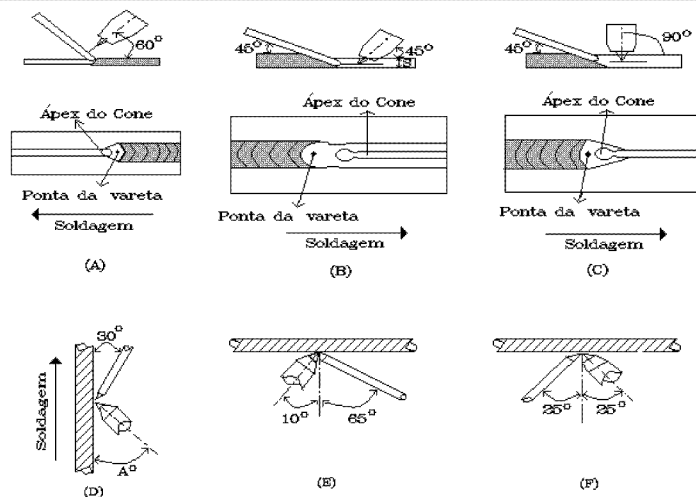


Figura 16.7 - Métodos de Soldagem por Oxi-Gás.

grande, sendo necessários vários passes e cada vez mais difícil o controle da poça de fusão. Portanto, para soldagem de espessuras maiores, se recorre ao método descrito a seguir.

▪ Soldagem à Direita

Somente após esse processo existir por vários anos, foi então desenvolvido esse método, muito mais conveniente para espessuras superiores a cerca de 5 mm, apresentando as seguintes vantagens gerais: (a) Menor deformação da junta; (b) Reaquecimento do metal de solda, devido a incidência da chama sobre o mesmo; (c) Menor custo, resultante do decréscimo no metal de adição necessário e maior velocidade de soldagem; (d) Maior facilidade de operação, já que o soldador pode ver claramente a poça de fusão.

É essencial o correto desenvolvimento da soldagem, com o conjunto se deslocando da esquerda para a direita - o maçarico em linha reta e a vareta num movimento circular - mantendo entre si um ângulo próximo a 90° , conforme mostrado na **Fig. 16.7(b)**. Como a chama aponta para o metal que já foi soldado, não há perigo de falta de fusão, pois a poça não será lançada sobre as (frias) paredes do chanfro. Dessa forma, é possível soldar chapas tão espessas quanto 8 mm sem chanfro, enquanto que acima deste valor se realiza um chanfro (V simples), com ângulo de 60° e distância de raiz em torno de 3,5 mm. É possível soldar juntas de até 15 mm de espessura somente num passe. Entretanto, é em geral necessário bico de maior diâmetro do que no método anterior (permitindo maior vazão).

Uma variante deste método foi desenvolvida há muitos anos, e se baseia na utilização de

chama carburante, quando da soldagem de aço baixo carbono. O excesso desse elemento na chama eleva seu conteúdo no metal de solda, o qual sofre aumento da resistência à tração e redução do ponto de fusão. Um efeito colateral, é que a velocidade de soldagem aumenta cerca de 30%. Varetas com maior conteúdo de silício e manganês devem ser utilizadas, além de soldador experiente e considerações sobre a conveniência do maior conteúdo de carbono.

▪ Soldagem com Grande Penetração

Neste caso, o maçarico permanece numa posição ortogonal à chapa e a vareta inclinada 45° , conforme mostrado na **Fig. 16.7(c)**. O procedimento é similar ao método à direita, com a penetração cerca de 30% maior.

▪ Soldagem na Vertical

Um operador pode soldar economicamente na vertical, chapas com até 5 mm de espessura. Geralmente não é utilizado chanfro em espessuras de até 3,5 mm, com distância de raiz de 3 mm. Em chapas entre 3,5 e 5 mm, é realizado chanfro V simples de 80° e distância de raiz de 3 mm. A soldagem pode ser efetuada na vertical-ascendente, com a vareta precedendo o maçarico; ou vertical-descendente, como na soldagem à direita, sendo que em ambos os casos o conjunto é oscilado em zigue-zague, mantendo os ângulos ilustrados na **Fig. 16.7(d)**.

A soldagem também pode ser realizada por dois soldadores operando simultaneamente, um em cada lado da junta. A chama utilizada é do tipo neutra, sendo o consumo total de gases menor do que se fosse empregado somente um maçarico. Dessa

forma, chapas com até 15 mm de espessura podem ser soldadas na vertical-ascendente sem nenhum tipo de preparação, sendo reduzido o volume do metal de adição; diminuído o tempo total da operação e minimizados o aquecimento e distorção do metal base. Os ângulos de condução da vareta e maçarico, com relação à chapa, são de 30° e 50 à 80°, respectivamente.

- Soldagem Sobrecabeça (à Esquerda e à Direita)

O efetivo controle da poça de fusão (mantida pela tensão superficial) é difícil nesse método, o qual pode ser à esquerda, como ilustrado na Fig. 16.7(e), ou à direita, conforme mostrado na Fig. 16.7(f). Geralmente, é necessário grande prática para ser obtida a correta penetração, ou para evitar a produção de mordeduras na junta (redução da seção na chapa ao lado do metal de solda).

□ Determinação da Pressão de Trabalho e Vazão dos Gases

Estes parâmetros são escolhidos em função do material e espessura da peça (principalmente), além de necessitarem ajustes devido à técnica de soldagem empregada. Isso implica na seleção apropriada do porte do maçarico e diâmetro do bico, não sendo geralmente disponíveis meios para medir a vazão exata dos gases. Entretanto, todos estes dados devem ser fornecidos por um bom fabricante de equipamentos.

Em geral, os parâmetros sugeridos são aproximados e devem ser regulados para uma específica aplicação.

□ Condições Gerais de Soldagem

Várias reações ocorrem na poça de fusão, ou seja, oxidação; redução e absorção de outros gases da atmosfera - como nitrogênio e hidrogênio. Portanto, as mesmas determinam grande parte das propriedades mecânicas/metalúrgicas do metal de solda e são resultantes da combinação da chama; do consumível e do fluxo.

O tipo de chama empregado, em conjunto com a técnica de soldagem, pode criar, por si só, uma atmosfera parcialmente protetora para a poça de fusão. Na soldagem do alumínio é utilizada chama do tipo levemente redutora, enquanto que para a imensa maioria dos outros metais e suas ligas, a mesma é do tipo neutra, sendo levemente oxidante somente no método denominado Solda-Brasagem, descrito no final deste capítulo.

Além da atmosfera que envolve a poça de fusão, há de se considerar os efeitos de elementos

intencionalmente adicionados nos aços ao carbono, como manganês e silício, os quais desoxidam o metal de solda e tornam desnecessária a utilização de qualquer fluxo nesses materiais. Entretanto, fluxos são indispensáveis na soldagem dos aços inoxidáveis; ferros fundidos; bronzes; latões; alumínio e maioria dos outros não ferrosos, com exceção de alguns metais preciosos, bem como zinco e chumbo.

Um eficiente fluxo deve realizar as seguintes funções básicas: (a) Desoxidar o metal de solda, removendo os óxidos para a escória, a qual deve flutuar no banho e ser friável após solidificar; (b) Proteger a poça de fusão, impedindo sua reação, ou absorção, com os gases da atmosfera; (c) Auxiliar na sustentação do metal fundido, através de sua viscosidade.

Para os ferros fundidos, por exemplo, uma formulação simples (mas efetiva) contém partes iguais de ácido bórico e barrilha (carbonato de sódio); 2% de sulfato de amônio e 15% de pó de ferro. Os fluxos podem ser fabricados nas formas de pasta; líquido espesso; pó; ou com as varetas já fornecidas revestidas. Nos dois primeiros casos, deve-se recobrir a vareta e a junta. Para o pó aderir à vareta, essa é aquecida (com o maçarico) e mergulhada no mesmo, formando-se uma espécie de revestimento, cuja espessura conveniente pode ser facilmente obtida. Caso for necessário, também poderá ser colocado previamente fluxo na junta que será soldada.

A seguir serão descritos alguns procedimentos gerais de soldagem para certos materiais. À exemplo dos processos anteriormente estudados, eles devem ser utilizados como guia somente, com experiências prévias sempre realizadas antes do trabalho definitivo. Nunca é demais recordar, entretanto, que a fonte de energia do oxigás é de muito baixa densidade. Dessa forma, a ZAC é larga, com grande tamanho dos grãos, além do metal de solda apresentar, em geral, baixas propriedades mecânicas e a estrutura sofrer maior distorção do que com os outros processos.

Por outro lado, devem ser realizadas criteriosas considerações quanto à escolha da geometria mais adequada para a junta, pois a mesma é responsável por grande parte da qualidade da união e do custo dessa operação, sendo que o tipo de junta depende, principalmente, da espessura da peça e, também, do método de soldagem empregado. Além disso, a limpeza do metal base é tão importante quanto em qualquer outro processo de soldagem.

O metal de adição é geralmente fornecido na

forma de varetas, normalmente com diâmetros entre 1,5 e 10 mm, em comprimentos de 600 e 900 mm. Chapas muito finas podem ser facilmente soldadas sem metal de adição, simplesmente dobrando suas bordas. Até espessuras com cerca de 5 mm, a junta pode ser com chanfro reto; zero distância de raiz e não se emprega metal de adição, sendo fundamental o perfeito alinhamento das bordas. Nesses casos, a chama nunca deve ficar estática, mas sempre realizando um leve movimento circular enquanto se desloca, como que “conduzindo” a poça de fusão, sob pena de furar a chapa. Acima dessa espessura e até em torno de 7 mm, é necessário uma pequena abertura de raiz, ou chanfro em “V” num pequeno ângulo, com metal de adição sendo imprescindível. Para espessuras maiores, os tipos usuais de chanfro são aplicados, com o ângulo da junta variando entre 60° e 90°.

Portanto, sugere-se os seguintes procedimentos de soldagem, com os metais de adição discriminados no livro “Sistemas de Especificação dos Consumíveis para Soldagem e Brasagem” já citado:

□ Aços ao carbono e Baixa Liga

Quando o metal de adição também for aço, não é necessário o uso de fluxo.

Devido às características deste processo, o aço é considerado como de alto carbono, se este elemento ultrapassar 0,35%. Nesse caso, a necessidade de pré-aquecimento da peça deve ser avali-

ada, com a chama sendo do tipo redutora.

Aços baixo carbono, laminados ou fundidos, são os materiais usualmente soldados por esse processo e a chama deve ser do tipo neutra, com metal de adição contendo relativamente altas proporções de manganês e silício, sendo que a **Tab. 16.2** apresenta parâmetros para a soldagem destes materiais. Chapas muito finas podem ser mais convenientemente soldadas com bronze como metal de adição (veja Solda Brasagem no final desse capítulo) utilizando chama levemente oxidante e fluxo.

□ Ferros Fundidos

A alta taxa de resfriamento provocada por qualquer processo na soldagem dos ferros fundidos cinzentos e nodulares, impede que a cementita se decomponha em ferrita e grafita. Como consequência, resulta uma microestrutura composta por cementita em matriz de perlita, típica dos ferros fundidos brancos, com característica frágil. Pré-aquecimento, portanto, é essencial na soldagem desses materiais, podendo alcançar temperaturas tão altas quanto 600 °C, com lento resfriamento. Ferros fundidos brancos não são geralmente soldados, o mesmo ocorrendo com o tipo maleável que, no entanto, pode sofrer “Solda-Brasagem”, como será visto mais abaixo.

Ferros fundidos cinzentos utilizam, com relativa vantagem, o fato da chama possuir pequena densidade de energia. Com isso, uma relativamente grande região em torno da solda é aqueci-

Tabela 16.2 - Parâmetros para a Soldagem de Aços ao Carbono por Oxi-Acetileno

Espessura (mm)	Diâmetro do Bico (mm)	Pressão dos Gases (kPa) para Maçaricos dos Tipos:		Vazão do Acetileno† (l/h)
		Injetor* (Oxigênio)	Pressão Média** (Oxigênio e Acetileno)	
0,5	0,71	48/69	7	Até 28
1,5	1,18	55/138	21	28/113
2,5	1,18/1,40	103/138	28	113/170
2,5	1,40/1,51	83/166	28	170/283
5,0	1,51/1,78	110/172	34	283/481
6,5	1,78/2,06	138/200	41	481/850
9,5	2,06/2,18	165/228	48	850/1274
13,0	2,49	200/234	55	1133/1699
16,0	3,26	207/276	62	1416/2124
19,0	3,26/3,45	207/276	69	1840/2832
25,0	3,91	207/290	83	2407/3964

* A pressão do acetileno é constante e igual à 34 kPa; ** Pressão de cada gás; † Intervalo de Vazão para os maçaricos de Pressão Média e Injetor, nessa ordem.

da, sendo reduzida a taxa de resfriamento. O metal de adição pode ser do mesmo material soldado; tipo ferro-silício, ou contendo alta proporção deste último elemento, sendo a chama neutra e fluxo de boratos alcalinos. Qualquer excesso de oxigênio provoca oxidação e a ponta do cone deve estar situada a cerca de 4 mm da poça de fusão pois, caso contrário, regiões de ferro fundido branco são formadas.

A soldagem utiliza o método à esquerda, com muito pequena oscilação da chama e a vareta não deve realizar excessivo movimento de rotação, pois essas ações podem causar inclusão de escória. Os ângulos da vareta e maçarico com a chapa se situam em torno de 25° e 70°, respectivamente.

□ Alumínio e Suas Ligas

Além de algumas ligas de alumínio possuem tendência à trinca de solidificação, a soldagem do alumínio apresenta dois notáveis problemas, os quais são:

- Formação de uma tenaz camada de óxido de alumínio sobre a superfície da poça da fusão, pois o ponto de fusão do Al_2O_3 (alumina) é muito maior do que o metal base, permanecendo incluído no metal de solda devendo. Portanto, este óxido deve ser removido através de um apropriado fluxo, com ponto de fusão em torno de 570 °C;
- Grande solubilidade do hidrogênio nesse metal no estado líquido, a qual se reduz drasticamente quando o mesmo solidifica, causando porosidade e sendo uma persistente (quase inerente) descontinuidade na soldagem oxigás deste material.

Antes de efetuar a solda definitiva, o soldador deve praticar com o alumínio, pois esse material não apresenta visível diferença de cor com o aumento da temperatura; torna-se muito pouco resistente conforme se aproxima de seu ponto de fusão e, aparentemente, passa subitamente do estado sólido para o líquido. É recomendável, portanto, que sempre seja utilizado algum material de suporte sob a junta, evitando assim o possível colapso da mesma.

A limpeza da junta antes da solda ser realizada é particularmente importante no alumínio, sendo geralmente empregadas soluções químicas, como banhos cáusticos; ácidos e vapor. Além disso, é conveniente o pré-aquecimento das peças fundidas, podendo o mesmo variar de aproximadamente 250 °C para as de pequenas dimensões, até

cerca de 400 °C naquelas com formas complicadas e grande massa. A chama utilizada é do tipo neutra, com fluxo em pó e aderido à vareta.

O material de adição geralmente empregado é de idêntica composição ao base, ou o de uso geral alumínio-5% silício, com diâmetro levemente maior do que a espessura da junta. O método de soldagem preferido é à esquerda, sendo os ângulos da vareta e maçarico com a peça de aproximadamente 35° e 45°, respectivamente, com leve redução desse último conforme o material base aquece, para evitar que a chama o perfure. Devido à distorção, se recomenda que a junta seja ponteada a cada 150 mm. Outrossim, sendo utilizado o método à direita, é minimizada a distorção na soldagem de chapas muito finas se os ângulos da vareta e maçarico forem mantidos iguais.

□ Cobre e Suas Ligas

Esse metal apresenta altos coeficientes de condutividade e expansão térmica. Aliando esses fatores à baixa densidade de energia da fonte de calor, pode ser prevista a distorção como um dos grandes problemas a enfrentar na sua soldagem, sendo aconselhável as seguintes medidas para minimizá-la:

- As juntas devem ser posicionadas divergindo cerca de 3 mm por cada 100 mm de comprimento, pois as mesmas tendem a se aproximar (fechar) conforme a solda progride;
- Uma efetiva seqüência de soldagem, é aquela na qual os pontos UVXZ sobre um dado segmento da junta estão distribuídos da seguinte forma: U e Z nas extremidades; X no centro, com a junta mantida por um posicionador rígido; V no primeiro 1/3 da junta, à partir de U. A solda se realiza, então, de V para Z e, após, de V para U.

O pré-aquecimento é geralmente usado na soldagem do cobre, variando num amplo intervalo, dependendo da forma e da espessura da peça. O bico empregado deve ser maior do que aquele para uma mesma espessura de aço, com chama do tipo neutra, ou levemente carburizante, já que excesso de oxigênio formará óxidos que fragilizarão o metal de solda, enquanto o acetileno provocará porosidade. O metal de adição é geralmente similar ao metal base, mas desoxidado, nem sempre sendo necessário empregar fluxo. Caso o mesmo for utilizado, pode ser do tipo com bórax.

Para manter a poça de fusão num ambiente redutor, a ponta do cone deve permanecer cerca de 8 mm de distância da mesma. O método de sol-

dagem geralmente empregado é aquele à esquerda, com os ângulos da vareta e maçarico em 25° e 70°, respectivamente. O maçarico deve oscilar levemente no sentido transversal e a vareta sempre imersa na poça de fusão, evitando sua agitação. Quando o metal fundido for pouco fluido, é usual o método à direita, com técnica similar ao aço, mas o mesmo tipo de chama acima referida.

❑ Revestimentos Protetores

Esse processo de soldagem provoca taxas de aquecimento e resfriamento muito menores do que aqueles com arco elétrico, além de apresentar pequena penetração. Exatamente por isso, o mesmo é utilizado em algumas aplicações de revestimentos protetores com alto conteúdo de carbono e/ou elementos de liga.

Um típico caso e que requer técnicas especiais, é a soldagem por oxigás de ligas à base de cobalto, cujas clássicas composições incluem diferentes conteúdos de C, W e Cr, além de Mo e Ni. Essas ligas se caracterizam por serem empregadas em revestimentos protetores à abrasão; erosão por partículas sólidas; dureza a alta temperatura; erosão por cavitação; etc., com aplicação sobre quase todos os tipos de aços e outros metais.

A soldagem deve sempre ser realizada com a peça pré-aquecida, sendo o resfriamento controlado e lento. A chama é do tipo com excesso de acetileno, sendo o comprimento do penacho três vezes o do cone, sem que esse toque a poça de fusão. A inclinação da vareta e do maçarico permanece em torno de 30° com relação à chapa, com o método à esquerda sendo empregado. A solda inicia com a chama aquecendo a superfície de interesse da peça, até a mesma aparente “suar”. Neste instante, a vareta é posicionada sob a chama e uma gota do material fundido é depositada sobre a superfície, espalhando-se sobre a mesma.

Depósitos por oxigás apresentam mais alto conteúdo de carbono do que qualquer outro e este fato precisa ser considerado quando é decidida sua

utilização. Outrossim, muita atenção deve ser prestada à limpeza da vareta e do metal base, pois qualquer partícula estranha pode ocasionar porosidade.

❑ Solda-Brasagem

Esse é um método de união em que o metal de adição possui ponto de fusão inferior ao metal base, o qual permanece no estado sólido. Entretanto, o metal na fase líquida não utiliza o fenômeno da capilaridade para o preenchimento da junta e é depositado com técnicas similares à soldagem oxigás convencional. Dessa forma, apesar da união ser realizada por “molhamento” da superfície, este processo não se enquadra como Brasagem.

O fato de não ocorrer fusão do metal base apresenta óbvias vantagens mecânico-metalúrgicas, notavelmente mínima alteração microestrutural do mesmo e baixa distorção na peça.

Duas ligas e algumas variantes são empregadas na união de grande variedade de aços; cobre e suas ligas e ferros fundidos. Suas composições aproximadas são: (a) 60% Cu e 0,35% Si; (b) 49% Cu, 0,32% Si e 9,5% Ni. Note-se que sendo o metal base de composição similar aos metais de adição citados, ocorrerá solda (por fusão) convencional.

Como ocorre o fenômeno de “molhamento” das superfícies que serão unidas, é muito importante a limpeza das mesmas, além da utilização de uma chama relativamente pequena. A operação deve ser realizada rapidamente, com o metal líquido percorrendo curtas distâncias. O projeto da junta é similar àquele para soldagem convencional, sendo que o uso de metais de adição do tipo bronze, implica que fluxo à base de bórax e fluoreto alcalino deve ser utilizado. Para ferros fundidos; cobre e aços, a chama deve possuir leve excesso de oxigênio, com o cone mantido afastado da poça de fusão. Outrossim, o método empregado é o à esquerda, sendo que uma leve inclinação da peça e soldagem ascendente pode proporcionar melhor controle do metal fundido.

**C
A
P
Í
T
U
L
O

17**

BRASAGEM

INTRODUÇÃO	330
PRINCÍPIOS DO PROCESSO	331
Fenômenos Gerais	331
Interações	334
SELEÇÃO DO METAL DE ADIÇÃO	337
Classificação e Características Operacionais	339
MEIOS DE PROTEÇÃO	344
Fluxos	344
Atmosferas	346
MÉTODOS DE BRASAGEM	348
PROJETO E PROPRIEDADES MECÂNICAS DA JUNTA	354
A Opção pela Brasagem	354
Dimensionamento da Junta	355

INTRODUÇÃO

Denomina-se Brasagem, ao grupo dos processos que realizam a união de materiais através da fusão de um metal de adição, cuja linha liquidus é superior à 450 °C, mas inferior à linha solidus dos materiais base, os quais, portanto, permanecem no estado sólido.

A Brasagem somente ocorre devido à existência dos fenômenos de molhamento e capilaridade, os quais serão discutidos posteriormente. Entretanto, para que esse método de união seja entendido, é necessário compreender o modo como os metais e suas ligas solidificam.

Um metal puro funde (e solidifica) numa temperatura específica. Entretanto, a fusão (e a solidificação) completa de uma liga geralmente ocorre num intervalo de temperatura, no qual coexistem as fases sólida e líquida. Esse fato pode ter profunda influência sobre as propriedades mecânico/metalúrgicas da junta obtida por brasagem, pois cada liga possui específicas características de solidificação (ou de fusão) além de ser possível a ocorrência de transformações na fase sólida, as quais são geralmente alteradas pela taxa de resfriamento.

A análise deste fenômeno pode ser realizada através de um gráfico composição química versus temperatura, denominado “diagrama de equilíbrio” (ou “diagrama constitucional”), os quais podem assumir diversos aspectos, mas cuja análise foge do escopo desse livro. A **Fig. 17.1** apresenta um diagrama binário para elementos genéricos “X” e “Y”, muito similar àquele da liga prata-cobre, o qual é um dos mais populares metais de adição empregados na brasagem, também constando do livro dessa série “Sistemas de Especificação dos Consumíveis para Soldagem e Brasagem”.

Os pontos A (951 °C) e B (1083 °C), repre-

sentam as temperaturas de fusão dos elementos X e Y puros, respectivamente. A linha AEB é denominada “liquidus”, pois acima da mesma o material está na fase líquida, enquanto que a linha ACE-DB é a “solidus”, porque está sólido todo o material que se encontrar abaixo da mesma. O ponto E (772 °C) é o “eutético”, nesse caso composto por 72% X e 28% Y, ocorrendo no mesmo diretamente a transformação da fase sólida para a líquida. Entre as linhas liquidus e solidus, para cada composição, se encontra o “intervalo de solidificação” no qual, como já mencionado, as fases sólida e líquida estão presentes, nas proporções determinadas pela “regra da alavanca”. Para essa liga específica, existem regiões em que somente uma fase permanece no estado sólido, como a “a” para o lado do elemento “X” e “d” na região mais rica em “Y”.

Como será visto com mais detalhes posteriormente, entre os diversos motivos que tornam o intervalo de solidificação importante se encontra, por exemplo, sua influência sobre a escolha da composição mais apropriada para uma determinada “folga” - ou distância entre as faces da junta. Para pequenas folgas, o metal de adição deve fundir num estreito intervalo de solidificação, sendo geralmente o inverso para folgas relativamente grandes.

Além dos problemas de solidificação, os fenômenos mais importantes envolvidos na brasagem são:

- Molhamento do material base pelo de adição, sendo assim viabilizada a união metalúrgica;
- Capilaridade, a qual possibilita o perfeito preenchimento da junta.

A Brasagem não deve ser confundida com a “Solda Brasagem”, analisada no **Capítulo 16** (Soldagem por Oxigás), pois essa última não faz uso da capilaridade; nem com um processo bastante similar, denominado “Solda Branda”, no qual o material base também permanece no estado sólido, mas o de adição deve possuir um linha liquidus inferior a 450 °C e abaixo da solidus daquele que irá unir. Apesar dessa distinção ser arbitrária, já que os princípios físicos deste último processo são similares aos da brasagem, a mesma é muito útil, pois as aplicações; materiais; tipos de fluxos; atmosferas e técnicas gerais diferem notavelmente entre estes processos. Nesse livro não será ana-

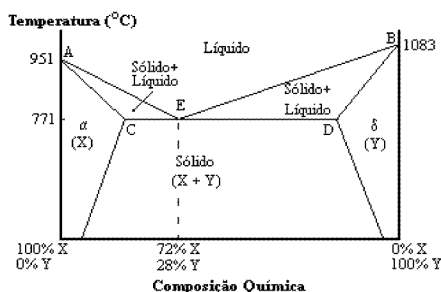


Figura 17.1 - Diagrama de Equilíbrio Binário (elementos “X” e “Y”).

lisada a Solda Branda.

Na brasagem, geralmente é empregado um fluxo, ou atmosfera controlada para realizar a união, sendo que, devido às suas características, esse processo provoca muito pouca distorção na estrutura; mínima alteração metalúrgica do material base, além de permitir a produção de juntas com alta qualidade e elevadas propriedades mecânico-metalúrgicas.

Esse método de união é utilizado há milhares de anos, principalmente para confecção de ornamentos de ouro, com o metal de adição consistindo basicamente das ligas ouro-prata e ouro-prata-cobre. Quando a tecnologia das ligas ferrosas começou a ser desenvolvida e principalmente à partir da metade do século XIX, a união das mesmas passou essencialmente a ser realizada através de ligas cobre-zinco (em inglês denominadas “solder”) as quais apresentam relativamente altas propriedades mecânicas e fundem em baixa temperatura. Simultaneamente, foram introduzidas ligas à base de prata, seguidas pelas de alumínio; ouro-níquel; prata-cobre-zinco-níquel e muitas outras. Atualmente, após o entendimento dos princípios metalúrgicos envolvidos nesse processo, existe

uma grande variedade de metais de adição disponíveis e que formam juntas de altíssima responsabilidade em estruturas/componentes das mais diversas indústrias, entre elas, a aeroespacial; a nuclear; a eletrônica e a automotiva.

Uma infinidade de materiais podem sofrer brasagem, tais como: praticamente todos os aços e não-ferrosos; diversos ferros fundidos; cerâmicos; carbonetos; grafita; compósitos. Além destes, é realizada a união entre materiais dissimilares, sendo respeitadas as particularidades de cada caso.

Outrossim, várias são as formas de aquecimento e atmosferas empregadas, ou seja: maçarico (tocha); imersão em banhos de sais-fluxos-metais fundidos; forno com atmosfera controlada ou vácuo; indução elétrica; resistência elétrica e infravermelho. Dessa forma, são geralmente assim classificados os métodos (ou “processos”) de brasagem.

Apesar de todas as evidentes vantagens da brasagem como processo de união, sua realização apresenta certas dificuldades, tais como: (a) As faces da junta devem estar perfeitamente limpa; (b) A junta precisa possuir excelente alinhamento e posicionamento; (c) Alguns meios de aquecimento, como fornos, limitam fisicamente a operação.

PRINCÍPIOS DO PROCESSO

FENÔMENOS GERAIS

Independentemente do método específico de aquecimento, ou atmosfera empregada, a brasagem ocorre através das seguintes principais etapas:

- O conjunto deve ser aquecido acima de 450 °C, numa temperatura suficiente para fundir o metal de adição, mas não o material base;
- O metal de adição deve preencher perfeitamente a junta;
- O metal de adição deve molhar (metalúrgicamente) o metal base;
- O conjunto deve ser resfriado e a união, então, está realizada.

Como mencionado, existem dois fenômenos fundamentais para que a brasagem possa ocorrer, comuns a qualquer método utilizado e que são:

□ Molhamento

Sem que o metal de adição fundido se una metalúrgicamente ao metal base, o qual permane-

ce sólido, não é possível realizar a brasagem. Para entender como isto ocorre, é necessário conhecer alguns princípios que regem o equilíbrio das energias superficiais envolvidas no sistema em consideração.

Num sólido, a energia livre de superfície - geralmente referida somente como energia de superfície - pode ser definida como o trabalho necessário para criar novas superfícies por clivagem. Como decorrência, se duas superfícies são unidas, a variação da energia livre é igual à metade do trabalho de coesão das mesmas.

De forma geral, essa energia livre de superfície, ou energia livre interfacial por unidade de área (γ) de qualquer fase, à temperatura (T), concentração (N) e pressão (p) constantes, é dada por:

$$[\delta G/\delta A]_{T,N,p} = \gamma \quad (\text{J/m}^2) \quad [17.1]$$

onde:

G = energia livre da fase;

A = área de sua superfície, ou da sua interface com

outra fase.

Entretanto, como mencionado no **Capítulo 1**, geralmente é medida a “tensão superficial” das interfaces. Entre dois fluidos, essa tensão superficial é, numericamente, igual à energia de superfície, não necessariamente ocorrendo essa coincidência se, pelo menos, uma das fases for sólida. O valor considerado deve ser, então, o da energia de superfície.

Em brasagem, o molhamento é função não somente do estado das superfícies envolvidas mas, também, da natureza dos metais de adição e base. Portanto, o conceito do metal de adição “molhar” as superfícies que irá unir, implica em que o mesmo fique aderido, formando uma união metalúrgica, muitas vezes dissolvendo, ou se ligando com o metal base.

Sob o ponto de vista termodinâmico, ocorrerá molhamento se, para um incremento da área de contato, a energia livre se torna negativa, ou seja, $dG < 0$. Portanto, não ocorrerá molhamento se o inverso for verdadeiro.

A alteração na energia livre resultante da união de um líquido e sólido, é denominada trabalho dessa adesão (T_a). Para um sistema composto pelo líquido (L), em equilíbrio com seu próprio vapor (V), sobre a superfície sólida (S), também em equilíbrio com seu próprio vapor, este trabalho foi demonstrado ser:

$$T_a = \gamma_s + \gamma_{lv} - \gamma_{sl} \quad [17.2]$$

onde:

γ_s = energia livre de superfície sólido/(seu) vapor;
 γ_{lv} = energia livre de superfície líquido/(seu) vapor;
 γ_{sl} = energia livre de superfície sólido/líquido.

Todavia, considerando um líquido sobre uma superfície sólida, com todas as fases em equilíbrio nas suas interfaces, experimentalmente se constata que o molhamento perfeito geralmente não ocorre. Forma-se uma gota séssil, como ilustrado na **Fig. 17.2**, a qual possui um ângulo de contato (θ) definido entre as fases líquida e sólida.

A alteração da energia livre de superfície (ΔG) devida a um incremento da área coberta pelo líquido (ΔA), é dada pela chamada equação de Young-Dupré:

$$\Delta G = \Delta A(\gamma_{sl} - \gamma_s) + \Delta A \cdot \gamma_{lv} \cdot \cos(\theta - \Delta\theta) \quad [17.3]$$

No equilíbrio, $\Delta A \rightarrow 0$ e, como consequência, $\Delta G/\Delta A = 0$. Ignorando a força devido à acele-

ração da gravidade, resulta:

$$\gamma_{sl} - \gamma_s + \gamma_{lv} \cdot \cos \theta = 0 \quad [17.4]$$

ou:

$$\gamma_{sl} = \gamma_s - \gamma_{lv} \cdot \cos \theta \quad [17.5]$$

Não ocorrerá molhamento se o ângulo de contato exceder 90° , sendo este fato resultado de γ_{sl} ser maior do que γ_s , com a gota tomando a forma esferoidal, mostrada na **Fig. 17.3**.

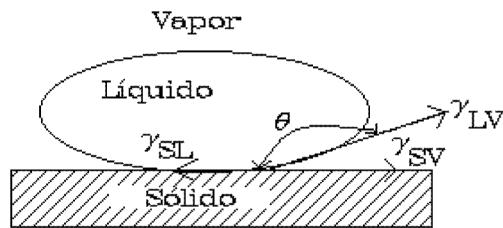


Figura 17.3 - Gota Séssil com Ângulo de Contato Maior do que 90° .

Por sua vez, um perfeito (ideal) molhamento ocorre, se o ângulo de contato (θ) for igual a zero e também satisfeita a seguinte relação:

$$\gamma_{sl} \geq \gamma_s - \gamma_{lv} \quad [17.6]$$

Porém, para que a união possa ser realizada por brasagem, é necessário que o equilíbrio entre as energias de superfície produza um ângulo de contato inferior a 90° (o menor possível), mas não necessariamente zero. Entretanto, a medida dessas tensões superficiais é muito difícil e a relação daquelas conhecidas com a prática industrial não são satisfatórias.

Portanto, as considerações teóricas tecidas permitem, mais uma vez, formular um modelo do fenômeno, não o seu real desdobramento. Pode-se agora, por exemplo, perceber que diversas variáveis intervêm no processo, não existindo um relação simples entre as tensões superficiais - como aparente-

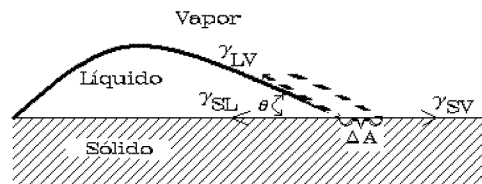


Figura 17.2 - Gota Séssil e Energias de Superfície do Sistema.

mente era de se supor - e que um líquido com alta energia superficial, definitivamente não molhará um sólido no qual a mesma seja baixa.

Outrossim, é evidente que, se o ângulo de contato inicial for inferior à 90°, será possível torná-lo menor (melhorando as condições de molhamento) se for reduzido γ_{sl} , e/ou γ_{lv} , e/ou for aumentado γ_s . Por outro lado, a limpeza das superfícies envolvidas na brasagem é da maior importância, pois moléculas adsorvidas sobre a superfície do metal base reduzem notavelmente γ_{sv} , enquanto impurezas no metal de adição (não necessariamente advindas quando de sua fabricação) podem alterar significativamente γ_{lv} .

□ Capilaridade

Como será visto mais abaixo, as juntas na brasagem devem manter uma muito pequena distância de separação (denominada folga) similar àquela da solda por fusão e denominada “distância de raiz”, a qual, no presente caso, possui direta relação com sua resistência mecânica.

O metal de adição necessita, portanto, não somente molhar o metal base, mas também preencher completamente a folga, num curto espaço de tempo. Para fluir corretamente, o mesmo depende das leis que regem o fenômeno da atração por capilaridade, o qual é notavelmente influenciado pelos efeitos de energia superficial, além daquelas responsáveis pela fluidez.

Quando um líquido é confinado entre duas superfícies paralelas - como duas chapas planas - separadas por uma muito pequena distância, ou folga, ele se curva e forma ângulos de contato com as mesmas (ou meniscos), conforme mostrado na Fig. 17.4.

Como resultado dessa curvatura, há um diferencial de pressão através dessa superfície e o

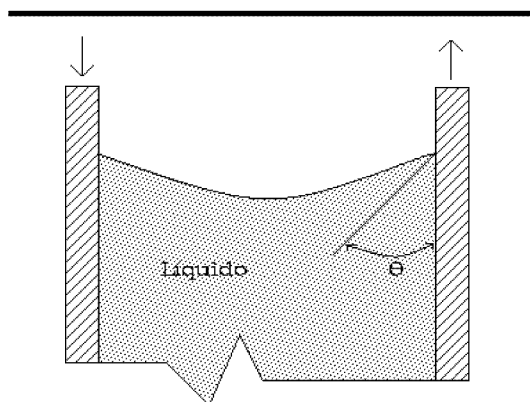


Figura 17.4 - Efeito da Capilaridade e Tensão Superficial sobre um Líquido entre duas Superfícies Muito Próximas.

líquido flui na folga, até a pressão provocada pela energia de superfície se igualar à hidrostática. Esse diferencial de pressão (ΔP) é dado por:

$$\Delta P = (2 \cdot \gamma_{lv} \cdot \cos \theta) / F \quad [17.7]$$

onde F é a folga entre as superfícies, existindo um valor limite para o qual deixa de ocorrer o fenômeno da capilaridade.

Quando as chapas estão na vertical, a máxima altura (H) que o líquido alcança é:

$$H = \Delta P / (\rho \cdot g) = 2 \cdot \gamma_{lv} \cdot \cos \theta / (F \cdot \rho \cdot g) \quad [17.8]$$

com:

g = aceleração devido à gravidade;

ρ = densidade do líquido.

A altura (h) que este líquido alcança num dado tempo (t), depende de sua fluidez; do grau de interação entre o metal de adição e o metal base e da eficiência do fluxo, podendo ser avaliada por:

$$h = (F \cdot t \cdot \gamma_{lv} \cdot \cos \theta)^{1/2} / (3 \cdot \eta) \quad [17.9]$$

onde η é a viscosidade do líquido.

Portanto, as equações acima permitem deduzir que:

- Para o líquido preencher a folga, um baixo ângulo de contato é condição necessária, mas não suficiente;
- Se o líquido possuir uma alta tensão superficial, a taxa de preenchimento da folga é maior;
- Baixa viscosidade também acelera o preenchimento da folga, sendo que ligas com pequeno intervalo de solidificação (próximas ao eutético) possuem em geral esta propriedade menor do que aquelas com grande intervalo de solidificação;
- Conforme diminui a folga, o líquido pode alcançar pontos mais altos;
- A taxa com que o líquido preenche a folga decresce proporcionalmente com a redução da mesma.

Diversos importantes conceitos não estão evidentes nas equações apresentadas para o molhamento e a capilaridade. Por exemplo, o preenchimento da folga é dependente de fatores tais como temperatura; massa específica e tipo de líquido.

Ressalte-se que metais de adição com maior viscosidade, são capazes de unir superfícies mais distantes entre si, do que aqueles com essa propriedade menor. Além disso, como é evidenciado pela equação 17.8, para cada caso em particular existe uma máxima folga, na qual a capilaridade continua ocorrendo.

Outrossim, é necessário ser entendido, que correto molhamento e capilaridade são condições importantes para viabilizar o processo de brasagem. Entretanto, o molhamento não é uma condição “sine qua non” para que a união se realize, sendo clássico o exemplo do chumbo, que não molha o aço, mas solidificando sobre uma superfície limpa e livre de óxidos desse metal, une-se perfeitamente ao mesmo. Essa é, nada mais, do que a simples aplicação do princípio fundamental da união dos materiais.

INTERAÇÕES

Na análise dos fenômenos gerais, foram considerados sistemas não-interativos, ou seja, a composição química; os coeficientes físicos e as propriedades gerais dos componentes eram tidas como constante durante todo o desenrolar do processo.

Na realidade, o material base e os consumíveis envolvidos podem interagir, pelo menos nos seguintes modos:

- Difusão do metal de adição no metal base;
- Difusão do metal base no metal de adição;
- Formação de compostos intermetálicos;
- Formação de uma terceira liga entre o metal de adição e o metal base;
- Penetração do metal de adição nos contornos dos grãos do metal base.

Essas interações, caso ocorram, alteram a viscosidade e energias de superfície envolvidas, com conseqüente modificação do comportamento esperado da capilaridade e molhamento, além de influírem negativamente nas características mecânico-metalúrgicas da junta. Vários são os exemplos existentes, entre eles: (a) Em níquel, Monel, ou cuproníquel, com cobre, podem ocorrer interações (dissolução e difusão) de tal forma que o sólido do metal de adição aumenta e não há mais preenchimento da folga na junta; (b) Com ligas de alumínio; magnésio e de alta temperatura, é possível ocorrer um defeito denominado erosão, produto da dissolução do metal base quando o mesmo é fino, provocando alterações geométricas e deslocamento de material; (c) Metal de adição contendo

do boro, em ligas para alta temperatura à base de ferro, pode provocar penetração nos contornos dos grãos do metal base, sendo gerado um complexo com baixo ponto de fusão; (d) A união do ouro com outros metais base, comum em ourivesaria, deve ser realizada o mais rapidamente possível, para que o metal de adição não difunda através deste metal nobre e cause descoloração da sua superfície.

Por sua vez, a taxa com que estas interações podem ocorrer depende, pelo menos, dos seguintes fatores:

- Temperatura de brasagem;
- Tempo de permanência nesta temperatura;
- Especificação dos consumíveis.

Além disso, para a aplicação industrial da brasagem, é interessante que os metais de adição possuam composição eutética, ou próxima da mesma, pois quando apresentam um relativamente grande intervalo de solidificação, é possível que ocorra os seguintes problemas:

- Qualquer distúrbio na massa líquida/sólida pode produzir trincas.
- Nas fases líquida e sólida do metal de adição, geralmente o gradual aumento da temperatura no intervalo de solidificação torna cada vez mais diferentes as composições químicas. Caso a fase líquida seja dispersa (ou seja, preencha a junta) aumenta o ponto de fusão da fase sólida restante, até um valor que não é mais alcançado pela temperatura de brasagem planejada, inviabilizando a operação.
- Caso o metal de adição permaneça por um tempo excessivamente longo acima da temperatura do liquidus, pode dissolver um elemento do metal base, modificando sua composição e formando uma nova fase, com um mais alto liquidus. Então, uma fase sólida pode lentamente cristalizar e fragilizar a junta.

Para sistemas simples (binários) a extensão e tipos de interações passíveis de ocorrer podem ser previstas com relativa facilidade, através dos diagramas de equilíbrio, e dos coeficientes de difusão dos componentes. Entretanto, os metais de adição geralmente empregados são ligas complexas, possibilitando somente estimativas teóricas.

Por outro lado, antes da brasagem ser realizada, as propriedades mecânico-metalúrgicas do metal base devem ser perfeitamente conhecidas.

Então, de forma geral, as três preocupações básicas com respeito a este assunto recaem sobre:

- Efeitos sobre a microestrutura e propriedades mecânicas que o ciclo térmico da brasagem provocará;
- Interações metalúrgicas que possam ocorrer;
- Distorções e defeitos.

Neste ponto, é importante se ressaltar, que certos problemas serão mais facilmente evitados, recordando-se que os metais base podem ser classicamente organizados em quatro grandes grupos, dependendo do modo que sua resistência mecânica é obtida. Esses grupos estão abaixo discriminados resumidamente, juntamente com materiais típicos:

- Solução Sólida

Ligas de alumínio; cobre; aços inoxidáveis ferríticos recozidos; aços com muito baixo carbono recozidos, ou laminados a quente: podem apresentar crescimento do grão.

Aços inoxidáveis austeníticos; passíveis de sensitização (ou seja, precipitação de carboneto de cromo nos contornos dos grãos) quando exposto por tempo excessivo em torno de 650 °C.

- Deformação a Frio

Ligas de cobre; níquel; alumínio; aços inoxidáveis austeníticos; aços ao carbono: podem apresentar excessivo crescimento do grão, caso a temperatura (em K) da brasagem alcance cerca de 70% daquela de sua fusão.

- Precipitação

Ligas de aços inoxidáveis tipo PH (“precipitation hardening”) 17-4, 17-7; A 286; à base de níquel, como Inconel X, René 41, Waspaloy; alumínio, como ASTM 2014, 2024, 6061, 7002, 7039, 7075: podem sofrer super-envelhecimento, com conseqüente diminuição da resistência mecânica.

- Transformação de Fase

Todas as ligas que sofrem algum tipo de transformação de fase no estado sólido, sendo as mais importantes a maioria dos aços de médio e alto carbono, com ou sem elementos de ligas, os quais podem formar martensita quando rapidamente resfriados: possibilidade de trincas induzidas pelo hidrogênio; formação de fases extremamente frágeis, entre outros defeitos.

Outros importantes materiais de interesse para a brasagem são os cerâmicos, sendo dos seguintes principais tipos:

- Alumina (Al_2O_3), também conhecida por corundum, possui ponto de fusão de 2050 °C, sendo utilizada, entre outras aplicações, na indústria eletrônica; isolante elétrico; isolante térmico - fusão, termopares, etc.

- Zirconita (ZrO_2), material semi-condutor, com grande resistência à oxidação, é usada como refratário até cerca de 2500 °C, requerendo estabilização com CaO ou MgO (3-5%) para evitar excessiva alteração volumétrica no intervalo de 1000 à 1100 °C.

- Magnésia (MgO), é um dos principais constituintes da dolomita, com ponto de fusão de 2800 °C e alto coeficiente de expansão, utilizada como refratário (com baixa resistência a choque térmico) sendo que seu monocristal apresenta interesse como material estrutural.

- Berilia (BeO), ponto de fusão 2550 °C, alta resistência a ataques químicos (exceto atmosferas halógenas e sulfurosas) e baixa pressão de vapor; combina elevada condutividade térmica (maior do que a maioria dos metais) com resistividade elétrica mais alta do que muitos dos materiais ditos “isolantes”; tóxico.

- Tória (ThO_2), é um óxido muito estável, com ponto de fusão de 3200 °C; alto coeficiente de expansão e baixa condutividade térmica.

Além das questões analisadas, os seguintes importantes problemas podem ocorrer no metal base:

- Formação de uma Zona Afetada pelo Calor (ZAC), com degradação das suas propriedades mecânico/metalúrgicas.

- Fragilização por enxôfre, ou seus compostos, do níquel e certas ligas contendo este elemento em razoável proporção. Forma-se um sulfeto de níquel com baixo ponto de fusão, preferencialmente nos contornos dos grãos, sendo o Ni e Ni-Cu mais suscetíveis, enquanto as ligas com cromo são geralmente as que menos sofrem este ataque.

- Fragilização por fósforo, através da combinação desse elemento com vários metais formando fosfetos frágeis. Devido a esse fato, os metais de adição com base em cobre-fósforo (BCuP) não são normalmente utilizados em ligas de ferro ou níquel.

- Fragilização por hidrogênio, ocorrendo devido à difusão desse elemento em metais base que não foram devidamente desoxidados. Com suficientemente alta temperatura, o hidrogênio reduz o óxido, sendo exemplos típicos sua ação na prata; paládio e cobre eletrolítico tenaz, os quais

contém oxigênio, além de no cobre isento de oxigênio, se o mesmo for imprópriamente aquecido.

- Precipitação de carbonetos, ocorrendo em ligas Cr-C entre aproximadamente 420 e 800 °C.
- Estabilidade de óxidos, sendo os mais difíceis de remover aqueles de Cr, Al, Ti, Si, Mg, Mn e Be.
- Pressão de vapor do metal de adição naquelas juntas que irão operar no vácuo pois, dependendo da relação temperatura/pressão, o mesmo poderá ser contaminado, conforme mostrado na Fig. 17.5.
- Trinca por tensão, a qual pode ocorrer em materiais de alta resistência mecânica, principalmente aços inoxidáveis; ligas de níquel; cobre-níquel; naqueles que possuem alta temperatura de recozimento, ou endurecidos por envelhecimento. A origem da tensão elevada na junta, tanto é devida à fatores externos, quanto desenvolvida no próprio material, através de alterações volumétricas, etc.. O importante detalhe para o reconhecimento dessa trinca, é que após a brasagem a

mesma se encontra preenchida pelo metal de adição. Essa trinca pode ser considerada do tipo corrosão sob tensão, quando o metal de adição for um meio corrosivo (para o metal base), sendo exemplo a liga Inconel 718 brasada com prata (BAG).

Praticamente, a maioria destas interações podem ser minimizadas através dos seguintes procedimentos:

- Manter a mais baixa temperatura de brasagem possível, mas alta o suficiente para que ocorra o perfeito preenchimento da junta.
- Realizar a brasagem no mais curto período de tempo possível.
- Resfriar a junta o mais rapidamente possível, evitando trincas e distorção.
- Selecionar corretamente o metal de adição.

Outrossim, recorde-se que para o projeto da junta, os fenômenos associados à corrosão também devem ser analisados.

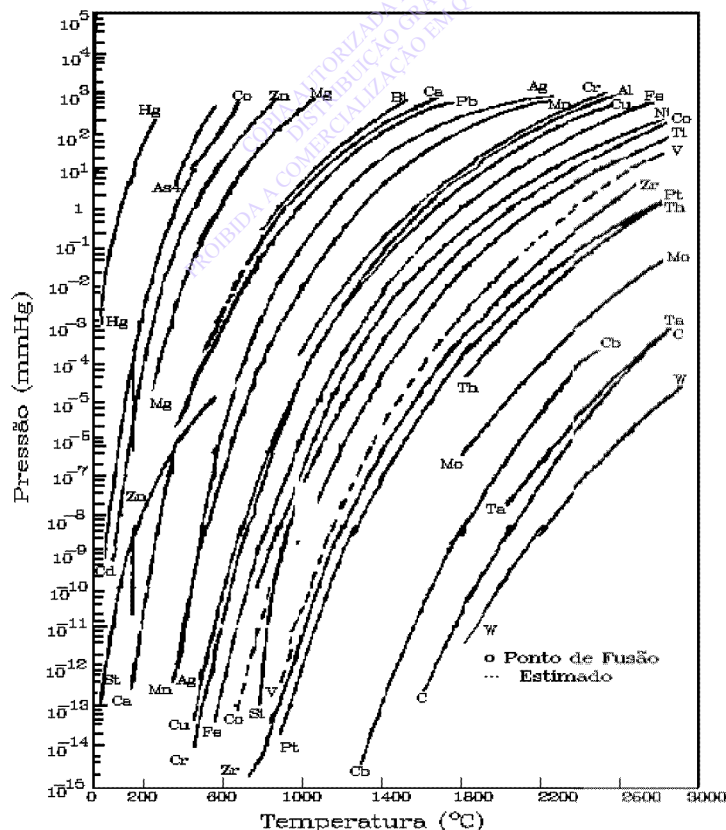


Figura 17.5-Pressão do vapor em função da temperatura.

SELEÇÃO DO METAL DE ADIÇÃO

A opção por um metal de adição, dentre os diversos disponíveis, deve se basear, fundamentalmente, numa clara definição dos seguintes principais tópicos:

- Metal base: possibilidade de interações e compatibilidade.
 - Finalidade da junta: tipo “cosmética” (praticamente não sofrerá esforços); carregamento cíclico, estático; etc..
 - Ambiente de trabalho da junta: alta/baixa temperatura; vácuo; corrosão; radiação; etc..
 - Características elétricas que a junta deve apresentar.
 - Método de brasagem: que pode determinar, inclusive, a forma do metal de adição e a taxa de aquecimento.
 - Taxa de aquecimento: que influenciará a distribuição do calor na junta/peça, com consequência sobre distorção, etc..
 - Forma que o metal de adição é disponível.
 - Dimensões, ou geometria da peça/estrutura a ser brasada: que pode, por sua vez, determinar o método de brasagem e a forma do metal de adição.
 - Tamanho da folga: resultado não somente do desejado mas, também, do que é possível obter em produção.
 - Temperatura de brasagem: necessariamente

te menor do que a linha solidus do metal base; economia de energia; minimiza interações; aumenta vida do ferramental; etc..

Uma rápida seleção do metal de adição pode ser realizada com a ajuda das **Tab. 17.1(a,b)**, nas quais sugere-se o mesmo em função do metal base a ser unido, inclusive para alguns casos de dissimilares.

Entretanto, na escolha definitiva do metal de adição que será empregado, as considerações anteriormente citadas precisam estar presentes. Uma delas é de especial importância e se refere aos metais de adição pré-posicionados na junta, com relativamente grande intervalo de solidificação. Quando o aquecimento se realiza num tempo longo dentro desse intervalo, a porção que funde primeiro se desloca, deixando o metal com mais alto ponto de fusão (conhecido como “cascão”). Esse fenômeno é usualmente denominado “liquação” em brasagem e provoca defeitos na junta. Porém, sendo tomadas as necessárias precauções, pode-se utilizar esses metais de adição, os quais são recomendados para juntas com grande folga, exatamente devido à sua alta viscosidade.

Portanto, é fundamental o conhecimento dos intervalos de solidificação e de brasagem dos metais de adição, sendo que as **Tab. 17.2(a,b)** apre-

Tabela 17.1(a) - Combinações Sugeridas Entre os Metais de Adição e Base para Brasagem

	Al*	Mg*	Cu*	Aços ao C e Baixa Liga	Ferros Fundidos
Al*	BAISi	-	-	-	-
Mg*	N	BMg	-	-	-
Cu*	N	N	-	BAG, BAu, BCuP, RBCuZn	-
Aços ao carbono e Baixa Liga	BAISi	N	BAG, BAu, RBCuZn	BAG, BAu, BCu, RBCuZn, BNi	-
Ferros Fundidos	N	N	BAG, BAu, RBCuZn	BAG, RBCuZn	BAG, RBCuZn, BNi
Aços Inoxidáveis	BAISi	N	BAG, BAu, BCu, BNi	BAG, BAu, BCu, BNi	BAG, BAu, BCu, BNi
Ni*	N	N	BAG, BAu, RBCuZn	BAG, BAu, BCu, RBCuZn, BNi	BAG, BCu, RBCuZn
Ti*	BAISi	N	BAG	BAG	BAG
Be, Zr, V*†	BAISi(Be)	N	BAG	BAG, BNi	BAG, BNi
W, Mo, Ta, Nb*‡	N	N	BAG	BAG, BCu, BNi	BAG, BCu, BNi
Aços Ferramenta	N	N	BAG, BAu, RBCuZn, BNi	BAG, BAu, BCu, RBCuZn, BNi	BAG, BAu, RBCuZn, BNi

* E suas ligas; † Materiais Reativos; ‡ Materiais refratários; (N) Não recomendado, mas técnicas especiais podem viabilizar a união.

sentam aqueles classificados pela AWS - os quais são também discriminados detalhadamente no livro dessa série “Sistemas de Especificação dos

Consumíveis para Soldagem e Brasagem”.

Modernamente, os consumíveis para os metais refratários tem crescido em importância, sendo que

Tabela 17.1(b) - Combinações Sugeridas Entre os Metais de Adição e Base para Brasagem

	Aços Inoxidáveis	Ni*	Ti	Be, Zr, V *†	W, Mo, Ta, Nb *‡	Aços Ferramenta
Aços Inoxidáveis	BAG, BAu, BCu, BNi	-	-	-	-	-
Ni*	BAG, BAu, BCu, BNi	BAG, BAu, BCu, BNi			-	-
Ti*	BAG	BAG	G		-	-
Be, Zr, V*†	BAG, BNi	BAG, BNi	G	G	-	-
W, Mo, Ta, Nb*‡	BAG, BCu, BNi	BAG, BCu, BNi	G	G	G	-
Aços Ferramenta	BAG, BAu, BCu, BNi	BAG, BAu, BCu, RBCuZn, BNi	N	N	N	BAG, BAu, BCu, RBCuZn, BNi

* E suas ligas; † Materiais Reativos; ‡ Materiais refratários; (N) Não recomendado, mas técnicas especiais podem viabilizar a união; (G) Generalizações não podem ser feitas. Vide texto.

Tabela 17.2(a) - Intervalos de Solidificação e de Brasagem dos Metais de Adição Classificados pela AWS

Classificação AWS	Intervalo de Solidificação (°C)	Intervalo para Brasagem (°C)	Classificação AWS	Intervalo de Solidificação (°C)	Intervalo para Brasagem (°C)
PRATA			PRATA		
BAG-1	607-618	618-760	BAG-26	705-800	800-870
BAG-1a	627-635	635-760	BAG-27	605-745	745-860
BAG-2	607-702	702-843	BAG-28	649-710	710-843
BAG-2a	607-710	710-843	BVAg-O	961	961-1038
BAG-3	632-688	688-816	BVAg-6b	779-872	871-982
BAG-4	671-779	779-899	BVAg-8	779	779-899
BAG-5	663-743	743-843	BVAg-8b	779-795	799-899
BAG-6	688-774	774-871	BVAg-18	602-718	718-843
BAG-7	618-652	652-760	BVAg-29	624-707	707-788
BAG-8	779-779	779-899	BVAg-30	807-810	810-927
BAG-8a	766-766	766-871	BVAg-31	824-852	852-885
BAG-9	671-718	718-843	BVAg-32	900-950	950-982
BAG-10	691-738	738-843	OURO		
BAG-13	718-857	857-968	BAu-1	991-1016	1016-1093
BAG-13a	771-893	871-982	BAu-2	891	891-1010
BAG-18	602-718	718-843	BAu-3	974-1029	1029-1091
BAG-19	760-891	877-982	BAu-4	949	949-1004
BAG-20	677-766	766-871	BAu-5	1135-1166	1166-1232
BAG-21	691-802	802-899	BAu-6	1007-1046	1046-1121
BAG-22	680-699	699-830	BVAu-2	891	891-1010
BAG-23	960-970	970-1038	BVAu-4	949	949-1004
BAG-24	660-750	750-843	BVAu-7	1102-1121	1121-1154
BAG-25	740-790	790-845	BVAu-8	1200-1240	1240-1274

Tabela 17.2(b) - Intervalos de Solidificação e de Brasagem dos Metais de Adição Classificados pela AWS

Classificação AWS	Intervalo de Solidificação (°C)	Intervalo para Brasagem (°C)	Classificação AWS	Intervalo de Solidificação (°C)	Intervalo para Brasagem (°C)
PALÁDIO-COBALTO			COBRE e COBRE-ZINCO		
BVPd-1	1230-1235	1235-1252	BVCu-1X	1083	1093-1149
ALUMÍNIO-SILÍCIO			BCu-2	1083	1093-1149
BAISI-2	577-617	599-621	RBCuZn-A	888-899	910-954
BAISI-3	521-585	571-604	RBCuZn-C	866-888	910-954
BAISI-4	577-582	582-604	RBCuZn-D	921-935	938-982
BAISI-5	577-599	588-604	BCuZn-E	868-877	877-940
BAISI-6	559-607	599-621	BCuZn-F	854-860	860-927
BAISI-7	559-596	588-604	BCuZn-G	916-954	954-1010
BAISI-8	559-579	582-604	BCuZn-H	965-999	999-1066
BAISI-9	562-582	582-604	NÍQUEL		
BAISI-10	559-586	582-604	BNi-1	977-1038	1066-1204
BAISI-11	559-596	588-604	BNi-1a	977-1077	1077-1204
COBRE-FÓSFORO			BNi-2	971-999	1010-1177
BCuP-1	710-924	788-927	BNi-3	982-1038	1010-1177
BCuP-2	710-793	732-843	BNi-4	982-1066	1010-1177
BCuP-3	643-813	718-816	BNi-5	1079-1135	1149-1204
BCuP-4	643-718	691-788	BNi-6	877	9127-1093
BCuP-5	643-802	704-816	BNi-7	888	927-1093
BCuP-6	643-788	732-816	BNi-8	982-1010	1010-1093
BCuP-7	643-771	704-816	COBALTO		
COBRE e COBRE-ZINCO			BCo-1	1120-1149	1149-1232
BCu-1	1083	1093-1149	MAGNÉSIO		
BCu-1a	1083	1093-1149	BMg-1	443-599	604-627

a Tab. 17.3 mostra as temperaturas do liquidus daqueles mais usuais. Em todos os casos, recomenda-se que a operação seja realizada na menor temperatura de brasagem possível. Outrossim, a taxa de aquecimento somente exerce pouca influência sobre a qualidade da junta, quando o metal de adição é puro, ou liga com muito pequeno intervalo de solidificação (cerca de 10 °C) sendo, inclusive, esse o tipo mais adequado para folgas estreitas.

CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS

A seguir são descritos os consumíveis classificados pela AWS:

□ Prata (BAg)

Com exceção do alumínio, magnésio e suas ligas, os metais de adição desta classificação po-

dem ser utilizados para a união da maioria dos metais ferrosos e não-ferrosos, tanto pré-posicionados, quanto aplicados manualmente e, em geral, sob qualquer método de aquecimento.

Para que a ação capilar seja ótima, é recomendável que a folga da junta se situe entre 0,05 e 0,13 mm e, a menos que seja indicado ao contrário, deve ser empregado fluxo para a maioria das aplicações.

A adição da prata ao cobre pode originar um eutético a 778 °C, temperatura bem menor do que os pontos de fusão de qualquer um desses metais, sendo que a adição de zinco aos mesmos cria um eutético com uma temperatura ainda menor - de somente 682 °C. Para obter um eutético com temperatura de fusão tão baixa quanto 590 °C, se adiciona cádmio (Cd), sendo encontrado nas classes BAg-1,-1a,-2,-2a,-3 e -27. Entretanto, esse elemento produz fumos tóxicos e a legislação per-

Tabela 17.3 - Temperatura do Liquidus dos Metais de Adição para Brasagem dos Metais Refratários

Metal de Adição	Temperatura do Liquidus (°C)	Metal de Adição	Temperatura do Liquidus (°C)
Ag	960	Ni-Cu	1349
Ag-Cu-Mo	780	Ni-Ti	1288
Ag-Cu-Zn-Cd-Mo	619-701	Pd-Ag	1306
Ag-Cu-Zn-Mo	718-788	Pd-Ag-Mo	1306
Ag-Mn	971	Pd-Al	1177
Au-Cu	885	Pd-Cu	1205
Au-Ni	949	Pd-Fe	1306
Au-Ni-Cr	1038	Pd-Mo	1571
Co-Cr-Si-Ni	1899	Pd-Ni	1205
Co-Cr-W-Ni	1427	Pt-30W	2299
Cu	1082	Pt-50Rh	2049
Cu-Mn	871	Pt-Mo	1774
Mn-Ni-Co	1021	Ta	2997
Mo-B	1899	Ta-Ti-Zr	2094
Mo-Ru	1899	Ta-V-Nb	1816-1927
Nb	2416	Ta-V-Ti	1760-1843
Nb-Ni	1190	Ti	1816
Ni	1454	Ti-Cr	1481
Ni-Cr-B	1066	Ti-Si	1427
Ni-Cr-Fe	1427	Ti-V-Be	1249
Ni-Cr-Fe-Si-C	1066	Ti-V-Cr-Al	1649
Ni-Cr-Mo-Fe-W	1305	Ti-Zr-Be	999
Ni-Cr-Mo-Mn-Si	1149	Zr-Nb-Be	1049
Ni-Cr-Si	1121		

tinente de vários países, principalmente europeus, já proíbe o uso do mesmo nos metais de adição.

Outrossim, a progressiva tendência do uso de ligas com menor conteúdo de prata, por medida de economia, reduz as propriedades mecânicas da junta. A Fig. 17.6 mostra o intervalo de solidificação médio da maioria dessas ligas - ternárias e quaternárias. Mesmo com o melhor intervalo de solidificação, sob o ponto de vista operacional, a ductilidade do metal de adição diminui de 35% para 10%, conforme o conteúdo de prata decresce de 50% para 20%. Apesar do uso de folgas relativamente grandes, o conteúdo de prata não deve ser menor do que cerca de 34%. Por outro lado, as ligas quaternárias com menos de 40% de prata somente devem ser utilizadas, quando o aquecimento é suficientemente rápido para evitar liquação.

Portanto, os consumíveis possuem as seguintes principais características:

- BAG-1: menor intervalo de temperatura para brasagem entre todas as ligas desta classificação. Recomendável para qualquer taxa de aquecimento. Contém cádmio.
- BAG-1a: propriedades similares ao BAG-1, inclusive baixa temperatura de fusão e fluidez. Contém cádmio.
- BAG-2: propriedades similares ao BAG-1; útil quando a folga não é uniforme, devido à seu

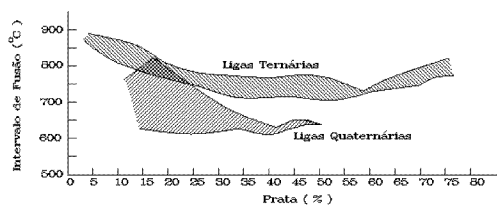


Figura 17.6 - Intervalos Médios de Fusão de Ligas Ternárias e Quaternárias de Prata.

maior intervalo de solidificação. Perigo de liquação, caso a taxa de aquecimento não seja alta. Contém cádmio.

- BAg-2a: similar ao BAg-2; mais econômico (menos prata). Contém cádmio.

- BAg-3: a adição de níquel faz deste metal uma modificação do BAg-1a, aumentando a resistência à corrosão e melhorando seu molhamento, principalmente em pastilhas de carboneto de tungstênio - sua grande aplicação. Intervalo de solidificação próprio para relativamente grandes folgas. Contém cádmio.

- BAg-4: similar ao BAg-3, mas com maior fluidez e grande aplicação em pastilhas de carboneto de tungstênio. Possui a vantagem de não conter cádmio.

- BAg-5 e -6: especialmente utilizados para conexões elétricas e recipientes para leite e comidas, onde é proibido o uso de metais contendo cádmio. BAg-5 é altamente recomendável para união de latões.

- BAg-7: possui baixa temperatura de fusão, boa fluidez e molhabilidade. Utilizado principalmente em recipientes para comida, onde não é permitida a presença de cádmio. Minimiza a possibilidade de trinca por corrosão sob tensão em ligas à base de níquel e por questão estética (cor branca).

- BAg-8: próprio para brasagem em forno com atmosfera controlada, inclusive vácuo, sem uso de fluxo. Geralmente aplicado em cobre e suas ligas, ou, com menor molhabilidade, em aços inoxidáveis; ligas à base de níquel e aços ao carbono.

- BAg-8a: utilizado em atmosfera pura e seca. Próprio para aplicação em aços inoxidáveis do tipo endurecidos por precipitação. Devido à adição de lítio, possui muito boa molhabilidade e fluidez, sendo indicado para metais ditos difíceis de serem brasados, inclusive naqueles contendo traços de titânio ou alumínio.

- BAg-9 e -10: utilizados fundamentalmente na união da “prata de lei” (92,5%Ag; 7,5%Cu). Como possuem diferentes temperaturas de brasagem, podem ser empregados num processo em etapas, sobre juntas consecutivas.

- BAg-13: próprio para brasagem em forno, devido ao baixo conteúdo de zinco. Uso em juntas que irão operar em temperaturas de até 370°C.

- BAg-13a: similar ao BAg-13, mas não contém zinco, sendo próprio quando há volatilização deste elemento na brasagem em forno.

- BAg-18: similar ao BAg-8 na aplicação, mas o estanho promove o molhamento dos aços inoxidáveis, ligas à base de níquel e aços ao carbono. Como seu líquido é menor do que o BAg-8, pode ser utili-

zado na brasagem por etapas, sem fluxo.

- BAg-19: similar ao BAg-9a na aplicação; principal uso, quando tratamento térmico de endurecimento por precipitação é combinado com a brasagem.

- BAg-20: boas características de molhamento e fluidez. Intervalo de temperatura de brasagem maior do que ligas similares que contém cádmio. Aplicações em desenvolvimento.

- BAg-21: utilizado principalmente nas ligas endurecidas por precipitação e aços inoxidáveis AISI das séries 300 e 400, criando uma camada rica em níquel na superfície dos aços dessa última série. Próprio para brasagem em forno com atmosfera controlada, sem fluxo, a menos que a operação ocorra em baixa temperatura. Alta temperatura de brasagem é recomendável. Possui baixa fluidez.

- BAg-22: melhores características de brasagem do que o BAg-3. Próprio para brasagem em baixa temperatura. Não contém cádmio.

- BAg-23: próprio para brasagem por chama e forno com atmosfera controlada, sendo que no vácuo ocorrerá perda expressiva de manganês devido à sua alta pressão de vapor. Possui boa fluidez e é brasado em alta temperatura. Utilizado principalmente quando o serviço será em alta temperatura, sobre aços inoxidáveis; níquel e suas ligas; cobalto e suas ligas.

- BAg-24: Brasado em baixa temperatura, com boa fluidez. Próprio para utilização sobre aços inoxidáveis AISI da série 300, principalmente em utensílios hospitalares e recipientes de comida, além de em pequenas pastilhas de carboneto de tungstênio.

- BAg-25: baixo conteúdo de prata. Uso geral, com boa fluidez e molhabilidade sobre aços ao carbono; aços inoxidáveis e cobre e suas ligas.

- BAg-26: baixo conteúdo de prata. Indicado para aplicações que requerem juntas com resistência mecânica somente moderada, sobre carbonetos e aços ao carbono.

- BAg-27: similar ao BAg-2, mas com menor conteúdo de prata e, portanto, mais suscetível à liquação. Contém cádmio.

- BAg-28: Possui menor intervalo de solidificação, bem como temperatura de brasagem, quando comparando com aqueles de similar conteúdo de prata e sem cádmio.

□ Ouro (BAu)

Os metais de adição dessa classificação, são tradicionalmente empregados onde é requerida resistência à corrosão e/ou oxidação, sobre ligas ferrosas e a base de níquel ou cobalto, além de na

união entre componentes que irão operar no vácuo. Possuindo reduzida tendência de interação com o metal base, esses metais de adição são também próprios para unir juntas finas. Os métodos mais usuais de brasagem são indução; forno; resistência elétrica, sob atmosferas protetoras; ou vácuo, sem fluxo. Quando são utilizados outros métodos de aquecimento, é empregado fluxo à base de borax e ácido bórico. As ligas classificadas são as seguintes

- BAu-1,-2 e -3: combinação útil na brasagem por etapas, pois possuem diferentes temperaturas de emprego.
- BAu-4: próprio na brasagem de ligas para emprego em alta temperatura à base de ferro e níquel.
- BAu-5: principal emprego na união de metais base resistentes ao calor e à corrosão, com boa resistência mecânica nas altas temperaturas de trabalho. Próprio para brasagem em forno com atmosfera protetora, ou vácuo.
- BAu-6: principal emprego na união de super-ligas à base de ferro e níquel, para serviço em elevadas temperaturas. Método de brasagem igual ao anterior.

□ Alumínio-Silício (BAISi)

As seguintes ligas de alumínio podem, em princípio, ser brasadas com os metais de adição descritos mais abaixo: 1060; EC; 1100; 3003; 3004; 3005; 5005; 5050; 6053; 6061; 6062; 6063; 6951; 7005, além dos fundidos A612 e C612. Para juntas cuja sobreposição das partes é menor do que em torno de 6 mm, a folga deve se situar entre 0,15 e 0,25 mm. Sendo a sobreposição maior do que 6 mm, a folga pode ser tão grande quanto cerca de 0,6 mm. Exceto quando a brasagem é realizada no vácuo, um fluxo deve sempre ser empregado, sendo a operação seguida de completa limpeza das partes. Os seguintes metais de adição são classificados:

- BAISi-2: utilizado somente para brasagem em forno ou por imersão. Disponível em folha, ou sanduiche em ambos lados das ligas 3003 ou 6951.
- BAISi-3: uso geral; operação por qualquer método de aquecimento.
- BAISi-4: idem, além de possuir boa resistência à corrosão.
- BAISi-5: utilizado principalmente para brasagem em forno e por imersão, com temperatura menor do que o BAISi-2. Disponível em folha, ou sanduiche em ambos os lados da liga 6951.

- BAISi-6: utilizado na brasagem no vácuo. Disponível como sanduiche, em ambos os lados da liga 3003.

- BAISi-7: idem, também em ambos os lados da liga 6951.

- BAISi-8: idem, mas opera em temperaturas inferiores que os dois anteriores. Disponível como arame, ou sanduiche em ambos os lados da liga 3003.

- BAISi-9: utilizado para brasagem no vácuo. Sua principal aplicação é sobre trocadores de calor em ligas de alumínio das séries 5XXX ou 6XXX. Disponível como sanduiche, em ambos os lados da liga 3003.

- BAISi-10: idem. Disponível como arame em diâmetros de 1,6mm e 2,4mm.

- BAISi-11: disponível como sanduiche, em um ou nos dois lados da liga 3105, formando uma liga própria para operar em forno com múltiplas regiões, com interrupções do vácuo existente. Máxima temperatura de brasagem é 595 °C.

□ Cobre-Fósforo (BCuP)

Talvez uma das mais convenientes propriedades desse metal de adição, seja a possibilidade do mesmo realizar união do cobre sem a utilização de fluxo. Apesar de não estar completamente explicado, o provável mecanismo desse fenômeno reside no metal líquido remover o óxido de cobre que se forma e dar origem à uma escória líquida na temperatura de brasagem, a qual manterá o banho livre de óxidos sólidos. Ligas ricas em cobre também podem ser unidas com este metal de adição, desde que seja utilizado fluxo, ou em forno com atmosfera redutora. Ligas de cobre, por sua vez, também podem ser brasadas de forma similar, desde que a junta não sofra choque ou vibração em serviço. Entretanto, esse metal de adição não pode ser utilizado, em nenhuma circunstância, sobre ligas ferrosas; de níquel; ou naquelas com grande proporção de níquel e/ou cobalto. Caso contrário, ocorrerá a formação de um complexo fosfeto frágil. Outrossim, se deve evitar o uso de BCuP, quando a junta sofrerá exposição à atmosfera sulfurosa em elevada temperatura, pois o metal se desintegrará em pó, além de não ser resistente à ambiente marinho. As seguintes ligas são classificadas:

- BCuP-1: pré-posicionado na junta, é preferido para a brasagem por resistência elétrica. Menos fluido na temperatura de brasagem e mais dútil do que as outras classes.
- BCuP-2 e -4: indicados para juntas com

folgas muito pequenas - de 0,03 à 0,08 mm - pois possuem alta fluidez.

- BCuP-3 e -5: ao contrário dos anteriores, esses metais de adição são indicados para folgas relativamente grandes - entre 0,03 e 0,13 mm.

- BCuP-6: combina propriedades do BCuP-2 e BCuP-3.

- BCuP-7: mais fluido e com menor temperatura do liquidus do que o BCuP-3 ou BCuP-5. Utilizado como arame em forma de anel pré-posicionado em trocadores de calor e tubos.

□ Cobre (BCu) e Cobre-Zinco (RBCuZn)

O metal de adição de cobre é principalmente utilizado para a brasagem sem fluxo, de aço baixo carbono em forno com atmosfera redutora. Sua aplicação se estende, também, para a o mesmo método de brasagem de aços ligados; ligas tipo Monel; ligas níquel-cobre e alguns ferros fundidos. A brasagem de aços inoxidáveis pode ser realizada na mesma atmosfera, mas com fluxo. O metal de adição, em qualquer caso, não deve conter arsênio e o fósforo, se presente, em mínima proporção, pois esses elementos formam complexos frágeis. Latões do tipo alfa-beta (40% à 50% Zn) são utilizados principalmente na brasagem do cobre e ligas ferrosas. Esses metais de adição não devem ser super-aquecidos, pois o vapor de zinco pode originar porosidade. As seguintes ligas são classificadas:

- BCu-1: utilizado na brasagem de metais ferrosos; ligas a base de níquel e cobre-níquel. Possui grande fluidez. É geralmente empregado no forno, em atmosferas de gás natural com combustão parcial, hidrogênio, ou amônia dissociada. Em metais base com óxidos difíceis de serem reduzidos, pode ser necessário o uso de fluxo; naqueles que contêm titânio ou alumínio, é empregado vácuo e/ou recobrimento eletrolítico.

- BCu-1a: idem ao anterior. Disponível na forma de pó.

- BCu-2: similar ao anteriores nas aplicações. Disponível como suspensão de óxido de cobre num meio orgânico.

- RBCuZn-A: utilizado sobre aços ao carbono e baixa liga; ligas de cobre; níquel e ligas à base de níquel; além de aços inoxidáveis, quando não é necessário grande resistência à corrosão. Geralmente necessário o uso de fluxo (bórax-ácido bórico), nos métodos de tocha; forno e indução, com folgas de 0,05 a 0,13 mm.

- RBCuZn-C: utilizado sobre aços ao carbono e baixa liga; cobre e suas ligas; níquel e suas

ligas e aços inoxidáveis. Métodos e fluxo, idem ao anterior.

- RBCuZn-D: principalmente utilizado para carboneto de tungstênio, mas também empregado na brasagem de aços ao carbono e níquel e suas ligas. Denominado “níquel prata”. Todos os métodos de brasagem podem ser empregados, com exceção de no forno com atmosfera.

- BCuZn-E (CDA 298): utilizado para “Solda Brasagem” - veja o Capítulo 16 sobre Soldagem Oxigás.

- BCuZn-F (CDA 472): utilizado para a brasagem de aços ao carbono e baixa liga; ferros fundido e maleável; latões; bronzes e algumas ligas de níquel. Fluxo é empregado em todos os casos. Baixa produção de fumos.

- BCuZn-G: utilizado essencialmente para a brasagem da liga de cobre CDA número 260, com fluxo. Baixa produção de fumos.

- BCuZn-H: idem, CDA número 240, idem.

□ Níquel (BNi)

Esses metais de adição são utilizados quando é requerida alta resistência à corrosão e ao calor, ou para operação em temperaturas tão baixas quanto a do nitrogênio líquido. Atmosferas redutoras em relação ao conjunto metal de adição/metal base, são as que fornecem juntas com melhor qualidade. Nos outros métodos - tocha; indução; ou forno sem atmosfera controlada - deve-se utilizar fluxo. Como consequência da baixa pressão de vapor desses metais de adição, os mesmos são próprios para operar no vácuo, sendo o cromo o elemento que limita esta aplicação. Um interessante fenômeno se deve à combinação do fósforo com outro elemento, pois a liga resultante possui muito baixa pressão de vapor. As ligas classificadas pelas WAS são as seguintes:

- BNi-1: utilizado para brasagem de ligas com alta resistência mecânica e ao calor.

- BNi-1a: similar ao anterior, com carbono máximo de 0,06%.

- BNi-2: brasagem numa menor temperatura e melhor fluidez do que o BNi-1, com as demais propriedades similares ao mesmo.

- BNi-3: utilizado para aplicações similares ao BNi-1 e -2, mas menos sensível à atmosferas não exatamente redutoras.

- BNi-4: mais dútil do que o anterior, o restante sendo similar. Utilizado em folgas relativamente grandes.

- BNi-5: para serviço em elevada temperatura, que requer elevada resistência mecânica e à

oxidação. Similar ao BNi-1 mas, como não contém boro, pode ser utilizado em instalações nucleares.

- BNi-6: pode ser utilizado em atmosferas não exatamente redutoras e em brasagem de aços com baixo conteúdo de cromo em atmosfera exotérmica. Grande fluidez.

- BNi-7: utilizado para serviço em alta temperatura - estruturas alveoladas, tubos de parede fina, etc. - e nucleares, pois não contém boro.

- BNi-8: utilizado sobre materiais resistentes à corrosão. Contendo manganês, esse elemento pode oxidar muito rapidamente se os gases da atmosfera - hidrogênio, argônio e hélio - não forem bastante secos e puros. A brasagem sob vácuo somente pode ser realizada se o mesmo possuir baixa pressão e grande estabilidade.

□ Cobalto (BCo)

Atualmente existe somente uma classificação AWS para esse metal de adição (BCo-1), o qual é empregado quando se faz necessário suas propriedades em altas temperaturas e compatibilidade com o metal base. Juntas com melhor quali-

dade podem ser obtidas na brasagem em forno com atmosfera de alta pureza, ou por difusão. A Brasagem por tocha também é realizada, existindo fluxos especiais para tanto.

□ Magnésio (BMg)

A liga ASTM M1A pode ser brasada por forno e tocha, com os metais de adição BMg-1, ou BMg-2a. As demais ligas somente podem utilizar o método por imersão (“dip”), sendo empregado o BMg-1 para AZ10A, K1A e ZK21A e o BMg-2a para as mesmas, além das AZ31B e ZE10A. Deve-se observar que o magnésio entra em combustão numa temperatura próxima a seu solidus, não existindo este problema quando o material estiver imerso em fluxo, ou sal (“dip”).

□ Metais de Adição para Serviço no Vácuo (BV--)

Esses metais de adição devem ser empregados quando a junta irá operar no vácuo, pois não possuem elementos que vaporizam ou passam para a fase gasosa na temperatura de serviço, cuja atmosfera deve ser de alta pureza.

MEIOS DE PROTEÇÃO

Seja qual for o método de brasagem empregado, ou materiais envolvidos, é de suma importância impedir interações do metal de adição fundido, ou mesmo do metal base aquecido, com a atmosfera ambiente. Isso, principalmente, porque são formados óxidos, além de nitretos e outros compostos indesejáveis. A oxidação dificulta o molhamento e não permite que a união se realize perfeitamente, com conseqüente deterioração das propriedades mecânico/metalmúrgicas da junta.

Na brasagem, esta proteção pode ser realizada através do uso de fluxos, ou por atmosferas controladas, sejam elas compostas por gases (inertes, ou redutores), ou vácuo.

À seguir serão analisadas as várias opções disponíveis, apresentadas separadamente para facilitar o entendimento de suas funções. São raras as situações em que algum tipo de proteção não é empregado, sendo exemplo certas aplicações do metal de adição cobre-fósforo.

FLUXOS

Apesar de ser fundamentalmente utilizado por diluir e remover os óxidos durante a brasagem, o fluxo auxilia no preenchimento da junta, devendo

ser facilmente deslocado pelo metal de adição fundido. Além disso, sob certas circunstâncias, o mesmo suprime a volatilização de elementos do metal que possuem alta pressão de vapor.

Para cumprir essas funções, o fluxo deve estar fundido e ativo antes da temperatura liquidus do metal de adição ser alcançada, pois quanto menor for a sua temperatura de fusão, menos a junta sofrerá oxidação. Entretanto, fluxos com muito baixo ponto de fusão são geralmente instáveis na temperatura de brasagem, sendo aconselhável que o mesmo funda 50 °C abaixo do liquidus do metal de adição e 50 °C acima da temperatura máxima de brasagem.

Pode-se acrescentar, ainda, os seguintes fatores para a seleção de um fluxo:

- Como acima mencionado, o intervalo de temperatura que o fluxo efetivamente age, deve incluir aquele da brasagem. Entretanto, se o tempo de operação é relativamente grande, um fluxo com vida útil mais longa é preferível do que com maior atividade. No caso da brasagem ser realizada rapidamente, as propriedades requeridas são contrárias a estas.

▪ A vida útil do fluxo é mais longa em atmosferas não oxidantes.

▪ Para brasagem por imersão (“dip”), não deve ser utilizado fluxo que contenha água, inclusive aquela que se encontra na forma cristalina.

▪ Para brasagem por resistência elétrica, o fluxo deve ser condutor de corrente, sendo geralmente requerido, portanto, um fluxo úmido.

▪ Deve ser mínima a ação corrosiva do fluxo e, ainda que o mesmo não seja removido completamente após a brasagem, é desejável que ela não ocorra pela hidrólise de seus resíduos.

▪ O fluxo deve ser facilmente removido após a brasagem.

▪ O fluxo fundido deve cobrir completa e continuamente a área da junta.

▪ O fluxo fundido deve possuir uma viscosidade suficientemente baixa, que permita seu deslocamento pelo metal de adição e a folga (capilar) seja preenchida.

Apesar das complexas formulações modernas, com grande número de compostos, nenhum fluxo individualmente satisfaz todos esses requerimentos, sendo necessário que se analize as vantagens e desvantagens daqueles existentes, ou seja:

□ Fluxos contendo Borax e Ácido Bórico

O Borax é disponível na forma de sal anidro ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), ou com 47% de água cristalizada ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), o qual pode efervescer quando aquecido. É um material relativamente barato e utilizado há centenas de anos como eficiente fluxo para operações no intervalo de temperatura 800-950 °C, principalmente sobre aços baixo carbono; cobre e latões. Não é indicado, entretanto, nos casos em que óxidos refratários se formam pois, quando saturado com os mesmos, se acumula em partes isoladas, deixando livre outras superfícies da junta, as quais sofrem oxidação.

O ácido bórico é utilizado em conjunto com o borax, para facilitar a remoção dos resíduos vítreos que restam sobre a junta; formar uma cober-

tura contínua sobre o metal de adição fundido e ser efetivo por relativamente longos períodos a alta temperatura. Conforme a proporção desse ácido aumenta (geralmente menor do que 50%) diminui a capacidade do fluxo em dissolver óxidos e cresce sua temperatura de fusão, conforme mostrado na **Tab. 17.4**.

Portanto, esses fluxos não são recomendados para brasagem de materiais que fundem abaixo de 800 °C, além de deixar resíduos na junta dificilmente solúveis em água.

□ Fluxos à base de Fluoretos

A adição de fluoretos às misturas borax/ácido bórico, tem efeito sobre as mesmas de baixar o ponto de fusão; reduzir a viscosidade e aumentar a capacidade de dissolução dos óxidos. Essas propriedades são necessárias, principalmente, para permitir o uso dos metais de adição com baixo ponto de fusão representados pelas ligas quaternárias à base de prata. Com a troca dos sais de sódio pelos de potássio, esses fluxos têm, ainda, melhoradas suas características de dissolução dos óxidos e menor temperatura de operação. Então, fluxos deste tipo fundem a cerca de 550 °C e são estáveis até em torno de 800 °C, removendo óxidos refratários em geral e seus resíduos são solúveis em água, facilitando a remoção dos mesmos.

Entretanto, esses fluxos não realizam as funções desejadas em certos tipos de aços inoxidáveis e carbonetos de tungstênio. A adição de menos de 1% do elemento boro (em pó), torna um fluxo à base de fluoretos extremamente ativo, com capacidade de dissolver os óxidos dos materiais em questão.

□ Fluxos à base de Fluoretos e Cloretos de Metais Alcalinos

O alumínio e suas ligas formam óxidos tão estáveis, que não são removidos por fluxos somente à base de fluoretos. Se o metal base sofreu uma completa limpeza química, é efetiva uma combinação (% em massa), por exemplo, de cloreto de sódio (31%);

Tabela 17.4 - Temperatura Aproximada de Fusão para Fluxos à Base de Borax e Ácido Bórico

Composto Anidro (% em massa)			Composto Anidro (% em massa)		
Borax	Ácido Bórico	Temperatura de Fusão (°C)	Borax	Ácido Bórico	Temperatura de Fusão (°C)
100	0	760	25	75	825
75	25	815	0	100	875
50	50	825			

cloreto de lítio (15%); cloreto de potássio (44%); fluoreto de potássio (7%) e bissulfato de potássio (3%). Quando a brasagem for realizada sobre superfícies de alumínio que não sofreram este tipo de limpeza, é necessário a adição de 8% de cloreto de zinco, para que ocorra perfeito molhamento.

❑ Outros Tipos de Fluxos

O fluxo à base de fluoroboretos se torna ativo a cerca de 600 °C, sendo estável até 1000 °C. É indicado para eficiente remoção de óxidos refratários em temperaturas acima de 750 °C e para prolongados períodos de brasagem. Em materiais com alta proporção de cromo e certos aços inoxidáveis, a adição de boro aumenta ainda mais sua ação.

A dissolução de um composto, tal como borato metílico, em um solvente orgânico, tipo álcool metílico, permite a aplicação do fluxo via a tocha de brasagem. Isso é feito através da passagem do gás combustível utilizado na chama, pelo interior de um recipiente que contém a mistura mencionada, a qual, por arraste, termina sendo projetada na junta. Entretanto, a conveniência deste procedimento é prejudicada pelo fato de que as superfícies da junta, cuja folga apresenta dimensão capilar, podem não ser atingidas pelo fluxo vaporizado.

Os fluxos são disponíveis nas formas de pó, pasta, ou líquido. Para certas aplicações, o pó pode ser misturado à água ou álcool, formando uma perla. Quando isso é realizado pelo usuário, normalmente não é possível utilizar novamente uma mistura que tenha secado, pois ocorrem reações químicas que alteram suas características. O pó é geralmente empregado com a imersão da vareta do metal de adição aquecida no recipiente que o contém. O fluxo adere à sua superfície e a chama da tocha funde o conjunto sobre a junta. Como também será chamada a atenção no método de brasagem por chama, apesar de popular, essa é uma maneira precária de adicionar o fluxo, pois somente uma pequena proporção do mesmo penetra na junta, sem preenchimento completo da folga pelo metal de adição.

Seja qual for a forma do fluxo utilizado, um importante detalhe é que o mesmo deve ser aplicado com abundância sobre a junta e, quando for o caso, também sobre o metal de adição. Não é por sovínice no uso desse material, que será realizada economia nesse processo.

ATMOSFERAS

As atmosferas em que a brasagem pode ser realizada, se dividem entre aquelas gasosas e vácuo. Apesar das mesmas serem utilizadas principalmente em forno, os métodos de indução e resistência também são empregados, sendo que em alguns casos é necessário a adição de fluxo.

São de dois tipos as atmosferas gasosas:

- Quimicamente ativa: a qual reage com qualquer filme existente nas superfícies que serão unidas, ou com o metal de adição durante a brasagem, removendo-os, por decomposição, ou por combinação com os elementos que formam o filme.
- Quimicamente inerte: com um gás que não reage com os materiais envolvidos no processo.

As camadas que se produzem nas superfícies, são formadas por compostos simples ou complexos de sulfetos; boretos; fosfetos; substâncias orgânicas; ou óxidos. Dentre eles, o último é, em geral, o mais importante além de, em qualquer atmosfera, a pressão parcial do oxigênio agir como um fator determinante na remoção de qualquer camada que se estabeleça.

Essas camadas de óxidos são removidas, com uma facilidade diretamente proporcional àquela com que os íons de oxigênio podem ser destacados dos íons metálicos. Portanto, isso depende da força que uma específica ligação química possui, a qual é principalmente função dos seguintes fatores:

- Numa primeira aproximação, do calor de formação do óxido.
- Mais exatamente, da alteração na energia livre do sistema durante a reação.
- Da máxima energia resultante na reação do metal com um mol de oxigênio.

Os metais ditos “nobres” - tais como ouro; prata e paládio - possuem baixo calor de formação dos seus óxidos, com o da prata alcançando somente 61,1 kJ para um mol de oxigênio, sendo instáveis e, portanto, facilmente destacados. Já metais como cobre; níquel e cobalto apresentam mais altos calores de formação dos seus óxidos - por exemplo, 343,3 kJ para o primeiro elemento - e proporcionalmente maior dificuldade de serem retirados. Por fim, aqueles óxidos dos metais como cromo (751,9

kJ); alumínio (1116,2 kJ) e berílio (1233,4 kJ), apresentam tão alto calor de formação, que a brasagem dos mesmos em atmosfera controlada é bastante difícil de ser realizada. Entretanto, note-se que a dificuldade na brasagem de uma dada liga não é, necessariamente, igual à do metal contido em maior proporção na mesma.

A dissociação dos óxidos é facilitada com o aumento da temperatura de brasagem, pois reduz a energia livre de formação dos mesmos. Entretanto, a temperatura que um óxido se dissocia, depende diretamente da pressão parcial do oxigênio na atmosfera. Se esta for 0,21 bar, ou maior, a temperatura necessária para sua dissociação será mais alta do que a do ponto de fusão do metal, na maioria dos casos. Entre as notáveis exceções, se encontram os óxidos de ouro; prata; platina e suas ligas.

Para viabilizar a brasagem dos outros metais, a pressão parcial do oxigênio deve ser reduzida. Isso pode ser feito através de vácuo, ou pela introdução de um gás inerte, ou redutor.

Os gases inertes hélio e argônio são os mais utilizados, com o segundo sendo muito mais barato do que o primeiro. Após evacuar e preencher com o gás inerte a retorta por diversas vezes, a pressão parcial do oxigênio é muito pequena. Entretanto, durante a brasagem ocorre decomposi-

ção de óxidos e é possível que em determinados pontos da junta, essa pressão do oxigênio se torne alta. Portanto, a atmosfera não pode permanecer estagnada, sendo necessário um fluxo contínuo de gás.

A utilização de um gás redutor, como o hidrogênio, provoca a decomposição da camada de óxido, através de reação química com a mesma, resultando o metal e água, ou seja, ocorre sua redução, que é um fenômeno reversível. Dessa forma, para cada temperatura e pressão - a maioria das reações ocorrendo à uma atmosfera - há um limite para o acúmulo de água no ambiente (o que é dado pela pressão parcial do vapor d'água) acima do qual o metal volta a oxidar. Na brasagem - e nos tratamentos térmicos também - é utilizado como indicador a temperatura na qual a umidade contida num gás condensa, denominada "ponto de orvalho", sendo que a **Tab. 17.5** apresenta sua relação com o conteúdo de vapor d'água.

Para se prever a atmosfera de brasagem necessária em cada situação e baseado na termodinâmica da formação de seus óxidos, foram desenvolvidas curvas para diversos metais, as quais mostram a relação entre o ponto de orvalho da atmosfera redutora, com sua temperatura e o potencial oxidante da mesma, conforme apresentado na **Fig. 17.7**.

Tabela 17.5 - Relação entre a Temperatura do Ponto de Orvalho e Umidade Contida na Atmosfera

Ponto de Orvalho (°C)	Umidade Contida		Ponto de Orvalho (°C)	Umidade Contida	
	Volume (%)	ppm*		Volume (%)	ppm*
-18	0,1500	1500	-62	0,0014	14
-34	0,0329	329	-73	0,0002	2
-51	0,0055	55			

*ppm = partes por milhão.

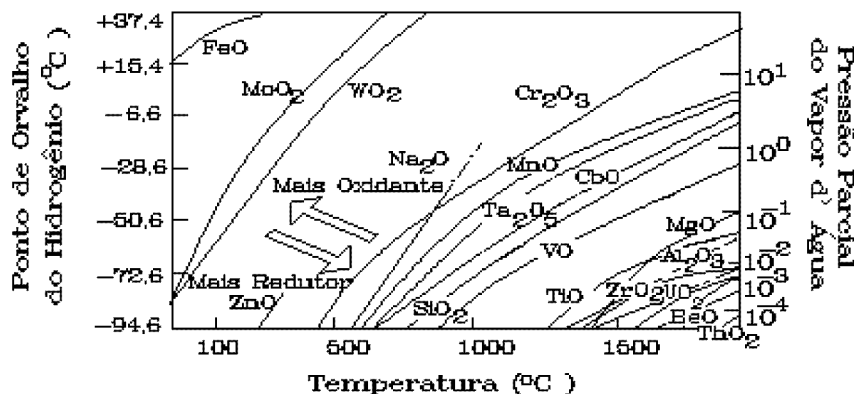


Figura 17.7 - Equilíbrio dos Metais com seus Óxidos em Atmosferas de Hidrogênio.

Então, qualquer combinação de temperatura de brasagem e ponto de orvalho, que estiver à direita e abaixo da curva considerada nessa **Fig. 17.7**, assegurará condições redutoras e a união se realizará. Ao contrário, a área acima e à esquerda de cada curva, indica atmosfera cujo potencial de redução não é suficiente para permitir que a brasagem ocorra. Logo, para criar uma atmosfera conveniente, pode-se tanto alterar a temperatura da operação, quanto o ponto de orvalho da mesma. É geralmente preferida a primeira opção, quando as condições específicas de brasagem o permitirem, devido à sua maior simplicidade. Por outro lado, numa liga, o elemento (do metal base ou de adição) escolhido para o estabelecimento da atmosfera de brasagem, deve ser aquele cujo óxido apresenta maior dificuldade de redução, ou seja, com curva mais para a direita no diagrama, além de sua proporção de átomos estar acima de cerca de 1%. Deve-se observar, também, que estas curvas apresentam muito boa relação com o que ocorre na prática da brasagem, sendo uma notável exceção o fato do cobre oxidar no intervalo de temperatura entre 65 °C e 175 °C, mesmo em hidrogênio e ponto de orvalho inferior à -18 °C.

Por sua vez, a **Tab. 17.6** discrimina as atmosferas para brasagem reconhecidas pela AWS, juntamente com as aplicações recomendadas para as mesmas. Essa relação não deve ser entendida como

a única válida, sendo que outras combinações de gases mais convenientes para uma dada aplicação podem e são frequentemente utilizadas. Entretanto, precauções devem ser tomadas, para não utilizar gases que possam interagir negativamente com os materiais envolvidos.

A brasagem no vácuo é empregada, principalmente naquelas situações que não admitem nenhum resquício de fluxo, ou os materiais envolvidos reagem com os gases redutores da atmosfera. Isso ocorre normalmente em componentes das indústrias aeroespacial, nuclear e eletrônica, entre materiais similares e dissimilares, incluindo titânio; nióbio; zircônio; tântalo e molibdênio. A pressão máxima admissível é determinada por uma série de fatores, entre os principais se encontrando o volume de gás remanescente e os tipos dos materiais, sendo o grau de vácuo geralmente denominado segundo a seguinte terminologia: (a) Baixo Vácuo de 100 à 3,3 kPa; (b) Médio Vácuo de 3,3 kPa à 130 Pa; (c) Alto Vácuo de 0,13 à 0,13x10⁻³ Pa; (d) Ultra-Alto Vácuo menor do que 0,13x10⁻⁶ Pa.

Outrossim, uma das vantagens deste tipo de atmosfera, é ser baixo o conteúdo dos gases residuais. Por exemplo, com relação ao vapor d'água, a pressão (vácuo) de 1,3x10⁻² Pa equivale ao ponto de orvalho de -90 °C, enquanto um vácuo de 1,5x10⁻³ Pa contém somente 1,32x10⁻⁶% do mesmo.

MÉTODOS DE BRASAGEM

A brasagem pode ser realizada por diversos meios de aquecimento, com o componente imerso em várias atmosferas. O metal de adição é disponível nas formas de vareta; fita; pasta; ou pó e o fluxo, quando empregado, se apresenta como pó; pasta; líquido; ou pasta semi-fluida, estando todos esses consumíveis detalhadamente descritos no livro dessa série “Sistemas de Especificação dos Consumíveis para Soldagem e Brasagem”.

A seguir são apresentados os principais métodos existentes de brasagem:

☐ Brasagem por Chama

Também denominada brasagem por tocha, emprega como fonte de calor um ou mais maçaricos, que queimam misturas de acetileno; propano; GLP; gás natural; ou outro gás combustível disponível, com oxigênio, ou, raramente, ar. A seleção da combinação mais conveniente depende da quantidade de calor e temperatura necessárias para a operação, sendo que a discussão apresentada no

Capítulo 16 (Soldagem por Oxigás) pode ser útil.

Esse método é realizado de forma manual; parcialmente mecanizado; ou totalmente automatizado, sendo utilizado principalmente sobre aços ao carbono, baixa liga e inoxidáveis; além de em ligas de alumínio, cobre e magnésio.

O fluxo deve ser aplicado sobre a superfície limpa da junta, de forma abundante, na forma de pó; pasta (essa de preferência dissolvida em álcool e não em água); líquido; ou mistura de pasta e metal de adição em pó. A seguir, o metal de adição, ou é pré-posicionado na junta, neste caso com um pequeno excesso prevenindo sua contração, ou adicionado durante a operação. Como mencionado, uma forma bastante difundida de se adicionar o fluxo, quando a brasagem é realizada com vareta, é aquecer a sua ponta com a chama e mergulhá-la no mesmo, o qual adere à superfície. Esse procedimento nem sempre é eficiente, pois as superfícies internas da folga são aquecidas antes de serem protegidas com fluxo e, portanto, se oxidam, não

Tabela 17.6 - Tipos de Atmosferas para Brasagem Reconhecidas pela AWS

Tipo AWS	Origem da Atmosfera / Ponto de Orvalho Máximo do Gás de Entrada	Composição Aproximada (%)			Aplicação Indicada		Observação
		H ₂	N ₂	CO	Metal de Adição	Metal Base	
1	Produto da Combustão de Gás (baixo hidrogênio)/Ambiente	5 a 1	87	5 a 1	B _{Ag} (a); B _{CuP} ; R _{BCuZn} (a)	Cobre; latão(a)	11 a 12% de CO ₂
2	Idem (descarburizante)/Ambiente	14 a 15	70 a 71	9 a 10	B _{Cu} ; B _{Ag} (a); R _{BCuZn} (a); B _{CuP}	Cobre (b); latão (a); aço baixo carbono; aço médio carbono (c); níquel; monel	5 a 6% de CO ₂ Descarburizante
3	Idem (seco)/-40	15 a 16	73 a 75	10 a 11	Idem 2	Idem 2, além de aços médio e alto carbono	-
4	Idem (carburizante, seco)/-40	38 a 40	41 a 45	17 a 19	Idem 2	Idem 2	Carburizante
5	Amônia dissociada/-54	75	25	-	B _{Ag} (a); B _{CuP} ; R _{BCuZn} (a); B _{Cu} ; B _{Ni}	Idem 1 e 2, além de ligas contendo Cr (d)	-
6	Hidrogênio em cilindro/Ambiente	97 a 100	-	-	Idem 2	Idem 2	Descarburizante
7	Hidrogênio seco e desoxigenado/-59	100	-	-	Idem 5	Idem 5, além das ligas de Co, W e carbonetos (d)	-
8	Materiais voláteis aquecidos	Vapores inorgânicos (tais como de Zn; Cd; Li; fluoretos voláteis)			B _{Ag}	Latões	Uso Especial. Pode ser usado com atmosferas 1 a 7 para evitar fluxo
9	Gás inerte purificado	Gás inerte			Idem 5	Idem 5, além de Ti; Zr; H _F	Uso Especial. Peças muito limpas e a atmosfera pura
10	Vácuo	Vácuo acima de 2 torr			B _{CuP} ; B _{Ag}	Cobre	-
10A	Vácuo	Entre 0,5 e 2 torr			B _{Cu} ; B _{Ag}	Cobre, além de aço baixo carbono	-
10B	Vácuo	0,001 a 0,5 torr			B _{Cu} ; B _{Ag}	Cobre, além de aços ao carbono e baixa liga	-
10C	Vácuo	0,001 torr			B _{Ni} ; B _{Au} ; B _{AlSi} ; Ligas de Ti	Aços resistentes ao calor e à corrosão e metais refratários	-

(a) Quando a atmosfera contém componentes voláteis, deve ser adicionalmente utilizado fluxo; (b) O cobre deve ser do tipo desoxidado; (c) O tempo de aquecimento deve ser o menor possível, para evitar descarburização; (d) Se apreciáveis teores de Al, Ti, Si, ou Be estiverem presentes, deve ser adicionalmente empregado fluxo.

permitindo que ocorra um perfeito molhamento.

A chama, neutra, ou levemente redutora, deve aquecer a junta uniformemente, através do envelope, sem que o cone da mesma toque a peça. Para não provocar aquecimento diferenciado, o maçarico deve ser oscilado e partes mais espessas, ou que conduzem calor numa maior taxa, necessitam sofrer aquecimento prévio, ou preferencial. Quando o metal de adição funde, fato visível pela sua alteração de brilho e forma, o aquecimento

deve ser interrompido e a peça resfriada.

Diversos tipos de equipamentos são disponíveis para o aquecimento por chama, sendo os princípios de funcionamento e segurança semelhantes àqueles descritos no **Capítulo 16**. Para a utilização manual, os bicos tanto podem ser dos tipos apresentados naquele capítulo, quanto especificamente projetados para a brasagem, conforme mostrado na **Fig. 17.8**. Note-se que os bicos empregados com oxi-acetileno acompanham o fim

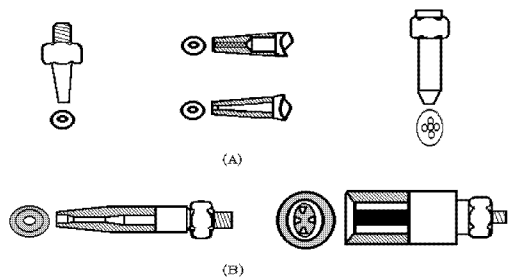


Figura 17.8 - Típicos Bicos Utilizados na Brasagem por Tocha Manual: (a) Oxiacetileno; (b) Gás Natural e Oxipropano.

do orifício, enquanto aqueles para gás natural e propano tem a face recuada pois, de outra forma, a chama não se estabeleceria propriamente, devido à baixa velocidade de propagação que a mesma possui nesses gases.

O controle manual da tocha apresenta alguns inconvenientes, entre os mesmos: (a) A necessidade de um hábil operador; (b) Apesar da habilidade do operador, a qualidade da união não será constante; (c) A produção será relativamente pequena.

A chamada “tocha fixa” representa um primeiro passo no sentido de tornar mecanizada a brasagem, requerendo um relativamente pequeno investimento inicial para ser implementada. A mesma consiste, essencialmente, no pré-posicionamento do metal de adição/fluxo na junta, a qual deve estar segura por dispositivos de fixação, seguido do aquecimento das partes (com a tocha fixa) de forma que o mesmo ocorra em posições selecionadas, na maioria das vezes repetindo aquelas de uma operação manual. Para simulações iniciais, as mesmas tochas utilizadas na brasagem manual podem ser empregadas no sistema com tocha fixa. Será geralmente notado, então, que o produto final não apresenta a qualidade desejada, pois há flutuação da pressão dos gases; variação das características da chama, além da mesma sempre permanecer no regime estabelecido inicialmente (e que consome muito gás).

Portanto, para a produção de grandes lotes deve ser usado um queimador especialmente projetado para este fim, do tipo “Marshall”, por exemplo. Esse equipamento se baseia num engenhoso e barato sistema, que consiste em manter permanentemente acesa uma pequena chama piloto (de baixa pressão) ao lado da chama responsável pela brasagem (de alta pressão) com ambas utilizando as mesmas fontes de gases. Essa chama principal opera com

o gás combustível fornecido à uma velocidade maior do que a velocidade de combustão do mesmo, o que provocaria sua extinção numa situação normal. Entretanto, devido à chama piloto, ela se mantém acesa, com maior poder de aquecimento, pois há expansão do volume desse gás. Como consequência dos fatores citados e do projeto desse queimador, a chama produzida pelo mesmo é muito mais concentrada e definida, além de operar num regime laminar.

A maior produtividade será alcançada, entretanto, com a mecanização total do processo, o que implica na aplicação do metal de adição na forma de pasta (o qual já contém fluxo). Diversos sistemas são disponíveis comercialmente, praticamente todos baseados nos tipos em que as peças giram sobre uma mesa, ou as mesmas se encontram numa correia transportadora, com os queimadores posicionados nas laterais. Cada operação que será realizada (veja abaixo) ocorre numa estação de trabalho. Na definição do equipamento necessário para uma dada aplicação, devem ser considerados os seguintes fatores e etapas:

- O carregamento e descarregamento das peças, o que pode ocorrer manualmente, ou automaticamente.
- A aplicação do metal de adição/fluxo em pasta, preferencialmente de forma automática, com uma bsnaga especialmente projetada depositando uma exata quantidade de material na junta.
- O aquecimento, o qual normalmente se processa em diversas estações - ou seja, a máquina movimentada a peça e a posiciona sob várias tochas - e cujo tempo total deve ser obtido empiricamente.
- A distância entre as peças, sendo regra geral que os pontos mais próximos mantenham, no mínimo, 75 mm entre si.
- A massa total das peças.
- A necessidade de estações em que não ocorre nenhuma operação. Como regra geral devem existir, no mínimo, duas dessas estações após aquelas de aquecimento e uma após cada tipo de operação. Isso se deve à possível alteração no tempo de aquecimento, ou outra operação, para a mesma peça, além de possibilitar que a mesma máquina seja utilizada com peças diferentes.
- Estações de resfriamento, o qual é realizado geralmente com fluxo forçado de ar, ou água. Algumas vezes essa estação se confunde com a de descarregamento, pois a peça é projetada num recipiente cheio de um líquido refrigerante, o qual normalmente também é água.

□ Brasagem por Indução

A brasagem é realizada por uma bobina de indução. A resistividade e o fluxo de corrente alternada no metal sob o efeito dessa bobina, provoca correntes parasitas, ou perdas pelo efeito Joule (I^2R), o que resulta num aquecimento rápido e concentrado do mesmo.

Praticamente todos os metais podem ser brasados por este método, com excessão do alumínio, magnésio e suas ligas, sendo sua aplicação relativamente simples, não requerendo habilidade do operador e permitindo processamento automático. O uso de fluxo e o pré-posicionamento do metal de adição são similares ao método anterior.

Geralmente é necessário aquecer somente a superfície da peça, com a penetração (P) inversamente proporcional à frequência da corrente, dada a seguir:

$$P = C \cdot [R/(M \cdot F)]^{1/2} \quad (\text{mm}) \quad [17.11]$$

onde:

R = resistividade ($\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$);

M = permeabilidade magnética relativa (adimensional);

F = frequência (Hz);

C = constante, a qual depende das unidades das variáveis acima, no caso ($\text{m} \cdot \text{Hz} \cdot \Omega^{-1}$)^{1/2}.

A permeabilidade magnética relativa depende da intensidade do campo magnético no qual o material (magnético) está imerso. Esse campo, por sua vez, é função da densidade de potência aplicada. Para o ferro, essa permeabilidade diminui com o aumento da temperatura, sendo 1 no ponto Curie (aproximadamente 770 °C), que é quando esse metal se torna não-magnético, e 100 na temperatura ambiente. Dessa forma, em qualquer metal que sofre essa transformação, a taxa de aquecimento após o ponto Curie é muito menor, sendo mais econômico, portanto, que a brasagem se realize antes do mesmo ser alcançado.

Todos os outros metais não-magnéticos possuem a permeabilidade relativa igual a 1, em qualquer temperatura. A resistividade dos metais, entretanto, aumenta proporcionalmente com a temperatura.

Portanto, para os aços, na temperatura ambiente, é possível simplificar a equação 17.11, com a penetração aproximadamente dada por:

$$P = 58,4/(F)^{1/2} \quad (\text{mm}) \quad [17.12]$$

Por exemplo, em aço na temperatura

ambiente e frequência de 3 kHz, a penetração é de aproximadamente 1,0 mm, enquanto que à 500 kHz a mesma diminui para cerca de 0,08 mm. Já no intervalo de temperatura entre 860 a 1300 °C, essa penetração aumenta cerca de 10 vezes.

Fontes de corrente alternada são disponíveis em potências desde menos de 1 kW, até centenas de quilowates, nos tipos: (a) Motor-gerador, com baixa frequência, até 10 kHz; (b) Osciladores por centelhamento, de média frequência, entre 20 kHz e 300 kHz; (c) Osciladores de tubo a vácuo, denominados unidades de rádio-frequência, que empregam de média a alta frequência, ou seja, de 200 kHz a 500 kHz. Industrialmente a brasagem é realizada geralmente com frequências superiores à 10 kHz, mas a mesma depende da aplicação específica.

A bobina de indução pode ser fabricada com tubos de cobre, ou mais raramente peças, refrigerados geralmente por circulação de água no seu interior. Diversos fatores devem ser levados em consideração na escolha desta bobina, entre eles: (a) Forma e conseqüente campo magnético; (b) Número de espiras; (c) Espaçamento entre as espiras; (d) Distância entre as espiras e a superfície da peça no seu interior; (e) Existência de brusca alteração de seção na peça; (f) Frequência da corrente; (g) Potência do equipamento; (h) Interações com componentes metálicos próximos.

A **Fig. 17.9** ilustra algumas formas que as bobinas podem se apresentar, enquanto que a **Fig. 17.10** mostra os campos magnéticos produzidos e a distribuição térmica resultante.

□ Brasagem por Resistência Elétrica

Esse método emprega o calor gerado pela resistência elétrica à passagem de corrente, com o metal de adição (e o fluxo) pré-posicionado entre as peças, num sistema similar àquele apresentado no **Capítulo 11** (Soldagem por Resistência Elétrica). Entretanto, na brasagem são geralmente necessário mais longos tempos de circulação de corrente; menor pressão entre os eletrodos; mais altas tensões e menores intensidades de corrente. É possível, porém, adaptar tais equipamentos e, na realidade, esse é um procedimento comum.

Os eletrodos mais utilizados são aqueles tipo RWMA classe 2 (Cr-Cu) e os refratários RWMA classe 14 (Mo), além de várias combinações de carbono-grafita e grafita.

Na forma que caracteriza esse método, os eletrodos são construídos com materiais que apresentem alta resistência elétrica, tal como carbono; grafita; tungstênio; molibdênio e, mais raramente, aço.

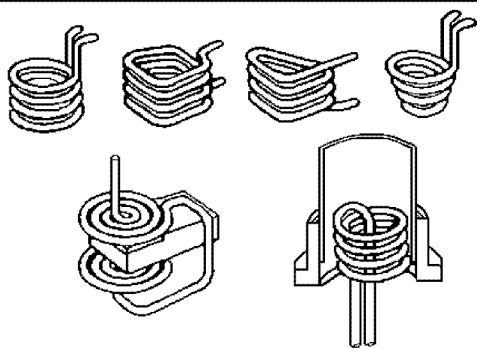


Figura 17.9 - Típicas Bobinas para Brasagem por Indução.

Nesse caso, o calor não é gerado nas interfaces das peças, entre as quais se encontra o metal de adição e o fluxo, mas sim nos próprios eletrodos, difundindo-se por condução até o metal de adição. Portanto, esse método é somente aparentemente similar à soldagem por resistência elétrica.

Com o propósito de utilizar os equipamentos já existentes para soldagem por resistência elétrica, é possível realizar a brasagem em algumas situações, através do aquecimento da interface das peças, com eletrodos de mais alta condutividade elétrica, como cobre-tungstênio sinterizado, ou mesmo molibdênio. A utilização de superfícies recobertas eletroliticamente facilita em muito esta operação, sendo o cobre e suas ligas normalmente recoberto com prata e o aço com zinco, além da possibilidade de realizar “sanduíches” entre esses materiais.

❑ Brasagem em Forno

Apesar de geralmente ser empregado para produção em série, através de alimentação contínua por correias transportadoras, esse método também encontra utilização na união de poucas, ou mesmo uma junta, que requer atmosfera especial. Para o emprego da brasagem em forno, é essencial que o metal de adição possa ser pré-posicionado na junta, sendo adicionado fluxo quando a atmosfera não substituir seu efeito.

O aquecimento pode ser por qualquer meio, desde que atenda as especificações estabelecidas, devendo o controle da temperatura (tipicamente ± 6 °C) ser preciso, bem como a distribuição do calor no interior do forno.

Foi discutido no item “Seleção do Fluxo ou Atmosfera” os aspectos relativos às atmosferas dos fornos, sendo que as mesmas estão resumidas na **Tab. 17.6**. Entretanto, certos metais exigem uma atmosfera de grande pureza e ponto de orvalho

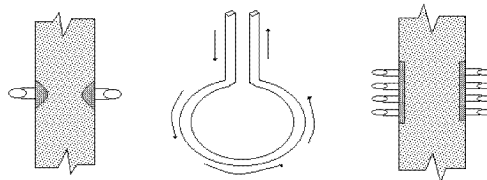


Figura 17.10 - Campos magnéticos e distribuição de calor produzido por bobinas.

extremamente baixo. Portanto, o vácuo é, provavelmente, um dos mais econômicos e efetivos ambientes disponíveis, eliminando a necessidade de fluxo e possibilitando a união de materiais que dificilmente poderiam ser brasados por outros meios, sendo os seguintes os principais equipamentos utilizados:

- Retorta quente, com a peça dentro da mesma, sendo o conjunto colocado no interior do forno. Dessa forma, é possível criar vácuo na retorta, a um baixo custo. Os problemas que geralmente ocorrem, dizem respeito à redução da resistência do material da parede da retorta com a temperatura, não sendo esse método normalmente empregado acima de 1150 °C.
- Retorta quente com parede dupla, similar ao anterior, mas possuindo isolamento térmico e vácuo (de 133 a 13,3 Pa) entre as paredes.
- Forno a vácuo com parede fria, no qual os elementos de aquecimento e isolamento se encontram no interior do mesmo, além da câmara ser resfriada por água. A temperatura de trabalho pode alcançar 2200 °C, num vácuo de até $1,33 \times 10^{-4}$ Pa.

Uma outra interessante técnica, é aquela que introduz um fluxo constante de gás com alta pureza na câmara evacuada. A redução da taxa de evaporação de um metal sendo brasado numa atmosfera inerte, pode ser descrita simplificada pela seguinte equação semi-empírica:

$$\frac{E_i}{E_v} = \frac{1}{1 + 0,012 \cdot P} \quad [17.13]$$

onde:

E_i = taxa de evaporação do metal, quando é introduzida atmosfera inerte ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$);

E_v = taxa de evaporação do metal, em alto vácuo ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$);

P = pressão da atmosfera de gás inerte (Pa).

Nessa aplicação, gases mais pesados, como argônio e nitrogênio, são mais efetivos do que hé-

lio na redução das impurezas da atmosfera. Além disso, quando utilizada uma adequada relação entre pressão e vazão do gás, a evaporação dos metais voláteis é minimizada.

❑ Brasagem por Energia Radiante

A utilização de ondas de luz de grande comprimento (infravermelha) e alta potência, concentradas numa região de interesse, é um efetivo método de brasagem. Geralmente, conjuntos de lâmpadas de quartzo com até 5 kW cada uma, são acoplados a refletores parabólicos, os quais podem direcionar a energia contornando as superfícies e juntas que serão brasadas. Temperaturas de trabalho de 1900 °C são alcançadas em menos de um segundo, sendo possível dispor cerca de 2700 °C por pequenos períodos de tempo (com a atual tecnologia). O controle dessa temperatura é realizado por sensores conectados a sistemas de retro-informação eletrônicos, os quais, além de regular a intensidade da mesma, movimentam os refletores, distribuindo a energia da forma desejada.

A vantagem deste método reside, essencialmente, na sua flexibilidade e facilidade do manejo de grandes e/ou complicadas estruturas, além do excelente controle da fonte de energia.

❑ Brasagem por Imersão

Talvez mais conhecido por sua denominação em inglês (“dip brazing”), nesse método a peça é submersa num banho fundido de sais; fluxo; ou metal, contido num cadinho aquecido, com o consumível previamente posicionado na junta. Instantes após essa operação, o metal de adição funde e preenche a folga por capilaridade. O conjunto é então retirado do banho, para que o metal de adição solidifique, estando realizada a união.

As vantagens desse processo são evidentes, pois o aquecimento ocorre uniformemente e numa alta taxa, minimizando a distorção, além do conjunto permanecer isolado da atmosfera ambi-

ente. Entretanto, as dimensões do cadinho limitam o tamanho da peça, além de ser necessário manter uma certa relação entre a massa da mesma e do material líquido, com a finalidade de assegurar o equilíbrio térmico.

A versão que utiliza metal fundido, é geralmente empregada na brasagem de pequenas peças, usualmente com cadinho de grafita aquecido externamente e o banho recoberto por uma camada de fluxo.

Sais, ou fluxos fundidos são utilizados em cadinhos metálicos, ou cerâmicos, aquecidos externamente por chama; resistência elétrica; ou, mais geralmente, pela passagem de corrente elétrica entre eletrodos submersos nesses banhos (quando os mesmos são condutores de eletricidade), pois dessa forma a temperatura é mais facilmente equalizada (cerca de ± 3 °C). Geralmente é empregado fluxo fundido na brasagem de materiais que formam óxidos muito estáveis. Os sais, por sua vez, são misturas que podem conter cianeto e cloretos, para temperaturas de até 950 °C, ou similares aos utilizados no tratamento térmico dos aços, quando a temperatura alcança até 1350 °C.

Uma operação completa da brasagem por imersão consiste das seguintes etapas:

- Limpeza e secagem das peças, o que pode ser realizado de diversas formas e, geralmente, com vários banhos;
- Aplicação do metal de adição/fluxo na forma de pasta;
- Secagem da pasta e pré-aquecimento da peça, geralmente em forno mufla;
- Imersão no banho fundido, cujo tempo deve ser estabelecido empiricamente e por período necessário para que o metal de adição funda e preencha a junta, geralmente se situando entre 20 segundos e 2 minutos;
- Retirada do excesso do material fundido, seguido de banhos para limpeza e, após, secagem (geralmente com jato de ar quente).

PROJETO E PROPRIEDADES MECÂNICAS DA JUNTA

A exemplo dos demais processos de união analisados nesse livro, somente uma inteligente combinação das diversas variáveis e mecanismos específicos de brasagem permite obter uma junta econômica e tecnicamente aceitável. Em geral, um procedimento de brasagem envolve as seguintes etapas:

- Dimensionamento e desenho completo da junta, incluindo tolerâncias.
- Projeto e construção do sistema de posicionamento da junta.
- Detalhes do material base, com especificações.
- Determinação da limpeza prévia que será efetuada.
- Estabelecimento do material de adição à ser utilizado, com especificações.
- Decisão sobre o método de brasagem que será empregado.
- Estabelecimento do fluxo e/ou atmosfera de brasagem, com especificações.
- Determinação da limpeza após a brasagem.
- Necessidade de tratamento térmico.
- Necessidade de Inspeção (Ensaio, etc.).
- Cuidados e precauções gerais a serem tomadas.

Foram analisados vários desses itens nas seções anteriores e, na realidade, muitos deles compõem o que genericamente se denomina “Projeto da Junta”. Entretanto, na brasagem a questão da limpeza do material base e do consumível, previamente e posteriormente à operação, assume enorme importância, não somente técnica mas, também, econômica. No exemplo a seguir apresentado para ligas de alumínio, deve ser observado que cada operação implica em instalações específicas, as quais geralmente exigem um relativamente alto investimento de capital:

□ Limpeza Prévia

- Banho com solvente e/ou vapor, seguido por um dos seguintes banhos:
 - Banho Cáustico: (a) Imersão em até 5% (massa) de hidróxido de sódio por 60s; (b) Lavagem em água fria; (c) Imersão em até 50% (volume) de ácido nítrico por 10s;
 - Banho Ácido: Imersão em 10% (volume) de ácido nítrico com 0,25% (volume) de ácido hidrófluorídrico, por 5 minutos.

- Lavagem em água quente, ou fria, seguido de secagem com jato de ar quente.

□ Limpeza Posterior

Banho de água quente, antes do componente resfriar completamente, com escovamento (fibra). Essa limpeza normalmente é suficiente quando a brasagem foi realizada por tocha. Para brasagem por imersão deve-se, ainda, aplicar na peça o banho ácido acima mencionado, ou imersão num banho com 1,5% (volume) de ácido hidrófluorídrico, por 2 a 5 minutos. Em qualquer caso, após a limpeza, a peça é seca com jato de ar quente.

No restante desse Capítulo, serão apresentados alguns dos princípios que regem o dimensionamento da junta e as previsíveis consequências sobre suas propriedades mecânicas.

A OPÇÃO PELA BRASAGEM

A brasagem não é, necessariamente, o melhor processo de união para qualquer caso. Entretanto, a mesma é insuperável em certas aplicações, por exemplo:

- Tipo dos materiais envolvidos, como cerâmicos e grafita, por exemplo.
- Interações e/ou transformações de fase indesejáveis, por exemplo em certas ligas de alumínio de alta resistência mecânica.
- Geometria e/ou espessura do material base, sendo que outro processo provocaria distorção.
- Possibilidade de união de materiais dissimilares, como ouro e grafita, por exemplo.

Como nos outros processos de união, a brasagem deve ser planejada quando o projeto da peça/estrutura estiver sendo realizado, sendo essencial que o projetista utilize conceitos diferentes daqueles de fundição e soldagem.

Após decidir qual será a sequência de montagem, é necessário estabelecer os tipos das junta que serão utilizadas e as posições de brasagem das mesmas, sendo interessante que exista uniformidade na terminologia, a qual é a seguir apresentada:

□ Posição de Brasagem

Uma nomenclatura largamente utilizada, é aquela proposta pela “The American Society of Mechanical Engineers - ASME”, Seção IX, a qual

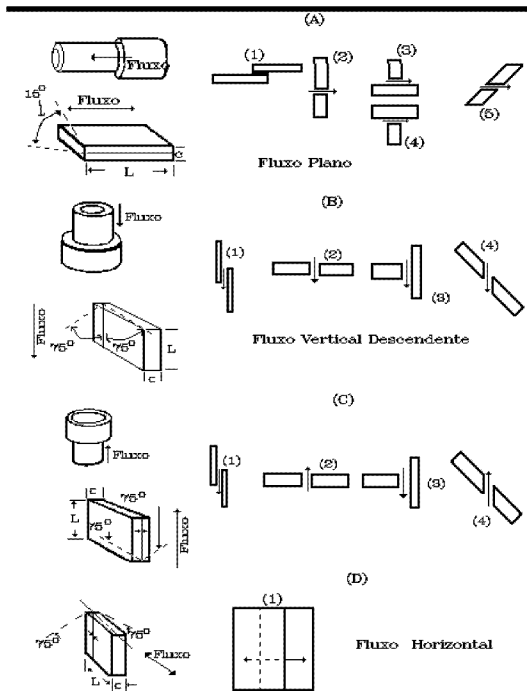


Figura 17.11 - Posições de Brasagem.

se encontra ilustrada na Fig. 17.11. Na mesma, a “posição de brasagem” é, na realidade, “o sentido de deslocamento do metal de adição fundido” para preenchimento da folga, sendo importante se observar na citada figura o máximo desvio angular permitido do plano especificado.

❑ Tipos de Juntas

A Fig. 17.12 mostra alguns exemplos de juntas mais utilizadas na brasagem, enquanto a Fig. 17.13 compara as mesmas com aquelas soldadas. Note-se que na brasagem é importante a consideração da área de contato entre as partes, e que juntas com sobreposição são amplamente empregadas.

❑ Volume do Metal de Adição

Uma regra geral, é que o metal de adição deve exceder em 25% o volume da folga na temperatura de brasagem. Geralmente não é necessário calcular volumes, mas sim áreas das seções transversais do consumível e da junta. Entretanto, testes sempre deverão ser realizados, com o excesso mencionado servindo somente como guia.

DIMENSIONAMENTO DA JUNTA

Nesta fase do projeto devem ser consideradas,

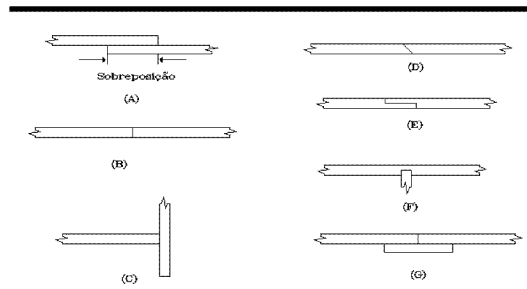


Figura 17.12 - Juntas Típicas para Brasagem.

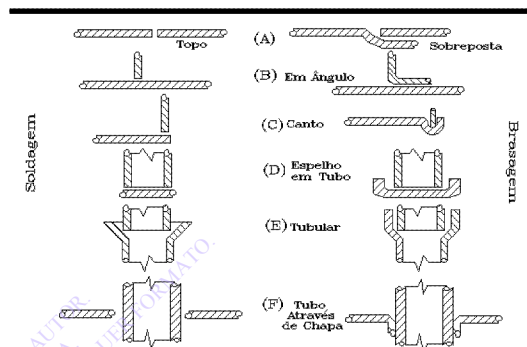


Figura 17.13 - Juntas para Soldagem e Brasagem (à direita).

inicialmente, as origens das possíveis concentrações de tensões na junta, as quais geralmente são devidas a dois fatores:

❑ Geometria da Junta

A junta poderá falhar prematuramente em serviço, por deformação, ou fadiga, devido a uma escolha equivocada de seu formato. Sugere-se aquelas geometrias apresentadas na Figs. 17.14 a 17.19, para aplicações que requerem desde baixa, até alta resistência. Esse fato aumenta de importância, quanto mais distintas forem as propriedades mecânicas dos metais de adição e base. Além disso, devem ser seguidas algumas regras fundamentais, tais como:

- Posicionar a junta na região do componente onde ocorrerá mínima tensão;
- Evitar que a borda da junta seja tensionada, ao mesmo tempo, em tração e flexão;
- Orientar a junta para que a mesma suporte compressão, cisalhamento puro e tração pura, nesta ordem de preferência;
- Principalmente em juntas submetidas a grande carregamento cíclico, ou impacto, desviar o esforço através da inserção de partes mecânicas

mente fixas à estrutura principal;

- Existem situações, em que uma espessura muito fina do metal de adição causa o desenvolvimento de alta tensão interna na solidificação. Um exemplo, é a brasagem de pastilhas de corte no suporte (bedame), sendo recomendável que esta dimensão se situe entre 0,2 e 0,4 mm;

- Em junta de filete, é melhor a distribuição das tensões de solidificação, se a superfície da mesma for lisa e côncava.

□ Tensões Térmicas

Quando os componentes são resfriados desde a temperatura de brasagem para a ambiente, se

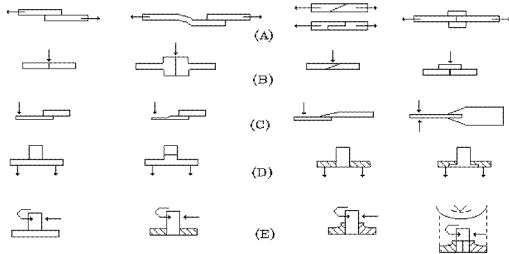


Figura 17.14 - Projetos de Brasagem Melhorados da Esquerda para a Direita (setas indicam o sentido da carga aplicada).

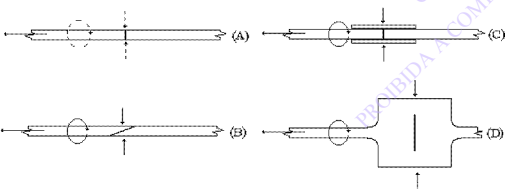


Figura 17.16 - Brasagem a Topo, com Baixa (a) e Alta (d) Resistência à Tensão e Carregamento Dinâmico.

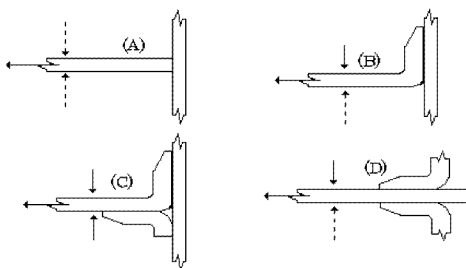


Figura 17.18 - Brasagem de Folhas. Maior Resistência aos Carregamentos Estático e Dinâmico de (a) para (d).

desenvolvem tensões internas nos mesmos. Esse fato é ainda mais importante nos seguintes casos: (a) Na união de materiais dissimilares, cujos coeficientes de expansão térmica são muito distintos; (b) Na união de materiais similares, mas que possuem massas bastante diferentes; (c) Em componentes que apresentam geometrias complicadas e/ou não uniforme.

Na união de componentes tubulares, por exemplo, com o aqueles mostrados na Fig. 17.13(e), e materiais similares, a configuração relativa das partes não é normalmente crítica e a folga pode ser considerada como o processo ocorrendo à temperatura ambiente. Entretanto, sendo os

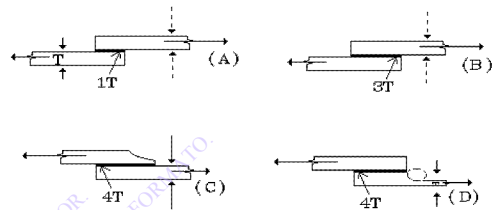


Figura 17.15 - Brasagem de Juntas com Sobreposição, com Baixa (a) e Alta (d) Resistência à Tensão.

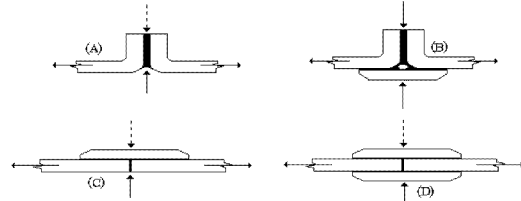


Figura 17.17 - Brasagem de chapas muito finas.

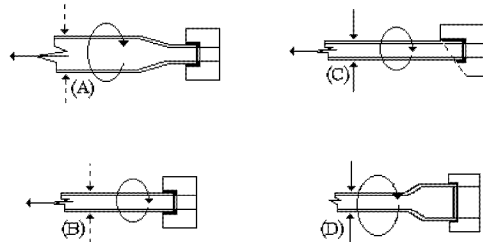


Figura 17.19 - Brasagem de Tubos e Conexões. A Resistência à Tensão Aumenta desde (a) para (d).

materiais dissimilares, deve-se considerar os coeficientes de expansão térmica dos mesmos. No exemplo desta figura - ou em anéis/buchas e similares - se o material com mais alto coeficiente de expansão térmica for o “macho” (ocupar a parte interna), a distância entre as paredes deve ser maior do que aquela prevista na temperatura ambiente, pois a mesma sofrerá redução naquela de brasagem. Nesse caso, a junta permanecerá tensionada em tração quando resfriar, não sendo a melhor solução de projeto. Sempre que possível, o material com menor coeficiente de expansão térmica

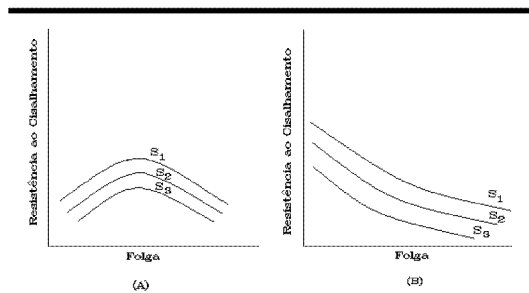


Figura 17.20 - Efeito da Folga e do Comprimento de Sobreposição (s3>s2>s1) na Brasagem, sobre a Resistência ao Cisalhamento de Juntas Empregando Fluxo (a) e Gás (b).



Figura 17.21 - Resistência à Tração da Junta obtida por Brasagem, em Função da Folga.

deve ser o macho. Dessa forma, há aumento da folga na temperatura de brasagem e, quando o conjunto resfria, ocorre contração e o metal de adição é comprimido, não sendo tensionado em tração, ou cisalhamento.

Logo a seguir será mostrada uma maneira simples de calcular esse aumento (ou redução) da folga, devido à diferença entre os coeficientes de expansão térmica dos materiais envolvidos na junta.

Portanto, o correto projeto de uma junta depende principalmente dos seguintes fatores: (a) Da

folga; (b) Da atmosfera, ou fluxo de brasagem; (c) Do comprimento de sobreposição (quando existir); (d) Da resistência à tração do material base.

Resultados obtidos empiricamente demonstraram as relações existentes entre os três primeiros itens citados, com a resistência ao cisalhamento e a resistência à tração da junta, conforme os comportamentos típicos esquematicamente ilustrados nas Figs. 17.20 e 17.21.

Dessa forma, o dimensionamento de uma junta pode se basear nas seguintes considerações:

□ **Comprimento de Sobreposição**

A resistência de uma junta sobreposta, como aquela mostrada na Fig. 17.13(a), por exemplo, não aumenta indiscriminadamente conforme é maior a área de contato entre os membros. Como regra geral, a máxima resistência é alcançada, quando o comprimento de sobreposição é 3 a 4 vezes a espessura do mais fino membro. Esse fato se deve à constatação, de que a tensão de cisalhamento é máxima no final da junta. Portanto, com uma sobreposição excessiva, a parte central da mesma não suporta nenhuma carga.

A avaliação mais precisa do comprimento de sobreposição (o qual também possui implicações econômicas) para um dado carregamento da junta, pode ser realizada através do seguinte simples cálculo:

▪ Para uma junta sobreposta, tal como a da Fig. 17.13(a), o comprimento de sobreposição (L) é dado por:

$$L = F \cdot \sigma \cdot e / \tau_b \quad (\text{mm}) \tag{17.14}$$

onde:

- F = fator de segurança empregado;
- σ = resistência a tração do membro mais fino (Pa);
- e = espessura do membro mais fino (mm);
- τ_b = resistência ao cisalhamento do metal de adição (Pa).

▪ O comprimento de sobreposição (L) para juntas entre tubos, tais como aquelas mostradas na Fig. 17.13(e), pode ser calculado da seguinte forma:

$$L = \frac{e \cdot (D - e) \cdot F \cdot \sigma}{\tau_b \cdot D} \quad (\text{mm}) \tag{17.15}$$

onde:

- e = espessura da parede do tubo menos espesso (mm);
- D = diâmetro externo do menor tubo (mm).

Tabela 17.7 - Resistência Mecânica de Juntas Unidas por Brasagem em Função do Comprimento de Sobreposição

Comprimento de Sobreposição (mm) *	Resistência à Tração (MPa)	Resistência ao Cisalhamento (MPa)
Ligas de Magnésio AZ31B e BMg-2a		
3,175 (=t)	69	69
6,35 (=2t)	90	41
12,7 (=4t)	110	34
19,05 (=6t)	166	28
Cobre Desoxidado e BCuP-3		
3,175 (=t)	172	172
6,35 (=2t)	207(máx.)	103
12,7 (=4t)	-	51

* Espessura do Metal Base = t = 3,175 mm

Como exemplo, considere-se os dados da **Tab. 17.7** de resistências à tração e cisalhamento em juntas sobrepostas, para ligas de magnésio e cobre desoxidado. Para a liga de magnésio, mesmo após o comprimento de sobreposição alcançar 6 vezes a espessura do componente brasado, a resistência à tração da junta continua aumentando. Para a liga de cobre, entretanto, após esse comprimento ser o dobro da espessura do componente, a resistência à tração alcançada é a máxima. Note-se, porém, que em ambos os casos a resistência ao cisalhamento sofre sensível redução com o aumento do comprimento de sobreposição, estando de acordo com a **Fig. 17.20**, pois a folga considerada pode ser maior do que aquela ótima, como na brasagem com fluxo da **Fig. 17.20(a)**, ou atmosfera gasosa ilustrada na **Fig. 17.20(b)**.

❑ Tamanho da Folga

Como exibido na **Fig. 17.21**, o tamanho da folga exerce grande influência sobre a resistência à tração da junta, sendo que outras variáveis, tais como o método utilizado e a temperatura de brasagem, também afetam esta propriedade mecânica.

Entretanto, o estabelecimento da folga ótima não é uma questão corriqueira, devendo ainda ser considerados os seguintes fatos:

- Além da resistência à tração da junta aumentar com a redução da folga até um valor ótimo, é normal que nesse ponto a mesma possua essa propriedade mecânica maior do que a do metal de adição. Para cada combinação de materiais, essa diferença é proporcional à razão entre os limites de escoamento dos metais base e de adição.

Isso ocorre, quando o metal base possui maior resistência à tração do que o de adição, caso da maioria das operações de brasagem. Sendo a junta carregada, a muito fina camada do metal de adição entre as duas partes do metal base não pode se deformar plasticamente, apesar de ter sido atingido seu limite de escoamento. O metal base impede esta deformação, pois ainda se encontra tensionado na região elástica e, conseqüentemente, o metal de adição é submetido à um tensionamento hidrostático (tri-axial), ocorrendo a ruptura somente por fratura frágil.

Em juntas a topo, é essa a explicação para o fenômeno, sendo similar para as sobrepostas, mas adicionalmente complicado pela introdução de mais uma variável, como visto, representada pela área da junta, a qual é determinada pelo comprimento de sobreposição.

- Como ilustrado na **Fig. 17.20**, a relação entre a folga e a resistência cisalhamento da junta, é alterada conforme se utiliza um fluxo mineral, ou atmosfera gasosa.

Quando o metal de adição funde, a capilaridade induz o mesmo à ocupar a folga, normalmente preenchida pelo fluxo. Duas situações extremas, então, podem ocorrer, ou seja: (a) A folga é muito pequena, com o metal de adição não conseguindo deslocar o fluxo, pois o mesmo se encontra fortemente aderida às paredes da junta; (b) A folga é excessivamente grande e o metal de adição flui em torno de porções do fluxo, sem deslocá-lo.

Dessa forma, ambos os casos provocam juntas com defeito, sendo esse o motivo da relação entre a folga e a resistência ao cisalhamento da junta apresentar um ponto máximo e, após, decrescer.

Tabela 17.8 - Folgas Recomendadas para Brasagem de Alguns Metais e suas Ligas

Metal de Adição	Folga (mm) para os Metais Base			
	Cobre	Ligas de Cobre	Ligas Ferrosas	Alumínio e suas Ligas
Ligas de Paládio; Ouro e Eutético Prata-Cobre	0,025 à 0,10	0,025 à 0,10	0,025 à 0,1	-
Cobre	-	-	0 à 0,075	-
Latões	0,075 à 0,375	0,075 à 0,375	0,05 à 0,25	-
Cobre-Fósforo	0,075 à 0,375	0,075 à 0,375	-	-
Prata-Cobre-Fósforo	0,05 à 0,30	0,05 à 0,30	-	-
Ligas de Prata	0,03 à 0,25	0,03 à 0,25	0,025 à 0,15	-
Ligas de Níquel	-	-	0,075 à 0,375	-
Ligas de Alumínio	-	-	-	0,125 à 0,6

A brasagem em atmosfera gasosa, por sua vez, pode (e deve) ser realizada com muito menor folga pois, desde que a mesma seja corretamente escolhida e apresente alta pureza, produzirá juntas com alta resistência mecânica. Na posição vertical, folga em excesso de 0,08 mm provocará deslocamento do metal de adição fundido para o exterior da junta.

O equacionamento da folga, em função das diversas variáveis envolvidas na brasagem, não foi satisfatoriamente resolvido até o momento (provavelmente devido à complexidade do problema) sendo que a **Tab. 17.8** apresenta algumas sugestões, para diferentes metais base e de adição. Por outro lado, deve ser percebido que folgas no limite inferior podem resultar satisfatórias em testes sob condições controladas, mas impossíveis de ser mantidas na produção.

A influência da folga em juntas brasadas a topo, pode ser exemplificada pelos seguintes dados: (a) Na união de aços inoxidáveis austeníticos, utilizando prata como metal de adição, a resistência à tração é de 930 MPa com folga de 0,038 mm, e de 680 MPa com 0,114 mm; (b) Juntas de aço ao carbono, com metal de adição de prata, apresentam resistência à tração de 412 MPa com folga de 0,032 mm e 284 MPa com 0,191mm; (c) Juntas nesse mesmo aço ao carbono, utilizando cobre como metal de adição, possuem resistência à tração de 412 MPa com folga de 0,032 mm, mas

de 324 MPa se a mesma for 0,191 mm.

Resta, ainda, examinar a situação do dimensionamento da folga para a junta de materiais dissimilares. Como mencionado, os diferentes coeficientes de expansão térmica podem provocar tensões na junta, principalmente na união de tubos e em anéis/buchas, ou outros arranjos do mesmo tipo, conforme mostrado na **Fig. 17.13(e)**. É possível estimar qual será a folga na temperatura de brasagem, conhecendo os coeficientes médios de expansão térmica dos materiais envolvidos, alguns dos quais são apresentados na **Tab. 17.9**. Os mesmos podem ser aplicados na seguinte equação, a qual permite calcular a variação desta folga (ΔF) provocada pelo aquecimento, ou seja:

$$\Delta F = D \cdot \Delta T \cdot (\alpha_2 - \alpha_1) \quad (\text{mm}) \quad [17.16]$$

onde:

D = diâmetro nominal da junta (mm);

ΔT = diferença entre a temperatura de brasagem e a ambiente (K);

α_1, α_2 = coeficientes médios de expansão térmica dos tubos macho e fêmea, respectivamente (1/K).

Sendo negativo o resultado da equação 17.16, o número obtido é o valor absoluto da redução da folga com o aquecimento. Caso contrário, o número positivo indica o aumento desta folga na temperatura de brasagem.

Tabela 17.9 - Coeficientes Médios Aproximados de Expansão Térmica de Alguns Metais e Cerâmicos

Metais	Coeficiente Médio de Expansão Térmica ($K^{-1} \times 10^{-6}$)	Cerâmicos	Coeficiente Médio de Expansão Térmica ($K^{-1} \times 10^{-6}$)
Aço ao Carbono	14,2	AlN	5,4
Aço Inoxidável	18,7	Al ₂ O ₃	9,5
Alumínio	26,0	MgO	15,7
Cobre	18,5	SiC	5,0
Molibdênio	5,9	Si ₃ N ₄	3,8
Nióbio	8,3	SiO ₂ (fundido)	1,5
Níquel	13,4	TiC	9,6
Titânio	11,1	TiN	8,7
Tungstênio	4,0	TiO ₂	9,9
		ZrO ₂ (cúbica)	14,2

CÓPIA AUTORIZADA PELO AUTOR.
DISTRIBUIÇÃO GRATUITA.
PROIBIDA A COMERCIALIZAÇÃO EM QUALQUER FORMATO.

**C
A
P
Í
T
U
L
O

18**

PULVERIZAÇÃO TÉRMICA

INTRODUÇÃO	362
MÉTODOS DE PULVERIZAÇÃO TÉRMICA	364
PREPARAÇÃO DO SUBSTRATO	367
MATERIAIS E APLICAÇÕES	369

COPIA REPRODUZIDA PELO AUTOR
PROIBIDA A COMERCIALIZAÇÃO EM QUALQUER FORMATO
DISTRIBUIÇÃO GRATUITA

INTRODUÇÃO

É antiga a idéia de recobrir a superfície de peças, geralmente com o objetivo de protegê-las, ou alterar suas propriedades. Em 1882 na Alemanha, já era utilizado chumbo fundido vazado sobre um jato de ar lançado contra chapas metálicas, com a finalidade de produzir acumuladores. Entretanto, esse método e outros similares, que utilizavam o metal previamente fundido, apresentavam diversos problemas.

Ao suíço M. U. Schoop é geralmente atribuído o mérito de ter sido o precursor, em 1911, da atual configuração do processo de Pulverização Térmica, o que permitiu seu posterior emprego industrial. Realizando experiências com um pequeno canhão e projéteis de chumbo, Schoop percebeu que a qualidade do revestimento também estava relacionada com a energia cinética da partícula e que existia uma velocidade limite para a mesma, acima da qual a união não se realizava, ou era precária. Entretanto, talvez sua maior contribuição tenha sido a demonstração de que é possível lançar metal pulverizado através da chama produzida numa tocha e levar o mesmo ao estado pastoso (semi-fundido), dessa forma realizando um perfeito revestimento.

O processo de Pulverização Térmica, tal como hoje é concebido, compõe-se por um grupo de métodos, os quais possibilitam a deposição sobre um substrato de uma relativamente fina camada de material metálico, ou não-metálico, aderindo ao mesmo nas seguintes formas: (a) Metalúrgica; (b) Mecânica; (c) Química; (d) Combinação desses mecanismos.

É importante ser salientado, que o substrato não funde. Aliás, raramente sua temperatura ultrapassa cerca de 200 °C, inexistindo em geral necessidade do mesmo possuir completa compatibilidade metalúrgica com o revestimento.

O material que formará esse depósito pode apresentar as seguintes formas: (a) Pó; (b) Tubo de plástico contendo pó no seu interior; (c) Vareta cerâmica; (d) Arame. Por sua vez, entre os principais meios de aquecimento, são encontrados os seguintes: (a) Chama; (b) Arco elétrico; (c) Plasma; (d) Detonação. Então, o material é lançado pulverizado contra a superfície de interesse, no estado fundido, ou semi-fundido, resfriando-se numa muito alta taxa após o choque.

Diversos tipos de materiais podem ser utilizados com os diferentes métodos de pulverização térmica, entre os mesmos encontrando-se: quase todos os metais e suas ligas; muitos cerâmicos;

óxidos e plásticos orgânicos.

Por outro lado, os revestimentos são realizados geralmente visando uma das seguintes finalidades: (a) Estética, devido a cor e/ou textura; (b) Restaurar certas dimensões de um componente que sofreu desgaste; (c) Proteger regiões específicas de um componente (novo, ou já utilizado) para resistir a um dado tipo de desgaste; (d) Recuperar dimensões de um componente que foi erradamente usinado.

Como em qualquer processo no qual ocorre íntima união entre materiais, a superfície que será revestida deverá estar perfeitamente limpa, isenta de óxidos e devidamente preparada, com as técnicas de aplicação dividindo-se entre as seguintes: (a) O revestimento protetor é aplicado diretamente sobre a superfície, sendo necessário, nesse caso, que a mesma possua uma relativamente grande rugosidade, para facilitar sua fixação (“ancoramento”); (b) O revestimento, após ter sido aplicado, é refundido (usualmente com uma tocha) com a superfície sendo menos grosseira que na situação anterior; (c) É aplicado um pré-revestimento, cujo principal objetivo reside em melhorar o ancoramento do revestimento final.

A **Fig. 18.1** apresenta as 4 principais fases que ocorrem na realização do revestimento, as quais são: (a) As partículas se encontram em pleno vôo, com a típica geometria da gota d’água, pois as mesmas estão no estado pastoso; (b) Momento da colisão da partículas com o substrato, sendo importante a velocidade das mesmas e a rugosidade da base sobre a qualidade do depósito; (c) Há transferência de calor entre as partículas e a base; (d) Seção transversal do depósito. Note-se, que devido ao choque contra a superfície, as partículas se deformam plasticamente, formando finas lamelas, as quais são sucessivamente empilhadas, podendo existir entre as mesmas inclusões de óxidos e/ou vazios.

Na realidade, a qualidade do depósito é função do método; materiais envolvidos e condições gerais em que a pulverização térmica foi efetuada. Por exemplo, a **Fig. 18.2** ilustra esquematicamente a aplicação do revestimento, o qual atingirá uma região circular, ou oval da superfície, formando uma camada de espessura irregular. Nas bordas, esse revestimento será fino e com tendência à formar uma união de baixa qualidade (geralmente com poros e óxidos), ocorrendo o contrário no centro. Isso é resultado de que, para alcançar a periferia, uma partícula necessita percorrer um mais longo cami-

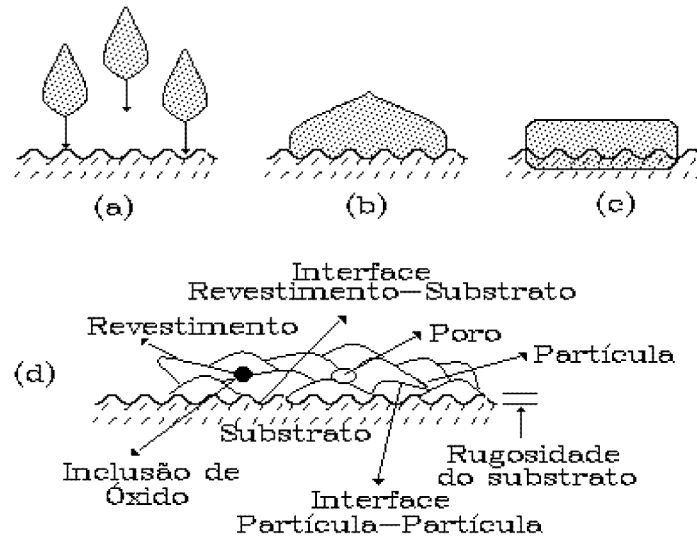


Figura 18.1-Etapas no processo de revestimento por pulverização térmica.

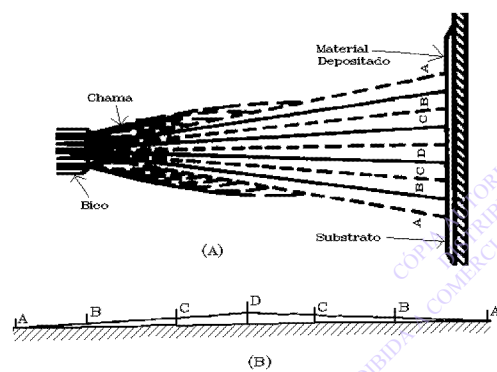


Figura 18.2 - (a) Pulverização Térmica (Chama); (b) Variação da Espessura Depositada.

nho do que outra que se choca contra o centro da região alvo. Como consequência, essa partícula perde velocidade e têm sua temperatura reduzida.

Além disso, as seguintes variáveis são importantes, pois combinadas entre si e com os fatores acima descritos, determinam a qualidade final do revestimento efetuado:

❑ Tamanho das partículas

Apesar das partículas menores serem aquecidas mais rapidamente do que as maiores, num meio com constante quantidade de calor, uma excessiva proporção de material muito finamente dividido é de difícil ejeção, além de oxidar muito rapidamente. Outrossim, para uma mesma velocidade do gás de transporte, pode não ser suficiente a energia cinética

adquirida pelas pequenas partículas.

❑ Densidade do Depósito

É diretamente proporcional à temperatura da fonte de calor e velocidade de deslocamento da partícula.

❑ Rugosidade da Superfície

Como visto, a mesma deve ser compatível com a técnica empregada. Outrossim, as características do substrato e do revestimento, além do método de pulverização, são fatores importantes e analisados mais adiante.

❑ Tempo de Residência da Partícula

Essa expressão designa o tempo que a partícula é aquecida, sendo determinado pelos seguintes fatores: (a) Calor latente de fusão da partícula; (b) Diâmetro médio da partícula; (c) Densidade da partícula; (d) Velocidade do gás de arraste; (e) Energia de aquecimento; (f) Distância de pulverização. Em geral, a degradação da partícula é diretamente proporcional a esse tempo, à menos que o gás empregado seja inerte.

Apesar desse processo ser excelente para certos casos que exigem revestimentos protetores, o mesmo não é uma panacéia geral, que se utiliza em todas as situações e resolve qualquer problema de desgaste, sendo desaconselhado seu uso, por exemplo, em aplicações que requeiram resistência ao impacto, ou líquidos altamente corrosivos.

MÉTODOS DE PULVERIZAÇÃO TÉRMICA

A seleção do método de pulverização térmica para uma dada aplicação depende, principalmente, do material que será depositado e da qualidade desejada para o revestimento. Deve-se recordar que a temperatura da chama oxiacetilênica é cerca de 3100 °C, enquanto o arco elétrico e plasma alcançam 8000 °C e 25.000 °C, ou mais, respectivamente. Por sua vez, a velocidade de impacto das partículas pode variar num intervalo bastante grande, desde em torno de 80 m.s⁻¹ para o método a chama com pó, até cerca de 1000 m.s⁻¹ no de combustão contínua. A combinação dessas duas variáveis influe decisivamente sobre o método que será adotado.

Como em todos os outros processos, as medidas de segurança devem ser sempre observadas, incluindo os filtros de proteção para os olhos, conforme descrito no **Anexo 02**.

Portanto, não somente as características do material que será depositado são importantes mas, também, os métodos disponíveis para realizar tal operação, os quais são os seguintes:

□ Pulverização por Chama

Nesse caso, a velocidade de deslocamento das partículas é geralmente subsônica, com o calor necessário para o aquecimento dos consumíveis obtido desde a combustão na tocha, de combinações do oxigênio com um dos seguintes gases: propileno; acetileno; propano; gás natural; hidrogênio; mistura estabilizada de metilacetileno com propadieno (MAP). Entre esses gases combustíveis, cujas características foram apresentadas no **Capítulo 16 - Soldagem por Oxigás**, o acetileno se destaca e é o mais empregado.

A **Fig. 18.3** mostra uma instalação típica para este método, a qual é composta por: (a) Ci-

lindros de oxigênio e gás combustível, com manômetros para regulagem da pressão de trabalho; (b) Rotâmetros (fluxômetros) para estabelecimento da vazão destes gases; (c) Compressor de ar comprimido, além de filtragem e desumidificação, quando o mesmo for utilizado (veja mais abaixo); (d) Tocha para a pulverização térmica.

Então, esse método possui as seguintes variantes, em função da forma do consumível:

▪ Arames ou Varetas

A **Fig. 18.4** apresenta esquematicamente a tocha utilizada, sendo que um componente importante do equipamento auxiliar, é o sistema de alimentação do arame/vareta. O arame é alimentado coaxialmente com o bocal da chama, a qual tem somente a função de fundir o consumível, com a pulverização realizada por ar comprimido, ou um gás inerte em certas aplicações. O emprego desse método geralmente é sobre estruturas relativamente grandes, tais como tanques de água e pontes, com alumínio e zinco.

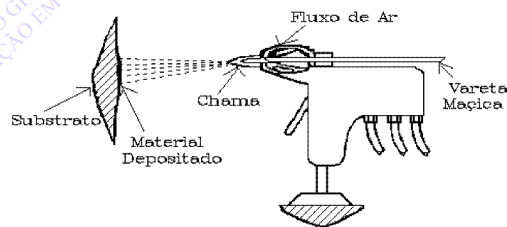


Figura 18.4 - Pulverização Térmica por Chama, com Vareta como Material de Adição.

Outros consumíveis também são mais raramente empregados, como na proteção ao desgaste com bronzes e aços baixa liga; aços ao carbono e molibdênio em enchimentos e aços inoxi-

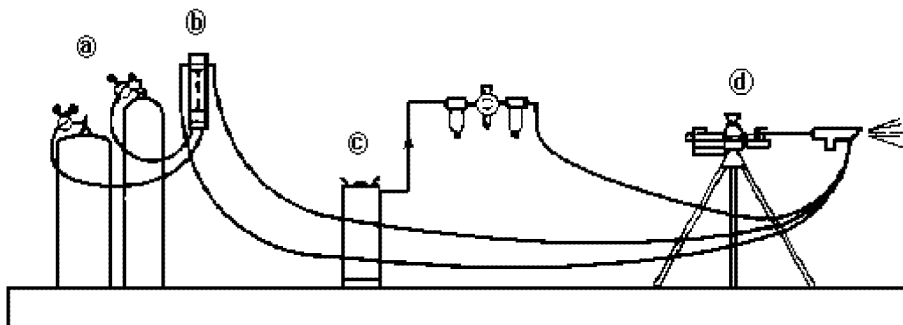


Figura 18.3 - Equipamento Básico para Pulverização por Chama.

dáveis para proteção à corrosão.

A tocha deve ser constantemente oscilada, manualmente, ou por algum meio mecânico, sendo a área atingida entre 45 e 80 cm².

A superfície geralmente é preparada com jato abrasivo, mas sulcos usinados são utilizados para depósitos mais espessos. Aliás, a camada depositada normalmente se situa entre 0,75 e 1,25 mm para resistência ao desgaste e enchimento, ou tão fina quanto 0,025 mm, quando o propósito do depósito é resistência à corrosão. Outrossim, a taxa de deposição é alta, conforme mostrado na **Tab. 18.1**.

Tabela 18.1 - Taxa de Deposição na Pulverização Térmica por Chama com Arame, para Diferentes Materiais

Material do Arame	Taxa de Deposição (g.h ⁻¹ .A ⁻¹)	Material do Arame	Taxa de Deposição (g.h ⁻¹ .A ⁻¹)
Alumínio	23 a 32	Aços ao Carbono	45 a 63
Aços Inoxidáveis	50 a 59	Bronze	45 a 54
Cobre	54 a 68	Latão	45 a 54
Monel	50 a 59	Níquel	41 a 50
Zinco	91 a 113		

▪ Pós

A simples modificação de uma tocha para soldagem oxigás, pode permitir a pulverização por pó, como mostrado na **Fig. 18.5**, em que esse consumível é introduzido no jato do gás combustível somente devido à gravidade e por ação de um sifão. A pulverização é geralmente realizada sem auxílio de ar comprimido, sendo pequena a taxa de deposição e grande a porosidade do depósito. Essa tocha é de baixo custo, sendo uma opção para materiais que podem ser refundidos após terem sido depositados.

Tochas mais eficientes, com maior temperatura de chama e velocidade da partícula, como a ilustrada na **Fig. 18.6**, são utilizadas em diversas aplicações, com metais; cerâmicos e misturas dos mesmos; além de compostos e carbonetos. O pó é alimentado através de vibração do recipiente que o contém, além de aspiração por gás. A taxa de deposição é maior do que no caso anterior. Apesar de representar um avanço em relação à tocha adaptada, o depósito ainda não apresenta a alta qualidade daqueles que serão vistos mais adiante pois, por exemplo, as partículas cerâmicas geralmente fundem somente na superfície e há oxidação dos metais. Dessa forma, é usual o emprego de compostos com silício e boro, que agem como fluxo e minimizam

▪ Cerâmicos: Vareta Maciça, ou Tubo Plástico

Para tubos de material plástico preenchidos em seu interior com cerâmicos, a instalação é similar àquela acima descrita para arame.

Certas aplicações requerem, entretanto, varetas maciças de cerâmicos, podendo a tocha ser do tipo daquela ilustrada na **Fig. 18.4**, com melhor controle da temperatura e alimentação do consumível. Os cerâmicos mais empregados são alumina; alumina-titânia; zircônia; óxido de cromo e misturas de outros tipos. Esta tocha permite que a partícula alcance velocidades de até 180 m.s⁻¹.

a degradação do pó.

Outrossim, muitas aplicações requerem que o depósito seja refundido acima de 1000 °C após sua deposição, para aumentar a qualidade do revestimento e sua adesão ao substrato.

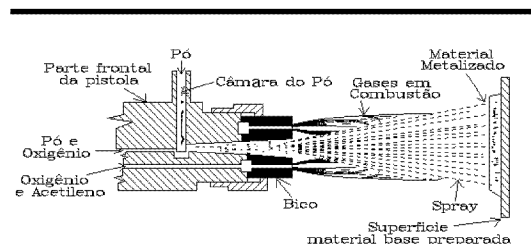


Figura 18.6-Tocha de alta eficiência para Pulverização Térmica com pó.

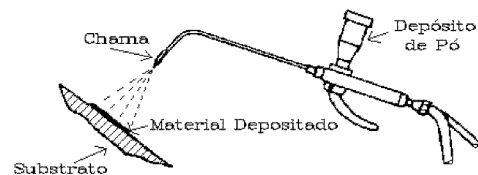


Figura 18.5 - Tocha Convencional Utilizada para a Pulverização por Chama.

❑ Pulverização por Detonação

Apesar de existir há cerca de 35 anos, esse método talvez não seja tão popular devido ao seu relativamente complexo mecanismo e ambiente especial que necessita para operar. A **Fig. 18.7** mostra esquematicamente o sistema empregado, sendo o pó alimentado no canhão através de nitrogênio em baixa pressão. A seguir, uma mistura explosiva de oxigênio e acetileno é introduzida nesse canhão, sendo detonada (pela faísca de uma vela de ignição, por exemplo) e, logo após, um jato de nitrogênio expelle restos que tenham permanecido no interior do mesmo. Este ciclo se repete cerca de 6 a 8 vezes por segundo, com a temperatura de detonação alcançando até 3900 °C e as partículas sendo lançadas com velocidades que atingem 800 m.s⁻¹. Como consequência, o depósito assim obtido é de altíssima densidade; há grande adesão ao substrato e excelente acabamento superficial. O diâmetro médio das partículas se situa em torno de 0,06 mm; a área atingida é cerca de 5 cm²; com espessura de alguns micrometros em cada detonação e final entre 0,05 e 0,5 mm. Como a intensidade do som produzido pela detonação pode alcançar até 150 decibéis, o equipamento deve operar por controle remoto numa sala onde as paredes possuam isolamento acústico. Este é considerado o método que produz o revestimento de mais alta qualidade entre todos, sendo possível pulverizar qualquer material com o mesmo.

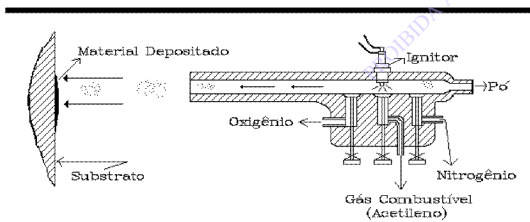


Figura 18.7 - Pulverização Térmica por Detonação.

❑ Pulverização por Combustão Contínua

Esse método foi desenvolvido em 1981 para competir com o de Detonação visto acima. A **Fig. 18.8** apresenta os principais aspectos da tocha, a qual é refrigerada. O recipiente do pó opera em leito fluidizado, com o gás de arraste normalmente nitrogênio, sendo que após a introdução do consumível na câmara, a mistura combustível (geralmente oxigênio com hidrogênio, ou propileno) se encarrega de aquecê-lo e transportá-lo até o substrato. Essa tocha utiliza os princípios da câmara de combustão de um foguete, com a mistura com-

combustível queimada em confinamento e os gases produzidos alcançando velocidades tão altas quanto 1000 m.s⁻¹ e temperaturas da ordem de 3000 °C. Na pulverização por combustão contínua, os consumíveis são os mesmos empregados naquela por Detonação, sendo que o depósito atinge uma área com cerca de 5 cm² por aplicação e a taxa de deposição alcança até 45 kg.h⁻¹. Um inconveniente desse método é o alto consumo da mistura combustível, com a vazão de oxigênio atingindo até 28 m³.h⁻¹.

❑ Pulverização por Arco Elétrico

Arares alimentados desde bobinas distintas formam um arco elétrico entre si, com um jato de ar comprimido, ou outro gás, pulverizando o material fundido, conforme ilustrado na **Fig. 18.9**.

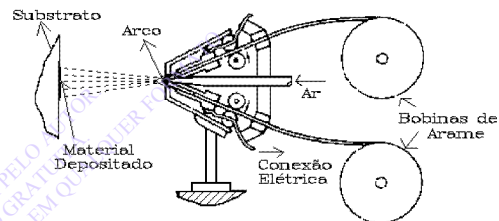


Figura 18.9 - Pulverização Térmica a Arco Elétrico.

Os consumíveis, com diâmetros de até 1,5 mm, mas também de seção retangular para aumentar a taxa de deposição, são geralmente conectados a uma fonte de potência com curva característica tensão constante e corrente contínua. A tensão de trabalho se situa entre 18 e 40 V, com o arame conectado ao pólo negativo sendo aquecido a uma mais alta temperatura do que o positivo fundindo, portanto, numa maior taxa e projetando partículas muito menores do que este último. Para revestimento de relativamente grandes estruturas, tais como pontes, os materiais geralmente empregados são alumínio e zinco, com o propósito de protegê-las da corrosão atmosférica. O revestimen-

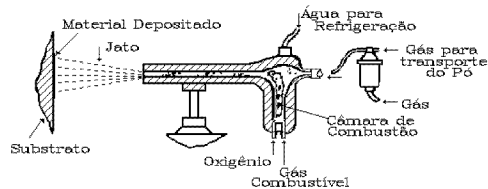


Figura 18.8 - Pulverização Térmica por Combustão Contínua.

to é de boa qualidade, com o depósito ocorrendo numa taxa de até 45 kg.h⁻¹.

□ Pulverização por Plasma

A pulverização por plasma foi desenvolvida à partir de exigências apresentadas pela indústria aeroespacial, quando revestimentos de alta qualidade com certos carbonetos e óxidos se tornaram necessários sobre turbinas e motores de foguetes.

Os princípios de funcionamento do plasma aplicado neste método, foram descritos no **Capítulo 9** (Soldagem a Arco Plasma). A **Fig. 18.10** mostra a tocha, com as modificações necessárias para a aplicação do consumível em pó. A fonte de potência, com curva característica corrente constante e operando em corrente contínua, é similar àquela para soldagem, devendo possuir muito boa estabilidade e total controle dos parâmetros. O modo empregado na produção do plasma é não transferido, ou seja, o arco é formado entre o eletrodo (negativo), geralmente de tungstênio, e o bocal de cobre refrigerado por água. O intervalo usual de corrente se situa entre 100 e 1000 A, com potências desde 40 a 100 kW e diâmetro médio das partículas do pó entre 0,02 e 0,1 mm.

O gás de arraste do pó geralmente é o mes-

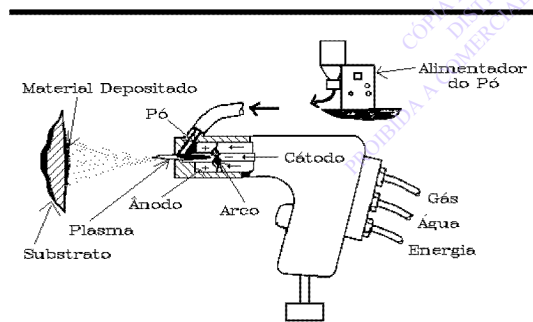


Figura 18.10 - Pulverização Térmica por Plasma.

mo do primário, ou aquele que forma o plasma, sendo necessário, também, um outro, de proteção, ou secundário. Os gases geralmente preferidos são os seguintes: (a) Nitrogênio, como gás plasma, é de baixo custo e, sendo diatômico, gera elevada quantidade de calor, provocando alta taxa de deposição, mas reduzindo a vida do bocal; (b) Argônio, também utilizado como gás plasma, forma um jato de alta velocidade, sendo geralmente selecionado para aplicações de carbonetos e materiais refratários; (c) Hélio, empregado como gás secundário geralmente misturado com argônio, aumenta a tensão e a quantidade de calor do plasma, sendo utilizado principalmente com titânio; (d) Hidrogênio, como gás secundário misturado na proporção de 5 a 25% com nitrogênio, ou argônio, aumenta a tensão e a quantidade de calor, não devendo ser empregado em metais que no estado líquido o absorvem.

Por sua vez, a qualidade do depósito é controlada pelos seguintes fatores principais: (a) Distância do bocal ao substrato; (b) Tipo de diâmetro médio do pó; (c) Local de introdução do pó; (d) Corrente e tensão; (e) Tipo dos gases empregados e vazão do pó.

Também é possível realizar a pulverização térmica em câmara com atmosfera controlada, ocorrendo notável redução da oxidação e porosidade do revestimento. Entretanto, deve ser analisada a real necessidade desse equipamento, pois é relativamente grande o investimento de capital.

Por outro lado, algumas vezes o Plasma com Arco Transferido ("PTA - Plasma Transferred Arc") com metal de adição em pó, é incluído entre os métodos de Pulverização Térmica. Na realidade, esse é um processo de soldagem, utilizado essencialmente para revestimento de superfícies, com fusão e conseqüente diluição do metal base. Suas características, portanto, diferem essencialmente do conceito em pauta.

PREPARAÇÃO DO SUBSTRATO

Uma das mais críticas operações na Pulverização Térmica, é a obtenção de adequado acabamento na superfície sobre a qual será aplicado o revestimento.

Como em todas as operações dessa natureza, a limpeza é fundamental, podendo ser realizada com vapor d'água e/ou ácidos. Certos materiais, como ferros fundidos, podem conter óleo e devem ser aquecidos em torno de 300 °C por algumas horas

para retirada deste produto.

Após limpo, o substrato necessita possuir uma correta rugosidade, cujo principal objetivo é ancorar devidamente o revestimento final. Os métodos empregados, individualmente, ou combinados, são geralmente de três tipos, ou seja: (a) Abrasão por impacto (jateamento) de partículas duras; (b) Macro-rugosidade (usinagem); (c) Aplicação de um pré-revestimento de ligação especial.

A seguir serão analisados os aspectos mais importantes desses métodos.

□ Jateamento Abrasivo

Esse é o método mais empregado e consiste na projeção em alta velocidade contra a superfície de interesse, de partículas com reduzidas dimensões arrastadas por ar comprimido. Os materiais utilizados no jateamento de superfícies que sofrerão pulverização térmica, geralmente são ferro fundido branco e óxido de alumínio, com esse último encontrando mais amplo uso, entre outras razões, porque produz menores tensões no material base. Areia não deve ser empregada, pois a sílica tende a permanecer presa no substrato, prejudicando a operação posterior. Além disso, as partículas não devem ser arredondadas, ou esféricas, mas sim angulares e pontiagudas.

São fatores decisivos para a obtenção da superfície com a rugosidade desejada, o tipo e diâmetro médio das partículas, além da combinação das condições em que o jateamento será realizado. Nas **Figs. 18.11** e **18.12** estão representados alguns princípios simples, mas nem sempre lembrados, na operação de jateamento abrasivo.

Considerando as demais condições mantidas constantes, têm-se:

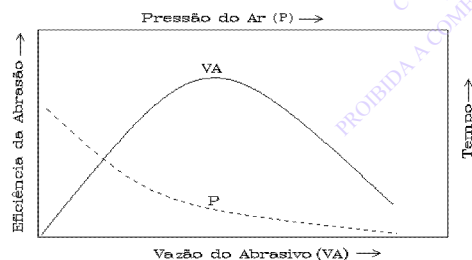


Figura 18.11 - Influência da Pressão e da Vazão do Ar, sobre a Eficiência e Tempo do Jateamento por Abrasivo.

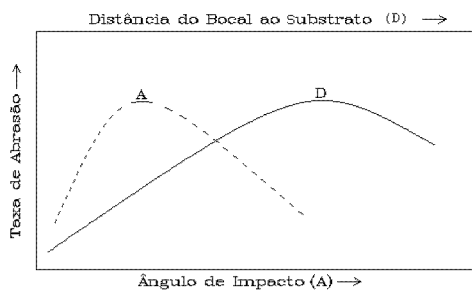


Figura 18.12 - Influência do Ângulo de Impacto das Partículas e Distância do Bocal, sobre a Taxa de Abrasão.

- Existe uma ótima vazão do abrasivo, para a qual a eficiência da abrasão é máxima. Vazões menores, ou maiores do que esta, diminuem essa eficiência;

- Dentro dos limites usuais, quanto maior a pressão do ar comprimido, menor o tempo necessário para obter a rugosidade desejada no substrato;

- Há um ótimo ângulo que o bocal de jateamento deve se posicionar em relação à superfície, para máxima taxa de abrasão. Ângulos menores, ou maiores do que esse diminuem essa taxa;

- Até um certo limite, o aumento da distância do bocal de jateamento ao substrato, provoca maior taxa de abrasão;

Por outro lado, apesar dos equipamentos disponíveis comercialmente serem bastante distintos, as seguintes condições e eficiência de jateamento com os materiais citados são típicas:

- Pressão de operação entre 200 e 600 kPa.

- Ângulo do bocal em relação à peça entre 75 e 90°.

- Distância do bocal à superfície entre 100 e 300 mm.

- Área média jateada por quilo de abrasivo: 130 cm² para o óxido de alumínio e 85 cm² para o ferro fundido branco.

- Número médio de vezes que o material pode ser reciclado: 10 para o óxido de alumínio e 15 para o ferro fundido branco.

Outrossim, o tamanho dessas partículas depende do tipo e dureza do material base, além da rugosidade que será produzida, a qual usualmente é medida através do desvio da linha central da Média Aritmética - MA dos picos e vales na superfície. Portanto, as seguintes recomendações iniciais de rugosidade da superfície e tamanho do abrasivo podem ser seguidas:

- Material base e/ou depósito muito finos: rugosidade 1,3 mm MA e abrasivo de pequena granulometria, ou 25x120.

- Materiais base metálicos em geral: rugosidade entre 2,5 e 13 mm MA e abrasivo de granulometria 16x60.

- Materiais plásticos em geral e metais de muito baixa dureza, como zinco: rugosidade 6 mm MA e abrasivo de granulometria 60x100.

- Revestimentos espessos (maior do que 0,25 mm) e/ou necessidade de grande aderência:

rugosidade de até 10 mm MA, pois superfícies mais grosseiras diminuirão esta propriedade, e abrasivo de grande granulometria, ou 18x25.

□ Macro-Rugosidade

Essa é uma operação normalmente realizada através de usinagem, ou retífica, com os seguintes propósitos:

- Rebaixamento da superfície: uniformizar a espessura do depósito que será aplicado, ou retirar uma camada do substrato, que de alguma forma impedirá uma ligação de boa qualidade.
- Modelagem: promoção de suave transição entre seções de diferentes espessuras. Isso pode ser feito somente por usinagem do substrato, ou através da deposição de sobre-metal, geralmente por soldagem, o qual é posteriormente usinado, conforme ilustrado na **Fig. 18.13**. Essa figura ilustra o revestimento (área hachurada) de um eixo, sendo: (a) Modo incorreto; (b) Opção correta, quando for somente essa a região à ser protegida; (c) Modo correto, com sobre-metal geralmente depositado por solda e usinado na transição entre o eixo e a base.

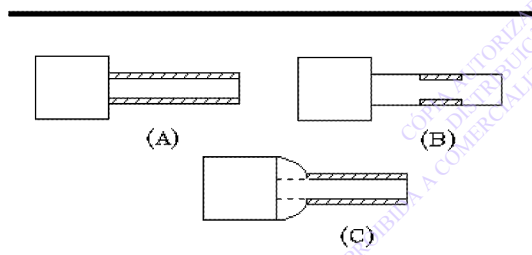


Figura 18.13 - Exemplos de Aplicação Correta e Incorreta do Revestimento sobre um Eixo (vide texto).

- Sulcos na superfície: aumentam a área de contato, melhorando a ligação e distribuem as tensões internas desenvolvidas pelo revestimento, principalmente naqueles cerâmicos; de alta dureza; ou muito espessos. Preferencialmente, o perfil desses sulcos deve ser em “U”, pois a concentração de tensões é menor do que naquele em “V”. Como regra geral, a superfície deve ser assim preparada se: (a) A espessura do revestimento ultrapassar 1,3 mm e existir alguma quina na mesma; (b) O material do revestimento apresentar alta contração no resfriamento e sua espessura for maior do que cerca de 0,8 mm; (c) Para aplicações muito severas e nas quais existe a possibilidade de serem desenvolvidas tensões de tração no revestimento.

□ Revestimento Intermediário

Também denominado revestimento de ligação, sendo o mesmo aplicado através dos métodos de pulverização térmica descritos anteriormente, com o objetivo de aumentar o ancoramento do depósito final, preferencialmente sobre um substrato previamente jateado. Entretanto, há situações, tais como superfícies extremamente duras, em que esse método é indispensável. Uma importante consideração na seleção desse revestimento, é a temperatura na qual o mesmo pode operar, sendo geralmente disponíveis os seguintes materiais e temperaturas de serviço: (a) Molibdênio/312 °C; (b) Níquel-20% alumínio/615 °C; (c) Níquel-5% alumínio/1000 °C; (d) Níquel-20% cromo/675°C; (e) Níquel-cromo-6% alumínio/520 °C. Outros materiais também são empregados, tais como nióbio; tântalo; bronze de alumínio e ligas níquel-alumínio-molibdênio, devendo o método específico de aplicação ser aquele recomendado pelo fornecedor.

MATERIAIS E APLICAÇÕES

Os diversos revestimentos disponíveis podem ser agrupados nas sete categorias apresentadas a seguir, as quais de maneira alguma esgotam todos os tipos existentes. Foge do escopo desse livro a análise detalhada das aplicações de cada material, sendo as seguintes suas principais características:

□ Metais Puros: Al;Cu; Mo; Ni; Ta; Zn; W.

Provavelmente com exceção do molibdênio, o qual apresenta boa resistência ao desgaste metal-metal, os demais materiais dessa categoria

são empregados por suas propriedades físicas, incluindo a de revestimento intermediário. Por exemplo, alumínio e zinco geralmente recobrem superfícies para proteção à corrosão, enquanto cobre e zinco são aplicados em aparelhos eletrônicos, isolando-os de interferências eletromagnéticas e de rádio frequência. Outras aplicações são encontradas na fabricação de condensadores eletrolíticos (alumínio) e circuitos elétricos com filmes muito finos sobre placas não condutoras (cobre, alumínio e zinco).

□ **Ligas Metálicas:** Aços ao Carbono e Inoxidáveis; Bronzes; Co/Cr/W/Mo; Cu/Ni; Mo/Fe/Ni.

▪ Aços ao carbono: entre outras aplicações, os aços baixo carbono são geralmente empregados na correção de dimensões, enquanto os de alto carbono na resistência ao desgaste abrasivo, ou em superfícies de mancais para serviços pesados, que não necessitam proteção à corrosão, tais como em munhão; cilindro; ou virabrequim. Podem ser depositados como arame, ou pó, por qualquer método.

▪ Aços inoxidáveis: aplicados na proteção à corrosão e resistência ao desgaste, sendo tipicamente representados pelos AISI 202, 304, 316, 420 e 431. Por exemplo, o AISI 420 encontra utilização nas superfícies de mancais para serviços pesados, que também necessitam proteção à corrosão, como eixos; rotores; pistão hidráulico e rolos de pressão. São geralmente disponíveis como arame e pó, podendo ser depositados por qualquer método.

▪ Ligas de cobre: possuem aplicações gerais de proteção ao desgaste, sendo o bronze mais utilizado em mancais. São disponíveis em diversas formas e podem ser aplicadas por qualquer método.

▪ Ligas à base de cobalto: principalmente as que contêm cromo, tungstênio e molibdênio são empregadas onde se requer resistências ao desgaste e à corrosão. Entre suas diversas aplicações, encontra-se em dutos de exaustão e assentos de válvulas. Usuais na forma de pó e aplicadas por plasma.

▪ Ligas de níquel/cromo: apresentando alta dureza, são aplicadas para proteção à corrosão e ao desgaste. Rolo de laminação de papel é um dos empregos dessas ligas, as quais são disponíveis em pó, ou arame, podendo ser pulverizadas por qualquer método.

□ **Cerâmicos:** Alumina; Alumina/Silica; Alumina/Titânia; Carboneto de Cr; Dióxido de Ti; Nitreto de B; Óxido de Cr; Óxido de Zr; Zircona-

to de Mg; Zirconato de Ca.

Existem mais de 50 tipos de cerâmicos fornecidos na forma de pó, alguns podendo ser pulverizados por chama, mas o plasma é o melhor método, ou o único que realiza um depósito de alta qualidade. Os mais importantes cerâmicos para a resistência ao desgaste, são baseados nos óxidos de cromo e alumínio, ou misturas desses com sílica; titania; zirconia; magnésia, etc.. Todos os cerâmicos de alta dureza possuem grande resistência à abrasão com baixa tensão, apresentado desempenho superior ao dos metais. Outrossim, esses materiais também são utilizados por suas propriedades como isolantes térmicos; proteção à oxidação; dielétricos; magnéticos e refratários, entre outras.

□ **Cermet:** Alumina/Ni; Al/Grafite; BN/Ni; BN/Bronze; Wc/Co; WC/Ni; Ni/Grafite; MgZr₂NiAl; WC/NiAl; ZnO₂/Ni/MgO.

Do inglês “ceramic metal”, o cermet é uma íntima mistura de cerâmico e metal, geralmente sinterizados, combinando a utilidade desse último, com a resistência em elevada temperatura dos carbonetos e/ou óxidos, resultando num material altamente resistente a choques térmicos e mecânicos. Entre os diversos tipos disponíveis na forma de pó, se destaca o cermet de carboneto de tungstênio aglomerado com níquel; cobalto; ou ligas resistentes à corrosão, como cromo/cobalto. O WC/Co é particularmente eficiente nas aplicações ao desgaste de baixa tensão e metal/metal. Outrossim, a utilidade aumenta diretamente, enquanto a resistência à abrasão é inversamente proporcional à proporção do aglomerante no cermet.

□ **Compósitos:** Fe/Mo; Cr/Al/Mo/Ni; Mo/Al/Ni; Aço/Al/Mo/C.

□ **Compostos Intermetálicos:** Al/NiAl; Alumínio de Ni.

□ **Polímeros/Compósitos Metálicos:** Al/Poliéster; Bronze/Poliéster.

C A P Í T U L O 19

PROCESSOS DE CORTE TÉRMICO

INTRODUÇÃO	372
CONCEITOS GERAIS DE QUALIDADE DO CORTE	372
OXICORTE	374
Princípios Gerais	374
Equipamentos	375
Gases	379
Fatores Metalúrgicos	380
Técnicas e Aplicações	382
Qualidade do Corte	386
CORTE COM PLASMA	388
Introdução	388
Parâmetros e Gases	389
Técnicas e Aplicações	390
Qualidade do Corte	391
CORTE COM LASER	393
Características	393
Aplicações	395
Qualidade do Corte	396
CORTE COM O ARCO ELÉTRICO	397
Eletrodo de Carvão/Grafita	397
Outros Métodos	398
CORTE SUBAQUÁTICO	399

INTRODUÇÃO

Os métodos mecânicos de corte dos materiais, podem não ser os mais convenientes, ou econômicos para um dado serviço. Como opções, são disponíveis diversos processos, que utilizam princípios bastante diferentes, entre os quais se destacam:

- Feixe de energia altamente colimada (ou LASER) geralmente combinado com um jato de gás para expulsar o material fundido;
- Constrição do arco elétrico, formando um Plasma de muito alta temperatura;
- Arco Elétrico formado por eletrodos consumíveis, ou não consumíveis, usualmente se valendo de um jato de gás para arrastar o metal fundido;
- Combinação do aquecimento por chama, com jato de oxigênio de alta pureza, propiciando condições para ocorrência de oxidação catastrófica do metal, ou Oxicorte;
- Jato de um fluido (muitas vezes associado a partículas abrasivas) com muito alta pressão.

Além desses processos, apesar de raramente,

também pode ser utilizado o Feixe de Elétrons para realizar o corte.

As aplicações, por sua vez, são das mais variadas, entre as mesmas encontrando-se a separação dos canais e massalotes de peças fundidas; chanfros em chapas e componentes que serão soldados; fabricação em série de produtos, cujo perfil é obtido por corte; salvamentos e muitas outras. Diversas operações similares também podem ser realizadas, tais como goivagem; escarfagem; decapagem térmica e perfuração.

Nesse Capítulo serão analisados os processos de corte térmico, visando principalmente aplicações de preparação dos componentes para posterior soldagem. Além das usuais restrições devidas aos custos de operação e do equipamento, os cortes são realizados com distintos níveis de qualidade. A combinação desses fatores, com suas demais características, determina o processo mais adequado para uma dada operação. Portanto, a seguir são analisados alguns aspectos relativos aos mesmos.

CONCEITOS GERAIS DE QUALIDADE DO CORTE

Seja qual for o processo de corte utilizado, existem certos conceitos gerais relativos à qualidade, não somente da superfície cortada mas, também, da operação como um todo. A **Fig. 19.1** ilustra esquematicamente o corte de uma chapa, onde se nota a formação de um rasgo entre as partes separadas, as quais apresentam faces (do corte) com linhas características, denominadas “linhas de arraste”, ou “estrias”.

Dependendo do processo e da técnica empregada, pode-se definir os seguintes itens para qualificar uma operação de corte, além de outros, even-

tualmente estabelecidos entre as partes interessadas (usuário e prestador do serviço):

- Aderência, tenacidade e volume da escória formada;
- Descontinuidades nas superfícies de corte;
- Largura do rasgo;
- Nível de distorção do componente cortado;
- Intensidade de distorção da peça que sofreu o corte;
- Geometria da superfície de corte;
- Nível de agressão ao meio ambiente e à saúde do operador.

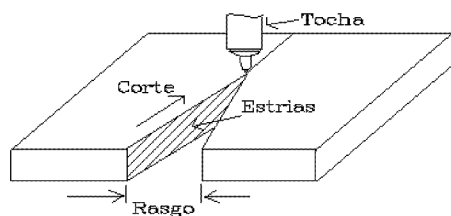


Figura 19.1 - Ilustração Esquemática do Corte Térmico.

Geralmente as partes interessadas estabelecem valores admissíveis, tanto com relação à deformação, quanto dimensões finais das peças que sofrerão o corte, sendo que alguns Códigos e/ou Normas definem tolerâncias, principalmente para a superfície do corte.

Numa análise geral, destacam-se os seguintes tópicos:

Deformação

A deformação pode ocorrer tanto na parte cortada e que será aproveitada, quanto no resto, o qual poderá, ou não, ter utilidade futura. As tolerâncias normalmente são estabelecidas com relação aos desvios transversais, longitudinais e angulares. Empíricamente foram desenvolvidas algumas “regras” para a seqüência do corte de certas geometrias, as quais minimizam a distorção. As **Figs. 19.2(a-d)** apresentam exemplos para diferentes perfis, com as setas indicando o sentido do corte e os números sobre as mesmas definindo a seqüência da sua realização.

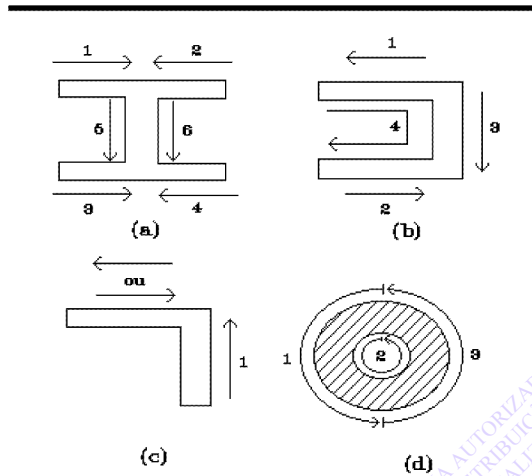


Figura 19.2 - Seqüência e Sentido do Corte para Minimizar a Deformação.

Arraste

Estrias, ou linhas de arraste, ocorrem na superfície de praticamente todos os processos de corte térmico. O arraste é o desvio da estria em relação a linha normal à superfície, conforme mostrado na **Fig. 19.3**, e fornece indicações sobre a técnica de corte utilizada. Visando permitir comparações, o arraste (a) é normalmente expresso como uma proporção (p) da espessura (e) do componente que está sendo cortado, ou seja:

$$p = (a/e) \times 100 \quad (\%) \quad [19.1]$$

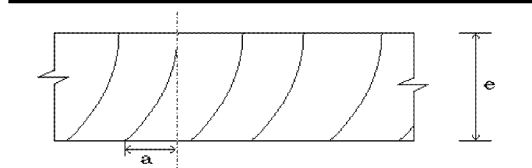


Figura 19.3 - Arraste (a) e a Qualidade do Corte.

Largura do Rasgo

A massa de material expulso para formar o rasgo é influenciada pela técnica; equipamento e processo empregado, sendo que sua largura determina a compensação dimensional prévia e deve ser a menor possível para minimizar a distorção. Outrossim, essa compensação depende tanto da geometria, quanto do sentido do corte, conforme ilustrado na **Fig. 19.4**:

- Se a peça que será aproveitada é a parte “P”, com o resto “R”:
 - Corte realizado no sentido horário (H): compensação à esquerda.
 - Corte realizado no sentido anti-horário (AH): compensação à direita.
- Se a peça que será aproveitada é a parte “R”, com o resto “P”, a compensação acima descrita deverá ser invertida.

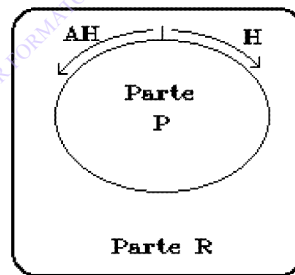


Figura 19.4-Largura do rasgo e sentido do corte (vide texto).

Arredondamento da Borda Superior

Como mostrado na **Fig. 19.5**, esse é um indicador (“a”) facilmente visível de possíveis distúrbios que possa estar ocorrendo no corte.

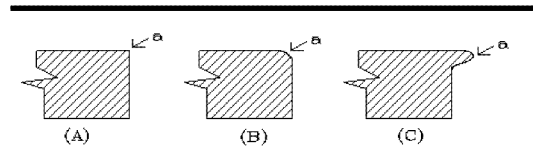


Figura 19.5 - Arredondamento da Borda Superior (a) em Seções transversais Cortadas.

Paralelismo da Superfície

É uma indicação da diferença entre a superfície de corte especificada e desvios obtidos, como ilustrado na **Fig. 19.6**.

❑ Rugosidade da Superfície

O grau de rugosidade de uma superfície, geralmente é definido como a média das distâncias entre os picos e vales da mesma. No corte, é um importante indicador da qualidade da operação.

A DIN 2310 especifica dois graus para o paralelismo e desvio de inclinação, assim como para a média de rugosidade, conforme mostrado na **Tab.**

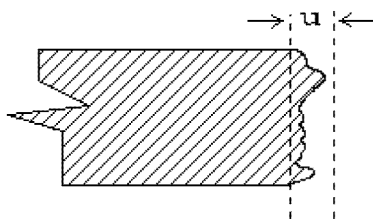


Figura 19.6 - Paralelismo da Superfície.

19.1. A classificação (grau) depende da espessura da peça e do processo de corte, sendo que essa quantificação existe somente para o Oxicorte e Plasma, conforme será visto oportunamente.

Outrossim, a rugosidade deve ser medida numa linha sobre o comprimento da superfície de corte, posicionada a 1/3 da altura da mesma.

Tabela 19.1 - Qualificação da Superfície e Perfil do Corte

GRAU	ZONAS	
	Paralelismo e Desvio de Inclinação (U)	Média de Rugosidade (Rz)
I	1 e 2	1 e 2
II	1 e 3	1 e 3

OXICORTE

PRINCÍPIOS GERAIS

No oxicorte, a superfície do metal deve ser aquecida por uma chama, até sua temperatura de ignição ser atingida, sendo então submetida a um fluxo de oxigênio de alta pureza. Isso resulta na oxidação catastrófica de toda a espessura da peça, com os produtos dessa reação expulsos pelo jato de oxigênio, restando as superfícies cortadas.

Uma das principais vantagens desse processo é a sua versatilidade, o que permite seu uso tanto numa pequena oficina mecânica, com baixo aporte de capital, quanto em obras no campo; nas operações de salvamento e reparo e até em cortes mecanizados complexos de muito alta qualidade. Os materiais que geralmente podem ser oxicortados, são os aços ao carbono e baixa liga, em espessuras que excepcionalmente podem alcançar até 2 m (!), e com maior dificuldade, alguns ferros fundidos. Essa operação é geralmente realizada mais rapidamente e a um menor custo do que por qualquer meio mecânico, além de ser possível obter praticamente todos os tipos de perfis desejados.

Alguns aços inoxidáveis e ligados também podem ser oxicortados, quando são empregados certos artifícios para auxiliar o método convencional. Entretanto, geralmente o corte não apresenta muito boa qualidade e a operação é relativamente lenta. Por outro lado, a tolerância dimensional do oxicorte é menor do que aquele realizado por meios

mecânicos, além de serem produzidos fumos; expelidas partículas incandescentes e aços temperáveis necessitem pré- e/ou pós-aquecimento para que suas microestruturas e consequentes propriedades mecânicas sejam controladas.

Então, uma sequência geral de operação do oxicorte é a seguinte:

- A borda da superfície da peça é aquecida (de preferência em toda sua espessura, se a mesma for muito espessa), por uma chama denominada de pré-aquecimento.
- A temperatura de oxidação acelerada do material é alcançada.
- Um jato de oxigênio puro é liberado, geralmente do centro do bico, iniciando a oxidação.
- Nesse instante o maçarico começa a se deslocar, realizando o corte e, como resultado da reação exotérmica, os óxidos formados, bem como parte do metal, se liquefazem, produzindo uma escória, que é violentamente expulsa pela ação mecânica do jato de oxigênio.

A utilização da “temperatura de ignição” para o oxicorte, provém da conhecida experiência (de Lavoisier), a qual comprovou que se o ferro, por exemplo, é aquecido até cerca de 1350 °C e imerso numa atmosfera de oxigênio puro, há praticamente instantânea oxidação do mesmo, apesar da

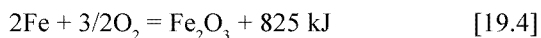
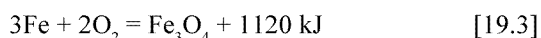
fonte externa de calor ter sido interrompida. Isso ocorre, porque o calor gerado pela reação exotérmica de oxidação funde o óxido desse elemento e, dessa forma, a superfície do metal é constantemente exposta ao oxigênio, sendo o ciclo renovado continuamente.

Além de ser desejável que o metal a ser cortado possua alto calor de combustão e baixa condutividade térmica, as condições básicas para que o oxicorte possa ser executado são:

- A reação de oxidação precisa ser exotérmica, mantendo o metal na temperatura de ignição;
- O(s) óxido(s) formado(s) tem que possuir temperatura(s) de fusão inferior(es) à do seu metal;
- A temperatura de ignição necessita ser menor do que a de fusão do metal.

Talvez uma das mais importantes limitações do oxicorte, é do mesmo não ser aplicável para metais cujos óxidos apresentem temperatura de fusão apreciavelmente maior do que a sua. O ferro funde a 1536 °C e forma FeO e Fe₃O₄, cujos pontos de fusão são 1370 °C e 1590 °C, respectivamente, além do Fe₂O₃, que se dissocia a 1460 °C. Porém, existem vários metais que formam óxidos com temperaturas de fusão muito maiores que as suas, como por exemplo: o cobre, o qual funde a 1083 °C, mas o Cu₂O em 1230 °C e o CuO a 1150 °C; o cromo, que funde a 1875 °C, com o Cr₂O₃ a 1990 °C. Entre outros metais, com óxidos de maior ponto de fusão, se encontram, ainda, alumínio; manganês e níquel. Portanto, aço ligado com relativamente grande porcentagem desses elementos químicos, pode não ser cortado por oxicorte, sendo esse um assunto que se voltá a discutir. Entretanto, é possível utilizar artificios, como adição ao jato de oxigênio, de fluxos, ou pós metálicos, os quais auxiliam a realização do corte, nem sempre de alta qualidade.

É muito grande a cinética da reação do oxigênio puro com o ferro, já à partir de cerca de 900 °C, sendo liberada apreciável quantidade de calor nas seguintes etapas em que o fenômeno ocorre:



Portanto, com o auxílio dessas equações e al-

guns dados empíricos, constata-se preliminarmente que:

- Estequiometricamente, 0,29 m³ de oxigênio oxida cerca de 1 kg de ferro, formando magnetita (Fe₃O₄);
- Parte do metal adjacente à região onde a reação é mais intensa, funde pelo calor ali gerado, como demonstram os cerca de 30% de Fe não oxidado contido na escória;
- A reação descrita pela equação 19.4 ocorre parcialmente em chapas espessas;
- Praticamente constata-se, que para chapas mais finas do que 40 mm, o consumo de oxigênio é geralmente maior do que o teoricamente previsto;
- Em chapas relativamente grossas, o consumo de oxigênio é menor do que o calculado, devido a somente parte do ferro formar magnetita, sendo o restante arrastado pelo fluxo desse gás;
- Após o processo de oxidação ter iniciado, teoricamente não é mais necessária a adição externa de calor para que o mesmo prossiga, mesmo se for consideradas as perdas por condução e radiação. Entretanto, na prática isso raramente ocorre, devendo ser utilizada uma chama (de pré-aquecimento) durante toda a operação para que o corte seja mantido, pois geralmente na superfície das chapas existe uma camada oxidada, que impede o contato direto do jato de oxigênio com o metal.

Para um melhor entendimento do presente assunto, sugere-se ao leitor que reveja as principais características dos gases combustíveis usuais, dos equipamentos utilizados e das medidas de segurança pertinentes, bem como dos mais importantes fenômenos da combustão, assuntos apresentados no Capítulo 16 - Soldagem por Oxigás.

EQUIPAMENTOS

Também é válida aqui a assertiva do **Capítulo 16** (Soldagem por Oxigás): “os equipamentos devem ser robustos, de fácil manejo, eficientes, econômicos e fornecerem os gases corretamente misturados, numa vazão, pressão e velocidade constantes”.

Para realizar o oxicorte é necessário um elaborado (mas não complicado) sistema, o qual deve ser capaz de fornecer: (a) Chama de pré-aquecimento, regulada com as desejadas características, para elevar o material até sua temperatura de ignição, permanecendo acesa durante o corte, não necessariamente com a mesma intensidade; (b) Jato de oxigênio, independente da chama, suficiente-

mente controlado para realizar o corte; (c) Movimento preciso do maçarico.

A combinação desses itens, com a técnica de operação, decide a qualidade e o custo do corte.

Como em outros processos de fabricação, para um eficiente emprego do oxicorte, tanto técnica, quanto economicamente, é preciso que seus principais aspectos sejam bem conhecidos e isso é o que será feito a seguir.

Os componentes básicos do equipamento são similares àqueles apresentados no Capítulo 16, com exceção do maçarico de corte. Então, um conjunto mínimo para corte manual é composto por: (a) Oxigênio e gás combustível, em cilindros, ou outro tipo de recipiente para armazenamento, dependendo da demanda necessária; (b) Manômetros de alta e baixa pressão, com esse último também estabilizando a pressão de trabalho; (c) Válvulas contra retrocesso de chama; (d) Mangueiras, sendo de cor vermelha para o gás combustível e verde, preta, ou azul para o oxigênio; (e) Válvulas contra fluxo dos gases, normalmente conectadas no corpo do maçarico; (f) Maçarico. Caso o oxicorte seja efetuado de forma mecanizada, devem ser ainda considerados diversos itens adicionais, salientando-se o sistema de movimentação do maçarico. Como o bico e o maçarico de oxicorte apresentam notáveis diferenças em relação àqueles para soldagem oxigás, a seguir serão analisados alguns importantes aspectos dos mesmos.

❑ Maçarico

Essa peça pode ser projetada para uso manual, ou mecanizado, utilizando conceitos praticamente iguais, mas diferindo na forma e essencialmente na robustez.

A Fig. 19.7 exemplifica maçaricos para uso manuais. Além da entrada para o acetileno, geralmente há somente uma outra para o oxigênio, a qual se divide, no interior do maçarico, numa porção que será utilizada para formar a mistura de pré-aquecimento e noutra para o corte, com o equipamento contendo as seguintes principais partes: (a) Corpo, sobre o qual se encontram as válvulas de regulação da vazão dos gases combustível e oxigênio, que formarão a chama de pré-aquecimento, além da alavanca para liberar o oxigênio puro; (b) Bico de corte. Geralmente os maçaricos são classificados pelo modo como realizam a mistura dos gases de pré-aquecimento, e/ou pela pressão de trabalho dos mesmos. Aquele apresentado na Fig. 19.7(a) é do tipo pré-misturador, pois os gases da chama de pré-aquecimento são misturados

no interior do seu corpo; dependendo da forma que essa mistura ocorre, ele ainda pode ser de pressão positiva, ou injetor. Existem outros maçaricos desse tipo, mas que podem operar tanto com alta, quanto com baixa pressão, sendo denominados universais.

Como é possível ocorrer retorno da chama de pré-aquecimento, foram desenvolvidos sistemas em que a mistura do comburente e combustível ocorre no próprio bico de corte, ou muito próximo do mesmo, conforme é ilustrado na Fig. 19.7(b). Dessa forma, não existe a longa coluna de gases pré-misturados, os quais podem entrar em combustão no interior do corpo.

Por sua vez, a Fig. 19.8 mostra um maçarico típico para corte mecanizado, o qual geralmente possui entradas individuais para o oxigênio de corte e de pré-aquecimento. Essa disposição permite que a vazão desse comburente seja independentemente regulada, além de ser reduzida aquela do pré-aquecimento durante o corte, remota ou manualmente. O oxicorte mecanizado pode ser realizado de forma simples, com o maçarico movimentado por um pequeno tracionador sobre trilhos (“tartaruga”) e seu acendimento efetuado pelo operador. Por outro lado, para grandes produções e/ou melhor qualidade de corte, é possível que seja necessária a utilização de sofisticadas máquinas controladas por computador, com um ou vários maçaricos operando em muito alta velocidade e grande pressão dos gases, podendo incluir os seguintes itens: (a) Central de comando; (b) Movimentação dos maçaricos; (c) Acendimento automático da chama; (d) Sensores de direção; (e) Sensores de regulação da altura do bico em relação à superfície da peça.

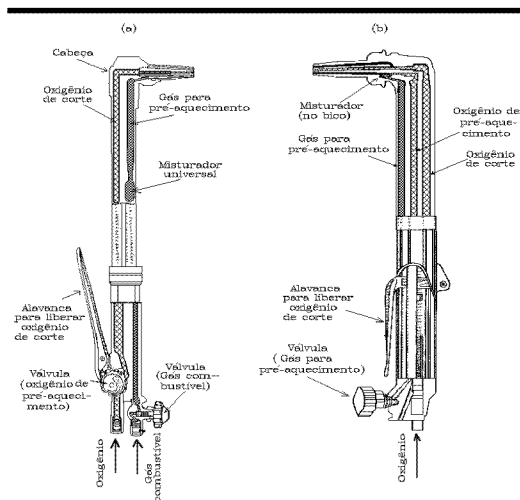


Figura 19.7 - Maçaricos para Uso Manual: (a) Pré-Misturador; (b) Universal.

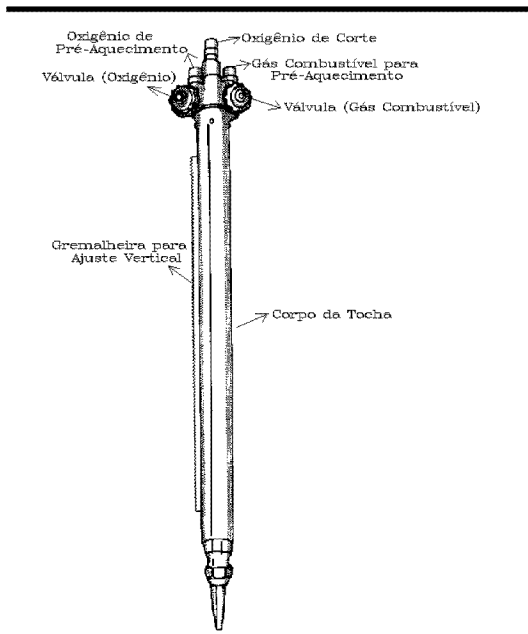


Figura 19.8 - Maçarico para Corte Mecanizado.

□ Bicos

O bico é uma peça chave no oxicorte e deve ser tratado com o máximo cuidado, pois sua construção em ligas de cobre é realizada dentro de estreitas tolerâncias. A Fig. 19.9 apresenta algumas posições relativas das saídas da chama de pré-aquecimento e do oxigênio, nas vistas inferiores de diferentes bicos. São muito mais utilizadas aquelas disposições, nas quais esse comburente emerge de um furo central, como ilustrado na Fig. 19.9(c), com a chama se formando em diversos pequenos furos, ou portos, laterais.

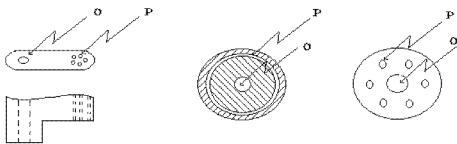


Figura 19.9 - Vista Inferior de Bicos, Mostrando as Saídas do Oxigênio de Corte (O) e da Mistura de Pré-Aquecimento (P).

Existem duas geometrias básicas para os canais de oxigênio de corte, que são: (a) Reto (ou cilíndrica), para pressão entre 207 e 414 kPa, como mostrado na Fig. 19.10(a), no qual a velocidade do gás é relativamente pequena; (b) Divergente, que trabalha com pressão entre 414 e 690 kPa, cujo princípio Venturi é ilustrado na Fig. 19.10(b), com

o gás alcançando velocidades supersônicas, entre 2 e 3 mach (mach é a razão entre a velocidade de um corpo passando através de um fluido e a velocidade do som naquele meio; a velocidade do som no ar é de 340,29 m/s). O aumento da velocidade do oxigênio possibilita que o corte seja efetuado mais rapidamente (em até cerca de 30%) sendo esse tipo geralmente empregado nas operações mecanizadas e não recomendado para espessuras superiores a 250 mm.

Ao contrário do oxigênio de corte, a geometria dos canais da mistura de pré-aquecimento usualmente depende do gás combustível utilizado. Isso se deve, principalmente, às diferentes relações volumétricas entre os gases combustível/comburente e suas distintas taxas de combustão, necessárias para proporcionar chamas estáveis e com as características ótimas numa dada operação de corte. Para os gases acetileno e MAP, a ponta do bico é plana, com ambos os tipos de canais na mesma altura. Entretanto, aqueles para os gases natural e propano, por exemplo, são construídos em duas partes e possuem seus canais de pré-aquecimento bastante recuados em relação ao do oxigênio.

Outra variante que o bico pode apresentar, é o acréscimo, ao do tipo divergente, de uma cortina de oxigênio entre o canal daquele de corte e a chama de pré-aquecimento. Isso eleva a velocidade da operação, mas também aumenta consideravelmente o consumo do oxigênio de corte.

Por outro lado, o orifício do oxigênio de corte e os portos da chama de pré-aquecimento, são dimensionados para um dado intervalo de espessura do material que será cortado, sendo isso decidido na fase de projeto do bico. O modelo mais adequado a um dado serviço deve ser sugerido pelo fabricante do equipamento. Entretanto, muitas vezes dois bicos podem ser utilizados para uma mesma espessura e, como visto, existem diferentes conceitos construtivos para os mesmos. Portanto,

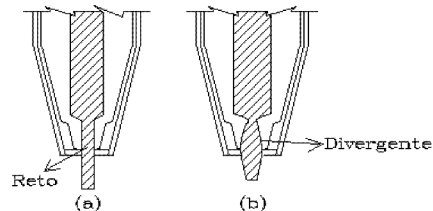


Figura 19.10 - Geometria para os Canais do Oxigênio de Corte.

para selecionar o bico mais conveniente à sua aplicação específica, o usuário deve efetuar um cuidadoso balanço entre seu ganho com uma maior velocidade de corte e gasto com o maior consumo de gases, principalmente o oxigênio. O aumento indevido da vazão desse gás pode levar à produção de superfícies de corte de má qualidade, como consequência do modo turbulento de seu deslocamento. Essa vazão, por sua vez, depende não somente da pressão, mas também de fatores geométricos do bico. Para um canal cilíndrico, como aquele exemplificado na **Fig. 19.10(a)**, no qual a sua altura se situa entre 2 e 10 vezes o diâmetro do bico, vale a seguinte relação aproximada para a vazão (F) do oxigênio:

$$F = 817.P.d^2 \quad (\text{l/min}) \quad [19.5]$$

onde:

P = pressão absoluta (kPa);

d = diâmetro do bico (mm).

De forma geral e quando for absolutamente necessário realizar uma estimativa sem prévio teste, pode-se considerar para o aço ao carbono, que o consumo do acetileno será cerca de 1/10 (em volume) daquele do oxigênio, o qual apresenta os seguintes valores:

- Corte Manual: cerca de 2 litros por cm² da seção cortada.
- Corte Mecanizado, por cm² da seção cortada, em espessuras de:
 - até 15 mm: 0,5 litro;
 - acima de 15 mm até 50 mm: 1 litro;
 - acima de 50 mm até 150 mm: 1,5 litro.
 - acima de 150 mm até 300 mm: 2,5 litro.
- Corte Manual de Chapas sobrepostas: cerca de 3 litros por cm² da seção cortada.

□ Métodos Auxiliares de Corte

Os equipamentos, tal como acima descritos, são projetados para o oxicorte de aços ao carbono e baixa liga. Entretanto, desde que certos artificios sejam utilizados, diversos outros materiais também podem empregar esse processo, principalmente ferros fundidos e aços inoxidáveis, sendo que se destacam os seguintes métodos:

▪ Adição de Fluxo

Um fluxo é continuamente adicionado no rasgo, com a função de diminuir o ponto de fusão dos óxidos existentes, principalmente aqueles de

aços inoxidáveis. Com o emprego de mais alta vazão do oxigênio de corte e bicos de maior diâmetro, é possível alcançar velocidades de corte nesses aços, similares às obtidas em aços ao carbono de espessuras equivalentes.

▪ Adição de Pó Metálico

Os pós normalmente são compostos por ferro, ou ferro e alumínio, ou, ainda, esses metais e compostos químicos que reagem com os óxidos existentes. Os mesmos são introduzidos através do bico, ou externamente, mas na chama. Aços resistentes ao calor podem ser cortados numa velocidade similar àquela empregada num aço ao carbono de mesma espessura, com pequeno aumento na vazão do oxigênio de corte.

▪ Chapa ou Arame de Sacrifício

No primeiro caso, uma fina tira de aço baixo carbono é posicionada sobre a superfície da peça, enquanto que no segundo, o arame é continuamente alimentado sob a chama. Ambos os procedimentos produzem efeitos similares, que são aumentar a quantidade de calor disponível para a reação, através da oxidação do aço baixo carbono, além do óxido de ferro (por ação mecânica) expulsar os óxidos refratários das superfícies de corte.

▪ Oscilação do Maçarico

Aquecendo em alta temperatura toda a face da quina onde o corte será iniciado e movimentando a tocha em pequenos círculos - ou outra figura geométrica, como no tecimento em soldagem - é possível cortar ferros fundidos e até aços inoxidáveis em espessura não superior a 100 mm. Geralmente o corte é de baixa qualidade e grande a largura do rasgo.

▪ “Lança” de Oxigênio

Esse método consiste num tubo de aço, cuja ponta é aquecida até uma temperatura próxima daquela de sua ignição (nesse material, quando atinge a cor amarelo claro) sendo nesse instante liberado um jato de oxigênio puro. A partir desse ponto a reação é exotérmica, não necessitando, portanto, qualquer aquecimento externo. Então, a ponta do tubo é encostada na superfície do componente, o qual funde e um furo é formado. A “lança” pode ser utilizado sobre praticamente todos os tipos de materiais em diversas aplicações, tais como desobstrução de ventaneiras de fornos; concreto; refratários e em qualquer metal.

GASES

□ Oxigênio de Corte

A pureza do oxigênio utilizado é responsável direta pela velocidade e eficiência da operação. Esse gás deve ser no mínimo 99,5% puro, sendo que 1% de diminuição nesse valor provoca as seguintes principais consequências:

- Decréscimo entre 15 e 25% da velocidade de corte;
- Aumento em cerca de 25% do consumo de oxigênio;
- Maior tenacidade e massa da escória formada;
- Menor qualidade da superfície de corte.

O emprego de oxigênio com somente 97,5% de pureza, pode causar uma redução maior do que 50% na velocidade do corte e abaixo de 97% é muito difícil realizar a operação. Outrossim, geralmente parte desse mesmo oxigênio de corte é utilizado na chama de pré-aquecimento e, vale lembrar, a eficiência de combustão sofre grande influência das impurezas, tais como argônio, vapor d'água e nitrogênio, muitas vezes resultantes do seu próprio processo de fabricação.

□ Chama de Pré-Aquecimento

Os critérios para a seleção do gás combustível da chama de pré-aquecimento são complexos, dependem também da preferência do usuário e essa decisão é adicionalmente complicada pela existência de um grande número de gases que são candidatos em potencial, destacando-se os seguintes, pelo custo e/ou qualidade: propano; propileno; gás natural; acetileno; hidrogênio; mistura estabilizada de metilacetileno com propadieno (MAP) e misturas patenteadas.

Como visto no Capítulo 16, a eficiência e conveniência do uso de uma chama não é determinada somente por alguma propriedade isolada da mesma, mas pela combinação das suas principais características. Para auxiliar essa escolha, a Tab. 16.1 daquele Capítulo apresenta os mais importantes aspectos de diversos gases combustíveis usualmente empregados em soldagem e corte, enquanto que a Fig. 16.1 no mesmo mostra a temperatura da chama dos mesmos, em função da porcentagem de oxigênio na mistura. Entretanto, talvez o melhor indicativo é a análise conjunta da temperatura e da intensidade de combustão da chama, com essa última sendo função da sua velocidade de combustão (“taxa de propagação”) e do

calor de combustão da mistura. Por sua vez, a intensidade de combustão total também varia com a proporção de oxigênio da mistura, tendo sido esse fato ilustrado na Fig. 16.2 daquele Capítulo, para vários gases combustíveis.

Entretanto, possuir as melhores propriedades não é a única condição exigida para que um gás combustível seja escolhido. A relação custo/benefício deve ser levada em consideração e, portanto, é preciso que a aplicação esteja completamente definida. Dessa forma, a chama do pré-aquecimento no oxicorte deve ser capaz de:

- Como função primária, aumentar a temperatura de uma região do metal, até aquela de sua ignição;
- Manter a região que será cortada numa temperatura tal, que permita continuidade à reação exotérmica provocada pelo oxigênio;
- Exercer uma ação de “limpeza” da superfície, expulsando carepa e queimando tinta que exista sobre a mesma, pois elementos estranhos como esses podem retardar o corte;
- Isolar da atmosfera a região que reage quimicamente com o oxigênio.

Praticamente todos os gases citados podem realizar essas funções mas, adicionalmente, os mesmos competem nos seguintes fatores:

- Tempo para elevar o metal até sua temperatura de ignição e/ou realizar um furo de início do corte (“sangria”);
- Velocidade com que o corte é realizado;
- Vazão do próprio gás e do oxigênio de pré-aquecimento;
- Vazão do oxigênio de corte;
- Custo unitário e final dos gases;
- Perigo potencial no manuseio e ao ambiente;
- Possibilidade de uso em outras operações, tal como em solda;
- Disponibilidade e forma de acondicionamento/transporte.

Uma vez feita a opção por um dado gás, o equipamento utilizado deverá ser compatível com o mesmo, não somente porque isso é tecnicamente mais vantajoso, mas também devido a razões de segurança. Então, de forma resumida (veja o **Capítulo 16**) são abaixo apresentadas as principais características físicas e operacionais dos gases mais empregados:

- **Acetileno:** (a) Facilmente disponível; (b) Chama de alta temperatura (neutra - 3087 °C); (c) Grande intensidade de combustão (cerca de 140 MJ.m⁻².s⁻¹ total para mistura neutra); (d) Utilizado também para soldagem; (e) Chamas de diferentes tipos facilmente visualizadas pelo operador; (f) Corte manual geralmente utiliza chama do tipo neutra; (g) Chama redutora muitas vezes empregada no corte grosseiro de ferros fundidos; (h) Chama oxidante geralmente utilizada na redução do tempo para alcançar a temperatura de ignição, ou em peças muito espessas; (i) Razão entre oxigênio/acetileno para pré-aquecimento em volume entre 1,25 e 1,1 (ou aproximadamente 1 m³ por 1 kg); (j) Máxima pressão de utilização, no cilindro de 103 kPa, ou absoluta de 207 kPa.

- **Gás Natural:** (a) Média disponibilidade; (b) Chama de baixa temperatura (neutra - 2540 °C); (c) Pequena intensidade de combustão (cerca de 70 MJ.m⁻².s⁻¹ total para mistura neutra); (d) Utilizado também para soldagem; (e) Chamas de diferentes tipos razoavelmente visualizadas pelo operador; (f) Razão entre oxigênio/gás natural para pré-aquecimento em volume entre 2,5 e 1,5 (ou aproximadamente 2,2 m³ por 1 kg); (g) Pressão de trabalho baixa.

- **Hidrogênio:** (a) Facilmente disponível; (b) Chama de baixa temperatura (neutra - 2660 °C); (c) Baixa intensidade de combustão (cerca de 80 MJ.m⁻².s⁻¹ total para mistura neutra); (d) Utilizado com restrição para soldagem; (e) Chamas de diferentes tipos razoavelmente visualizadas pelo operador; (f) Razão entre oxigênio/hidrogênio para pré-aquecimento em volume de cerca de 0,25; (g) Pressão de trabalho alta.

- **MAP** (mistura estabilizada de Metilacetileno com Propadieno): (a) Média disponibilidade; (b) Chama de média temperatura (neutra - 2870 °C); (c) Alta intensidade de combustão; (d) Utilizado para brasagem; (e) Chamas de diferentes tipos razoavelmente visualizadas pelo operador; (f) Razão entre oxigênio/MAP para pré-aquecimento em volume de cerca de 2,5; (g) Máxima pressão de utilização no cilindro de 1030 kPa; (h) Chama com alta concentração de energia.

- **Propano:** (a) Facilmente disponível, mas seu uso pode depender de específica autorização governamental; (b) Chama de baixa temperatura (neutra - 2520 °C); (c) Baixa intensidade de combustão (cerca de 60 MJ.m⁻².s⁻¹ total para mistura

neutra); (d) Utilizado em operações de aquecimento em geral; (e) Chamas de diferentes tipos visualizadas com dificuldade pelo operador; (f) Razão entre oxigênio/propano para pré-aquecimento em volume de cerca de 3,5; (g) Máxima pressão de utilização no cilindro de 1030 kPa.

Na análise do conjunto de propriedades, deve também estar incluído a aplicação e o local que será realizado o corte pois, por exemplo:

- Nas operações manuais de demolição no campo, a qualidade e velocidade do corte (geralmente baixas) são função da habilidade do operador, independentemente do gás utilizado. Nesse caso, o custo e disponibilidade do consumível devem ser os fatores que decidem a escolha, sendo fortes candidatos o gás natural e o propano.

- Para o corte manual executado em ambiente adequado, mas repetitivo e que se processa rapidamente, o tempo para alcançar a temperatura de ignição é significativo, sendo preferível um gás de alta temperatura de chama e intensidade de combustão, tal como o acetileno.

- Para o corte mecanizado, apesar de qualquer gás poder ser utilizado, geralmente é mais econômico o emprego daqueles com alta temperatura de chama e intensidade de combustão, tais como acetileno e MAP, pois: (a) A temperatura de ignição é mais rapidamente alcançada; (b) É reduzida a perda de corte devido à elementos estranhos na superfície da peça; (c) Principalmente no corte de fundidos, é minimizada a perda de corte causada pela existência de descontinuidades internas; (d) Em peças relativamente finas, há menos distorção.

- No corte subaquático, a máxima pressão de trabalho que o gás pode operar é um item fundamental.

FATORES METALÚRGICOS

O oxicorte é dirigido principalmente para os aços ao carbono e baixa liga. O mesmo também pode ser empregado, através do uso de métodos auxiliares anteriormente apresentados, sobre ferros fundidos e aços resistentes à oxidação. Entretanto, geralmente há perda de qualidade e produtividade, sendo preferível, sempre que possível, a utilização de outro processo de corte. A seguir, serão analisados sob essa ótica diversos aspectos

do processo:

❑ Metal Base

De forma geral, as sugestões de procedimento são fornecidas visando aplicação em aço ao carbono (conteúdo menor do que 0,25%) e não se adequam perfeitamente quando o corte é realizado em material diferente. A **Tab. 19.2** mostra resumidamente os efeitos dos elementos de liga. Os mesmos dificultam, ou até impossibilitam o corte, através das seguintes manifestações:

- Existência de micro- ou macro-constituintes indesejáveis. Como, por exemplo, nos ferros fundidos, em que a grafita impede a oxidação do ferro. Portanto, esse material não pode ser oxicrotado em produção, com a mesma qualidade e velocidade dos aços baixo carbono. Como há necessidade de se manter aquecida toda a seção cortada, é geralmente utilizada chama carburante, de grande comprimento, além de maior vazão e diâmetro de bico, do que aquele empregado num aço ao carbono de espessura equivalente. O maçarico deve ser sempre oscilado, muitas vezes em conjunto com outro método auxiliar anteriormente apresentado.

- Formação de fases frágeis na Zona Afetada pelo Calor (ZAC), como a sigma em aços inoxidáveis.

- Produção de um filme tenaz de óxidos com alto ponto de fusão, principalmente nos aços in-

xidáveis, sendo possível o corte, como mencionado, com a adição de pó metálico.

- Elevação da viscosidade da escória.

- Alteração da temperabilidade do metal, o que se reflete na extensão e tipos de microestruturas da ZAC assim formada, sendo suas características função da combinação do ciclo térmico, com o conteúdo e tipo dos elementos de liga do metal base.

❑ Ciclo Térmico

Apesar da dificuldade em realizar precisas medidas de temperatura muito próximo da face do corte, em geral são constatados os seguintes fatos:

- Máxima temperatura que a face do corte experimenta: é cerca de 1370 °C, ou seja, aquela da fusão do FeO, independentemente das condições de operação, incluindo a espessura da peça.

- Taxa de Resfriamento: é maior entre 800 e 1200 °C, podendo alcançar valores tão altos quanto 2000 °C/s na face do corte, mas diminui para menos da metade a cerca de 0,4 mm da mesma.

- Região de Transformação: é pequena (cerca de 1 mm) a largura da região que alcança temperaturas superiores àquela de interesse para os aços ao carbono e baixa liga, ou seja, aproximadamente 700 °C.

- Pré-Aquecimento da Peça (anterior à ope-

Tabela 19.2 - Efeito dos Elementos Químicos sobre a Resistência dos Aços ao Oxicorte

ELEMENTO	EFETOSOBRE O OXICORTE
Alumínio	Somente aumenta a resistência acima de 10%.
Carbono	Acima de 0,25% pode ser necessário pré-aquecimento. Nos ferros fundidos a grafita e o Fe ₃ C exigem que técnicas especiais sejam aplicadas.
Cobre	Somente aumenta a resistência acima de 2%.
Cromo	Acima de 5% exige técnicas especiais de corte.
Enxôfre	Nos conteúdos normais não tem efeito algum, apesar de que inclusões podem sofrer liquação na ZAC. Em teores muito elevados diminui a velocidade de corte e produz fumos (SO ₂).
Fósforo	Não tem efeito nos níveis usualmente presentes.
Manganês	Nos níveis normais não tem efeito algum. Aços com 14% desse elemento e alto C necessitam técnicas especiais.
Molibdênio	Efeito aproximadamente igual ao do cromo, exigindo técnicas especiais.
Níquel	Acima de 3% exige técnicas especiais.
Silício	Até 4% não tem efeito algum.
Tungstênio	Até 14-20% (dependendo da existência de outros elementos) não tem efeito algum.
Vanádio	Aumenta a facilidade do corte, nos níveis usualmente presentes.

ração de corte): não altera a máxima temperatura que a face do corte alcança, mas pontos afastados cerca de 4 mm da mesma já sofrem seu efeito. Entretanto, o pré-aquecimento exerce notável influência sobre a taxa de resfriamento, com direto reflexo na microestrutura da região transformada.

- **Velocidade do Corte:** com todas as outras condições mantidas inalteradas, quanto mais alta a velocidade, maior a taxa de resfriamento, numa pequena região da face do corte (1,0 - 1,2 mm), sendo aproximadamente constante desse ponto em diante, independentemente de alterações que esse parâmetro venha a sofrer.

- **Espessura da Peça:** em cortes realizados com velocidade constante para todas as espessuras (uma situação irreal) peças mais espessas apresentam maiores taxas de resfriamento. Entretanto, quando peças de diferentes espessuras são oxidadas com velocidades ótimas, ou próximas dessas (o que ocorre na prática) a taxa de resfriamento diminui conforme essa dimensão aumenta, pelo menos até cerca de 1 mm da face do corte.

TÉCNICA E APLICAÇÕES

A primeira providência que se deve tomar, é estabelecer as condições com que o corte será realizado, as quais incluem a seleção dos seguintes itens:

❑ Bico de Corte

Como visto, existem diversos tipos de bicos. Entretanto, uma vez decidido qual deles será utilizado, o tamanho do mesmo é função da espessura que será cortada. Ressalte-se que essa pode não coincidir com a da peça, sendo caso típico os chanfros (veja mais abaixo).

❑ Pressão/Vazão dos Gases

Esses parâmetros são selecionados a partir da espessura que será cortada e, como consequência, do tipo e dimensões do bico. A vazão/pressão do oxigênio da chama de pré-aquecimento mantém uma proporção mais ou menos fixa com aquela do acetileno, variando relativamente pouco com a espessura a ser cortada. Por exemplo, para uma peça 100 vezes mais espessa que outra (por exemplo, entre 3 e 300 mm) há um aumento na vazão dos dois gases de pré-aquecimento em somente cerca de 5 vezes. Entretanto, a vazão do oxigênio de corte, nesse mesmo intervalo de espessura, pode variar quase 50 vezes (!).

❑ Velocidade do Corte

O maçarico precisa se deslocar numa velocidade tal, que a quantidade de calor total gerada mantenha a superfície da peça, pelo menos, na temperatura de ignição do material. Além disso, deve existir suficiente tempo para que a escória formada seja expulsa de maneira uniforme, pulverizada, produzindo um silvo característico e constante.

Os parâmetros de corte acima descritos, são determinados por experiências que o usuário precisa empreender, considerando seu caso específico. Entretanto, os valores básicos são obtidos desde tabelas fornecidas pelo fabricante do equipamento. Além disso, tempo de pré-aquecimento pode ser sensivelmente diminuído, com a utilização dos artificios descritos anteriormente. Na falta de indicação específica do fabricante do equipamento, a **Tab. 19.3** apresenta algumas sugestões gerais para corte de aço baixo carbono, em diversas espessuras e três diferentes gases de pré-aquecimento.

O passo seguinte é planejar cuidadosamente o aproveitamento da chapa e a posição de início do corte. Para minimizar a deformação, o início e o desenvolvimento do corte devem obedecer ao critério de manter a parte que será cortada o máximo tempo possível solidária com o resto da peça, conforme ilustrado na **Fig. 19.11**.

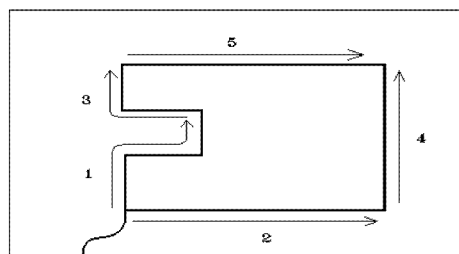


Figura 19.11 - Sequência de Corte para Minimizar Deformação.

Então, os manômetros devem ser regulados e iniciado o procedimento de corte. Para tanto, a válvula do gás combustível é aberta, numa pequena vazão, e o mesmo inflamado através de um acendedor de fricção (não é recomendável o uso de isqueiros de plástico, ou similares). A seguir e com presteza (há grande produção de picumã) a válvula do oxigênio de pré-aquecimento é aberta. Novamente a vazão do gás combustível e do oxigênio é regulada, até o estabelecimento do tipo de

Tabela 19.3 - Condições de Oxicorte para Aços Baixo Carbono

Espessura (mm)	Diâmetro do Orifício do Oxigênio de corte (mm)	Velocidade do Corte (mm/s)	Vazão do Gás Combustível (l/min)*			
			Oxigênio de Corte	Acetileno	Gás Natural	Propano
3	0,5-1,0	7-14	7-21	2-4	4-2	2-5
6	0,8-1,5	7-11	14-26	2-4	2-5	2-6
10	0,8-1,5	6-10	19-33	3-5	5-12	3-7
13	1,0-1,5	5-10	26-40	3-5	7-14	3-8
19	1,1-1,5	5-9	47-71	3-6	7-14	3-9
25	1,1-1,5	4-8	52-76	4-7	8-17	4-9
40	1,5-2,0	3-6	52-83	4-8	9-17	4-10
50	1,5-2,0	3-6	61-90	4-8	9-19	4-10
80	1,7-2,2	2-5	90-142	4-9	10-19	5-11
100	2,0-2,3	2-4	113-170	5-10	10-19	5-11
130	2,0-2,4	2-3	127-170	5-10	12-24	5-12
150	2,4-2,7	1-3	123-236	5-12	12-24	6-19
200	2,4-2,8	1-2	217-293	7-14	14-30	7-15
250	2,4-2,8	1-2	274-331	7-17	16-33	7-15
300	2,8-3,3	1-2	340-401	9-19	20-75	10-22

* A vazão do oxigênio de pré-aquecimento é: (a) 1,1 à 1,25 vezes a do acetileno; (b) 1,5 à 2,5 vezes a do gás natural; (c) 3,5 vezes a do propano.

chama com a intensidade e característica desejada.

No corte manual, partindo de uma borda da peça, a chama de pré-aquecimento é acesa e o eixo do maçarico alinhado com a mesma, conforme mostrado na Fig. 19.12. Mantém-se a ponta do cone dessa chama entre 1,5 e 3,0 mm acima da superfície, até que a temperatura de ignição seja atingida, o que se identifica na prática, através da cor amarelo claro nos aços (cerca de 1100 °C). Nesse instante, abre-se a válvula do oxigênio de corte e, após toda a espessura iniciar o processo de oxidação, se inicia o deslocamento do maçarico. Para peças relativamente finas, essa única chama é suficiente, enquanto que para aquelas muito espessas, acima de 300 mm, pode ser necessário o uso de outro maçarico auxiliar, com a chama de pré-aquecimento atingindo a lateral da peça.

Para o corte mecanizado, a operação se pro-

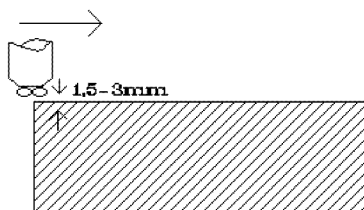


Figura 19.12 - Início do Corte (seção transversal).

cessa, em geral, de forma similar à manual. Entretanto, além do uso dos artificios já citados, pode ser empregada a técnica do super-aquecimento no início do corte, conforme um ciclo típico ilustrado na Fig. 19.13. Nessa figura estão representadas as seguintes etapas: (a) T_p , ou período inicial, o qual depende principalmente da espessura da peça e do gás combustível utilizado, geralmente durando menos do que 1 minuto; (b) T_r , ou período de “sangramento”; (c) T_c , ou período do corte. Portanto, a vazão dos gases de pré-aquecimento (F_a) é elevada no período T_i e reduzida logo após o aumento daquela do oxigênio de corte (F_c). Como consequência, o período não produtivo do pré-aquecimento pode ser reduzido em cerca de 50%, além de diminuir consideravelmente o consumo da mistu-

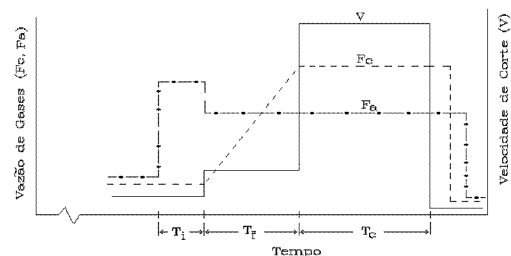


Figura 19.13 - Emprego da Técnica do Super-Aquecimento no Corte Mecanizado.

ra combustível. Entretanto, a manipulação da vazão do combustível e do oxigênio durante o corte, exige equipamentos especiais de controle.

Há ocasiões em que o furo deve ser iniciado fora da borda da peça, sendo esse início no interior da peça é algumas vezes denominado “sangramento”. Isso pode ser efetuado através das seguintes etapas: (a) A tocha é posicionada de tal forma que o cone da chama quase toque a superfície da peça; (b) A tocha é oscilada, ou sofre rotação se deslocando com baixa velocidade; (c) O oxigênio de corte é liberado vagarosamente; (d) O corte retorna para sua condição padrão. Existem disponíveis equipamentos especialmente projetados para realizar essa operação.

Algumas técnicas são constantemente empregadas para aumentar a produtividade e/ou a qualidade do corte. Abaixo estão relacionadas aquelas que mais se destacam:

□ Inclinação da Tocha

Em geral, o corte é realizado com a tocha posicionada num ângulo de 90° com a peça. Entretanto, para espessuras de aço ao carbono com até cerca de 30 mm e corte reto, a tocha pode ser inclinada entre 5 e 30° na direção do deslocamento. Isso resulta em aumentos da velocidade de 20 a 50%.

□ Pré-Aquecimento da Peça

O pré-aquecimento da peça pode ser realizado, ou para diminuir a taxa de resfriamento em aços com relativamente alto carbono e/ou baixa liga, ou para aumentar a velocidade do corte. O efeito dessa operação é tanto mais pronunciado, quanto maior a espessura da peça.

□ Pré-Aquecimento do Oxigênio de Corte

Para peças com espessuras superiores a 20 mm, pode ser economicamente interessante (apesar de não muito prático) pré-aquecer o oxigênio de corte, principalmente quando o mesmo não apresenta pureza garantida mínima de 99,5%. Por exemplo, para uma chapa de aço baixo carbono de 40 mm de espessura e oxigênio de corte pré-aquecido a 400 °C, em relação a um corte realizado com esse gás na temperatura de 20 °C, ocorre a seguinte variação na velocidade de corte e vazão:

- Oxigênio com 99% de pureza: aumento de 6% na velocidade e de 6% na vazão;

- Oxigênio com 95% de pureza: aumento de 20% na velocidade e de 18% na vazão;

- Oxigênio com 85% de pureza: aumento de 30% na velocidade e de 28% na vazão.

□ Corte de Chapas Empilhadas

Várias chapas podem ser cortadas simultaneamente, sendo esse método especialmente interessante para aquelas com pequenas espessuras (entre 1 e 3 mm), mas não se recomenda sua aplicação quando essa dimensão for maior do que 13 mm. Nesse caso, é muito difícil que as chapas mantenham um bom contato e, como pode-se notar nas condições dadas na **Tab. 19.3**, a velocidade de corte é inversamente proporcional à espessura da peça.

Portanto, para que o corte de chapas empilhadas seja efetivo, as seguintes condições básicas devem ser obedecidas:

- As superfícies das chapas devem estar perfeitamente limpas e planas, de forma que ocorra o melhor contato possível;

- As chapas precisam ser rigidamente posicionadas, através de dispositivos, ou solda nas suas laterais, conforme mostrado na **Fig. 19.14**;

- O início do corte é crítico, podendo ser realizado na lateral em que as chapas estão alinhadas, ou naquela em que as mesmas progressivamente se sobrepõem, como ilustrado na **Fig. 19.14**. Não é possível realizar sangramento com esse método, sendo preciso perfurar mecanicamente a pilha. Um cordão lateral de solda também pode ser utilizado para início do corte, bem como o aquecimento em toda a altura com um maçarico auxiliar. Outrossim, o uso de fluxo; ou pó de ferro; ou uma fina chapa de sacrifício na superfície, minimizam a tendência do corte sofrer interrupção;

- A altura da pilha possível de ser cortada é função da espessura da chapa que está no topo da pilha e da tolerância admitida para o corte. Para uma tolerância de 0,8 mm, a máxima altura é de 50 mm; duplicando a tolerância, a altura possível de ser cortada dobra. Entretanto, a espessura total máxima da pilha que pode ser cortada encontra-se em cerca de 150 mm.

- No corte de pilha com altura menor do que cerca de 5 mm, uma chapa de sacrifício de 6 mm deve ser posicionada no topo, pois evita distorção; facilita o início do corte e produz uma superfície com bom acabamento;

- A velocidade de corte deve ser reduzida

em cerca de 5%, quando comparada com aquela realizada numa chapa com espessura equivalente à pilha e cujo início não ocorreu na borda;

- O pré-aquecimento deve ser cerca de 50% maior, do que no caso em que o início ocorre fora da borda numa chapa de espessura equivalente.

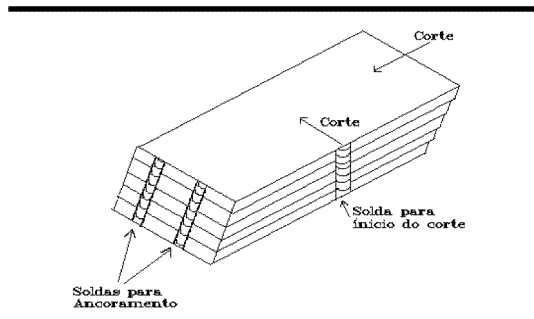


Figura 19.14 - Corte de Chapas Empilhadas.

□ Corte com Tochas em Seqüência

Para grandes comprimentos, a velocidade do corte pode ser substancialmente aumentada, se duas tochas percorrerem em idêntica velocidade o mesmo caminho. O primeiro maçarico realiza um corte grosseiro, enquanto o segundo (posicionado cerca de 500 mm atrás) melhora o acabamento da superfície. Como o mesmo já encontra a peça aquecida, o gasto com gases é mínimo.

□ Corte de Chanfros para Soldagem

Essa é uma aplicação de grande importância. Apesar de se poder cortar os chanfros manualmente, somente através de equipamentos mecanizados é possível alcançar as desejáveis tolerâncias dimensionais. Nesse caso, a espessura de corte considerada deve ser aquela determinada pela inclinação do maçarico e não a da chapa. A Fig. 19.15 exemplifica esse ponto para um corte em “V simples”, sendo a espessura de corte (C) dada por:

$$C = E / \text{sen } A \quad (\text{mm}) \quad [19.6]$$

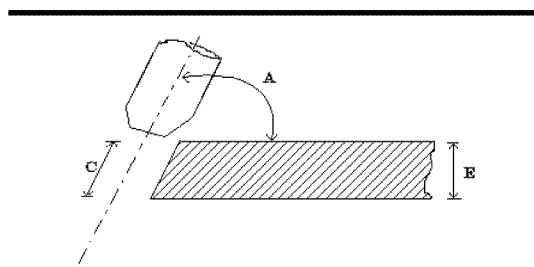


Figura 19.15 - Inclinação do Maçarico para o Corte de um Chanfro “V-Simples”.

onde E (mm) é a espessura da chapa e A (°) o ângulo do chanfro. Conseqüentemente, é para essa espessura “C” que se deve procurar as condições de corte. Entretanto, o melhor acabamento da superfície do bisel é obtido, em geral, com menores velocidades de corte. Portanto, é necessário diminuir a chama de pré-aquecimento, de forma a prevenir a fusão da superfície da chapa.

Nas Figs.19.16 à 19.18, os números sobre os maçaricos indicam a posição relativa dos mesmos na direção do corte. Assim, as Figs. 19.16 e 19.17 ilustram as disposições das tochas para a realização de chanfros em “V com nariz” e em “Duplo V sem nariz”, respectivamente. Por outro lado, a Fig. 19.18 apresenta dois possíveis métodos para realizar um chanfro em “K”. No método usual, mostrado na Fig. 19.18(a), a velocidade do corte é determinada pela espessura que a tocha 1 deve cortar, a qual é maior que a da peça. Entretanto, na Fig. 19.18(b) a primeira tocha corta a espessura da peça e somente após as outras duas finalizam o chanfro. Nessa segunda opção, portanto, a velocidade do corte é maior do que na primeira.

Outrossim, o provavelmente mais elaborado tipo de corte de um chanfro é o em “J” (ou “tulipa”). Para realizá-lo, devem ser utilizadas tochas com bicos adequados e posicionadas conforme mostrado nas Figs. 19.19(a-c), em diversas vistas. Os parâmetros de corte para produzir esse tipo de chanfro estão apresentados na Tab. 19.4.

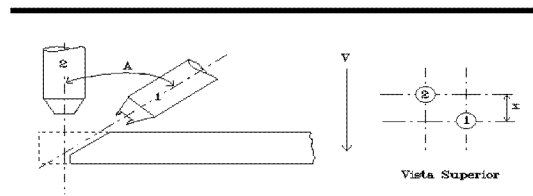


Figura 19.16 - Corte do Chanfro “V com Nariz”.

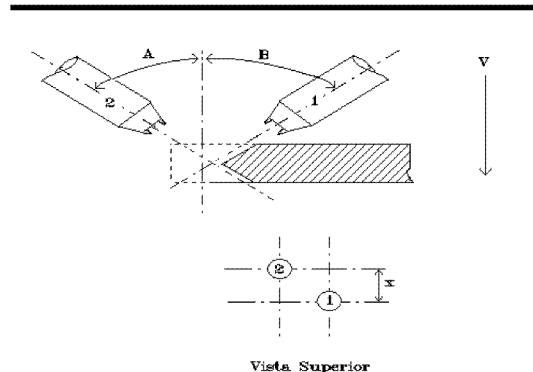


Figura 19.17 - Corte do Chanfro “Duplo V sem Nariz”.

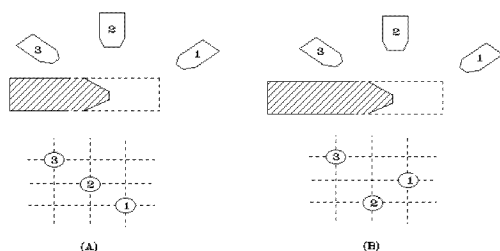


Figura 19.18 - Métodos para Corte do Chanfro em "K".

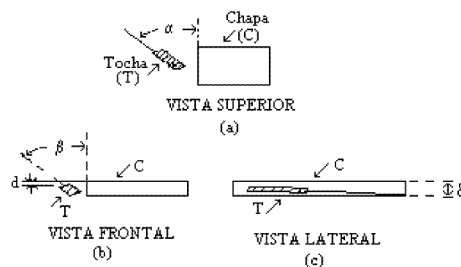


Figura 19.19 - Corte do Chanfro em "J" ("Tulipa").

Tabela 19.4 - Parâmetros de Corte para Realizar o Chanfro em "J" ("Tulipa")

Espessura (mm)	Ângulo α (°)	Ângulo β (°)	Ângulo δ (°)	Distância D (mm)	Vazão do Oxigênio de Corte (l/min)	Velocidade de Corte (mm/s)
50	18	4	4	13	685	10
75	15	4	2	13	2360	11
100	18	8	2	25	3300	11

QUALIDADE DO CORTE

A qualidade do oxicorte é determinada, fundamentalmente, pelo conjunto de fatores até aqui estudados. Na Introdução desse Capítulo foram descritos alguns itens que podem ser convençãoados, sendo que a Parte 3 da DIN 2310 estabelece o seguinte, para chapas de espessura "a" (entre 3 e 300 mm):

□ Paralelismo e Tolerância de Inclinação (U)

A Zona é definida por U (mm), da seguinte forma:

- Zona 1: $U \leq (0,1 + 0,007.a)$;
- Zona 2: $(0,1 + 0,007.a) \leq U \leq (0,4 + 0,01.a)$;
- Zona 3: $(0,4 + 0,01.a) \leq U \leq (1 + 0,015.a)$.

A medida de U deve ser realizada sobre o corte, a menos de um valor Δa retirado desde a superfície e da base da chapa, conforme ilustrado na Fig. 19.20. Por sua vez, este Δa depende da espessura da chapa, como mostrado na Tab. 19.5.

□ Tolerância de Rugosidade R_z

O valor de R_z (mm) define a Zona do seguinte modo:

- Zona 1: $R_z \leq (40 + 0,6.a)$;
- Zona 2: $(40 + 0,6.a) \leq R_z \leq (70 + 1,2.a)$;

- Zona 3: $(70 + 1,2.a) \leq R_z \leq (110 + 1,8.a)$.

A combinação das Zonas definidas por U e R_z qualificam o Grau do corte, como mostrado na Tab. 19.1, sendo válido, também, para corte com Plasma.

Outro importante aspecto ser controlado é a largura do rasgo, a qual depende de vários fatores, entre os mesmos: (a) Velocidade do corte; (b) Diâmetro do orifício do oxigênio de corte; (c) Espessura da chapa. Um bom fabricante de equipamentos deve fornecer esse valor para cada condição de corte e, como visto na Fig. 19.4, é preciso compensar esse valor, dependendo do sentido que o corte circular é realizado. Não dispondo dessa informação, o usuário pode considerar aproximadamente a largura do rasgo como 1,5 vezes o diâmetro do orifício do oxigênio de corte.

A aparência do corte fornece informações va-

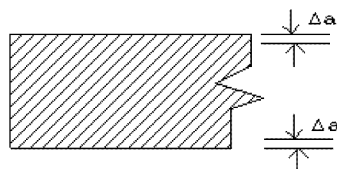


Figura 19.20 - Regiões Desconsideradas na Medida da Tolerância de Inclinação.

Tabela 19.5 - Exclusão de a à Partir da Superfície e Base da Peça para a Medida de "U"

Espessura da Chapa a (mm)	Δa (mm)	Espessura da Chapa a (mm)	Δa (mm)
3 a 6	0,3	>40 a 100	2,0
>6 a 10	0,6	>100 a 150	3,0
>10 a 20	1,0	>150 a 200	5,0
>20 a 40	1,5	>200 a 250	8,0
>40 a 100	2,0	>250 a 300	10,0

liosas para correção das condições e é vital, portanto, que se reconheça os defeitos para corrigi-los. Dessa forma, a seguir os mesmos serão descritos, sendo convencionalizado que a superfície do corte será apresentada com conforme mostrado na Fig. 19.21(a) e a seção transversal da peça cortada com o hachurado ilustrado na Fig. 19.21(b).

□ Superfície e geometria do corte de boa qualidade, sempre apresentando estrias: Fig. 19.21(a).

□ Defeitos do corte devidos direta, ou indiretamente, ao bico:

▪ Bico não ortogonal à chapa, resultando em borda inclinada: Fig. 19.22(a);

▪ Canal do oxigênio de corte sujo, ou danificado, provocando distúrbio no jato de gás e resultando em face distorcida: Fig. 19.22(b);

▪ Distância excessiva do bico a peça, provocando: Fig. 19.22(c) mordedura com escória; e/ou Fig. 19.22(d) bordas arredondadas; e/ou Fig. 19.22(e) rasgo convergente;

▪ Distância muito pequena do bico a peça resultando: Fig. 19.22(b) face distorcida; e/ou Fig. 19.22(d) bordas arredondadas; e/ou Fig. 19.22(f) crateras;

▪ Excessivo diâmetro do bico, resultando em bordas arredondadas: Fig. 19.22(d);

▪ Muito pequeno diâmetro do bico provocando: Fig. 19.22(g) interrupção do corte; e/ou Fig. 19.22(h) aderência de escória na base da peça.

□ Defeitos devidos direta, ou indiretamente, à incorreta regulagem da vazão, ou pressão dos gases:

▪ Chama de pré-aquecimento muito intensa, resultando em excessiva fusão da borda superior: Fig. 19.22(i);

▪ Excessiva vazão do oxigênio de pré-aquecimento, provocando excessiva fusão da borda superior: Fig. 19.22(i);

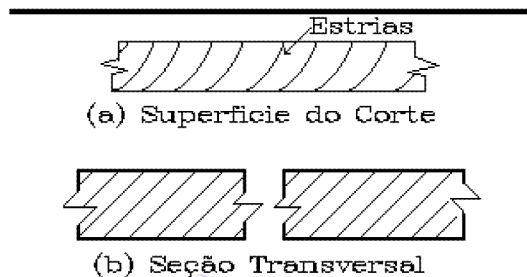


Figura 19.21 - Convenção empregada para ilustrar a Qualidade do Corte.

▪ Chama de pré-aquecimento pouco intensa produzindo: Fig. 19.22(j) caneluras contínuas; e/ou Fig. 19.22(g) perda do corte;

▪ Excessiva pressão do oxigênio de corte provocando: Fig. 19.22(l) alargamento do rasgo; e/ou Fig. 19.22(m) arredondamento da borda inferior; e/ou Fig. 19.22(h) aderência de escória;

▪ Insuficiente pressão do oxigênio de corte resultando: Fig. 19.22(g) perda do corte; e/ou Fig. 19.22(j) caneluras contínuas.

□ Defeitos devidos direta, ou indiretamente, à incorreta velocidade de corte:

▪ Velocidade muito baixa provocando: Fig. 19.22(i) fusão da borda superior; e/ou Fig. 19.22(j) caneluras; e/ou Fig. 19.22(h) excessiva produção de escória;

▪ Excessiva velocidade resultando: Fig. 19.22(l) alargamento do rasgo; e/ou Fig. 19.22(g) não realização do corte na parte final da peça.

□ Defeitos devidos direta, ou indiretamente, ao material base:

▪ Superfície da peça com excessiva proporção de materiais estranhos (carepa, ferrugem, etc.) resultando: Fig. 19.22(n) pontos fundidos sobre a superfície; e/ou Fig. 19.22(o) crateras;

▪ Material com delaminação, resultando em

interrupção do corte: Fig. 19.22(g);

- Aço com alto carbono e/ou elementos de

liga que aumentam a temperabilidade, resultando em trincas.

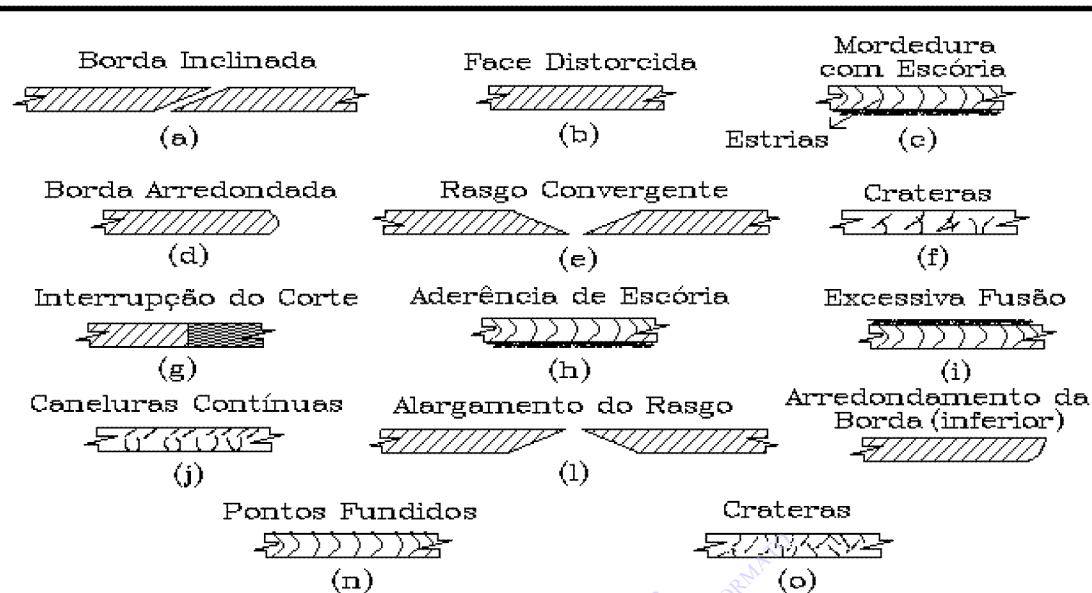


Figura 19.22 - Defeitos do Corte (vide texto).

CORTE COM PLASMA

INTRODUÇÃO

Este processo de corte foi desenvolvido em torno de 1955 e rapidamente se destacou como uma importante opção entre os métodos até então existentes. O corte Plasma utiliza os mesmos princípios do equipamento para soldagem, como descrito no **Capítulo 9**. O arco sofre constrição, forma o plasma e funde a peça, sendo que o próprio jato desse gás altamente ionizado remove o material por arraste, ou também é utilizado um gás auxiliar (muitas vezes oxidante). As temperaturas alcançadas são da ordem de 25.000 K significando, portanto, que o Plasma pode ser aplicado sobre qualquer material, mesmo naqueles não condutores de eletricidade, operando no método de arco não-transferido. Por outro lado, é importante frisar que esse corte é realizado por fusão, não por oxidação como no oxigás, sendo possível obter pequena extensão da ZAC; baixa deformação e alta qualidade.

A Fig. 19.23 mostra esquematicamente um sistema de corte. O início do arco geralmente é realizado através de uma centelha formada por um ge-

rador de alta frequência, entre o eletrodo e o bocal, estabelecendo o chamado arco piloto. Posicionando a tocha suficientemente perto da peça, forma-se um arco entre o eletrodo e a mesma. O arco é então constriado e o plasma expandido é lançado em alta velocidade contra a superfície da peça.

Para corte manual (raramente executado, devido à dificuldade de se manter constante a distância bocal/peça) a fonte utilizada é do tipo corrente constante (“tombante”). Para iniciar o arco, a tensão de circuito aberto deve ser bem mais alta do que a dos processos de soldagem a arco (entre 150 e 400 V) sendo que precauções especiais de segurança devem ser tomadas. A capacidade de corte dos equipamentos é decidida pela corrente máxima, sendo que atualmente são classificados

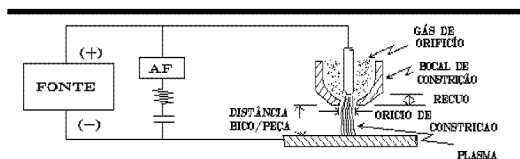


Figura 19.23 - Sistema Esquemático para Corte Plasma.

em: (a) Baixa potência, com 30 A ou menos; (b) Média potência, de 30 a 100 A; (c) Alta potência, entre 100 e 1000 A.

PARÂMETROS E GASES

Com a correta combinação da potência do arco e velocidade do corte, para um dado tipo e espessura de material, a coluna do plasma penetra completamente no mesmo, sendo a região do ânodo estabelecida no nível da superfície inferior da peça. Excessivas velocidade de corte, ou distância do bico à peça, provoca redução da penetração.

Os parâmetros ótimos dependem do equilíbrio entre a quantidade de calor necessária para fundir e evaporar um volume de metal, e aquele cortado por unidade de tempo, ou seja:

$$f \cdot I \cdot U = e \cdot \rho \cdot l \cdot \Delta Q \cdot V \quad [19.7]$$

onde:

f = fator de utilização da potência disponível (adimensional e, em geral, igual a 0,4 - veja abaixo);
I, U = corrente e tensão de soldagem, respectivamente (A, V);

e = espessura do material a ser cortado (mm);

ρ = massa específica (g/mm³);

l = largura média do corte (mm);

ΔQ = quantidade de calor gasta numa unidade de massa removida (J/g);

V = velocidade de corte (mm/s).

O fator de utilização da potência disponível (f) é de difícil determinação, sendo resultante do produto $r \times \eta$, onde r representa o rendimento do processo e η a eficiência térmica para uma dada condição. Portanto, f depende, também, dos seguintes itens: (a) Coeficiente de condutividade térmica do material cortado, sendo que quanto maior for o mesmo, menos calor gerado pelo arco será gasto para pré-aquecer o material; (b) Velocidade de corte, aumentando até num certo limite com a mesma.

Por sua vez, considerando que somente uma insignificante porção de calor super-aquece o metal fundido e que não há reação exotérmica envolvida, a quantidade de calor gasta numa unidade de massa removida (ΔQ em J/g) é aproximadamente dada por:

$$\Delta Q = c_1 \cdot (T_f - T_o) + L_f + k \cdot c_2 \cdot (T_e + T_f) + k \cdot L_e \quad [19.8]$$

onde:

c_1, c_2 = calores específicos médios dos materiais

nos intervalos de temperatura $T_o + T_f$ e $T_f - T_e$, respectivamente (J.g⁻¹.K⁻¹);

T_f, T_o, T_e = temperaturas de fusão, inicial e de ebulição do material, respectivamente (K);

L_f, L_e = calores latentes de fusão e ebulição do material, respectivamente (J/g);

k = proporção do metal evaporado (geralmente entre 0,05 e 0,1).

Em geral, L_e pode ser aproximadamente estimado por:

$$L_e = 88 \cdot T_e / A \quad (J/g) \quad [19.9]$$

onde A é a massa atômica do metal.

Por outro lado, da equação 19.7 obtém-se V:

$$V = k_1 \cdot (IU) / (l \cdot e) \quad (mm/s) \quad [19.10]$$

onde k_1 é constante e resulta de $f / (\rho \cdot \Delta)$.

Portanto, é possível aumentar a velocidade de corte através de: (a) Maior tensão (não da corrente - veja porque mais abaixo); (b) Uso de gases moleculares, tais como ar, nitrogênio, oxigênio, hidrogênio, etc.; (c) Aumento da constrição do arco, ou seja, maior densidade de corrente (atualmente é possível alcançar densidade de corrente tão alta quanto 100 A/mm², sendo que um maior valor pode provocar a formação de um segundo arco).

Com espessuras acima de 70 mm, a densidade de corrente no nariz do bocal possui menor influência sobre a eficiência do corte, sendo esse fato devido a: (a) Redução da constrição da coluna; (b) Caída excessiva da temperatura do plasma; (c) Diminuição da velocidade do jato plasma com a distância. Isso induz a que se aumente substancialmente a corrente, o que provoca: (a) Aumento na largura do corte; (b) Redução da eficiência térmica e do rendimento, o que resulta na diminuição da velocidade e menor qualidade do corte.

Por outro lado, o gás de orifício é de extrema importância para a qualidade e produtividade do corte, sendo que os seguintes são geralmente utilizados:

□ Hidrogênio

Máxima entalpia e alta condutividade térmica, resultando num plasma com grande rendimento e eficiência térmica. Isso faz com que esse gás (e misturas com o mesmo) propicie o uso das

mais altas velocidades de corte, sendo indicado para peças muito espessas de aços alta liga; cobre e alumínio. Outrossim, é mais econômico o uso de gases que contenham hidrogênio, como a amônia ($75\% \text{H}_2$ e $25\% \text{N}_2$) que é facilmente obtida, além de não existir o perigo de explosão. O consumo típico desses gases é de 2 a 4 m^3/h .

O uso de mistura gasosa com alta proporção de hidrogênio, faz com que o isolamento térmico da tocha deva ser reforçado, devido à maior condutividade térmica do mesmo. Portanto, é aconselhável se adicionar, no mínimo, 20% de argônio à essa mistura.

□ Nitrogênio

Utilizado geralmente sobre aços ao carbono, inoxidáveis e alumínio de média espessura. A qualidade é pior e menor a velocidade do corte, do que quando gases contendo hidrogênio são utilizados. Além disso, é usual se formar sobre a superfície do corte uma camada com cerca de 0,15 mm de profundidade, contendo grande proporção desse elemento.

□ Ar

O ar (comprimido) é certamente o mais abundante, simples e econômico gás disponível. É geralmente utilizado com eletrodo de zircônio, ou háfnio. Como consequência da reação de oxidação com o ferro, a velocidade do corte nos aços é cerca de duas vezes maior do que quando nitrogênio é utilizado, além da superfície apresentar melhor qualidade.

Em aços ao carbono com até 50 mm de espessura, o corte com plasma empregando ar pode ser entre 1,5 a 2 vezes mais econômico do que com oxigás. Outrossim, o mesmo pode ser vantajosamente utilizado sobre não-ferrosos, mas é relativamente baixa a qualidade do corte.

□ Vapor d'Água

É uma fonte de baixo custo de hidrogênio. O plasma com vórtice d'água (com gás do orifício geralmente nitrogênio), como é denominado, é uma eficiente modificação do método convencional, sendo que a Fig. 19.24 apresenta o princípio de funcionamento de um modelo de tocha. Entretanto, com a atual tecnologia, o equipamento não apresenta a necessária confiabilidade.

□ Argônio

Esse é um gás de custo relativamente elevado, escasso e de pequena entalpia, sendo o menos econômico de todos. Entretanto, devido à bai-

xa tensão do arco que forma, o mesmo tem sido usado para corte manual, ou combinado com o nitrogênio.

Além dos gases acima citados, outras combinações são também utilizadas, ou seja: argônio-hidrogênio; nitrogênio-hidrogênio; argônio-nitrogênio-hidrogênio; nitrogênio com injeção d'água na tocha em vórtice (veja essa tocha abaixo). Outrossim, um interessante ponto que chama a atenção, é que o uso de diferentes gases não implica em vazões muito distintas, se todas as outras condições forem idênticas.

TÉCNICA E APLICAÇÕES

Devido à mais alta velocidade de corte, o Plasma provoca menos distorção, em geral, do que o Oxicorte. Em aços ao carbono, a maior aplicação desse processo é sobre peças com espessuras de até 13 mm, mas aquelas com até 50 mm podem ser cortadas. Além disso, excepcionalmente com a atual tecnologia, aços inoxidáveis com até 100 mm e alumínio de 250 mm, tem sido também economicamente cortados com Plasma.

A velocidade e a qualidade do corte, são muito influenciados pelo gás de orifício utilizado, sendo que um bom fabricante de equipamento deve fornecer as informações com os apropriados parâmetros. Deve-se notar, ainda, que a velocidade de corte com o Plasma diminui radicalmente com o aumento da espessura do material, sendo na Fig. 19.25 apresentado a variação desse parâmetro, em função da espessura, para chapa de aço baixo carbono, comparando plasmas formados por diversos gases (mesma corrente de 200 A) e o oxiacetileno. Note-se que até em torno de 20 mm o oxiacetileno realiza o corte mais lentamente, mas à partir dessa espessura, o mesmo é o mais rápido, com exceção do plasma-ar, em que isso ocorre a cerca de 25 mm. Outrossim, até uma espessura de

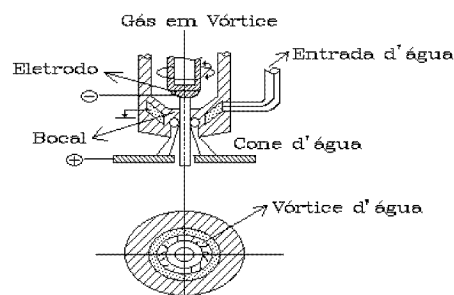


Figura 19.24 - Plasma com Vórtice D'água.

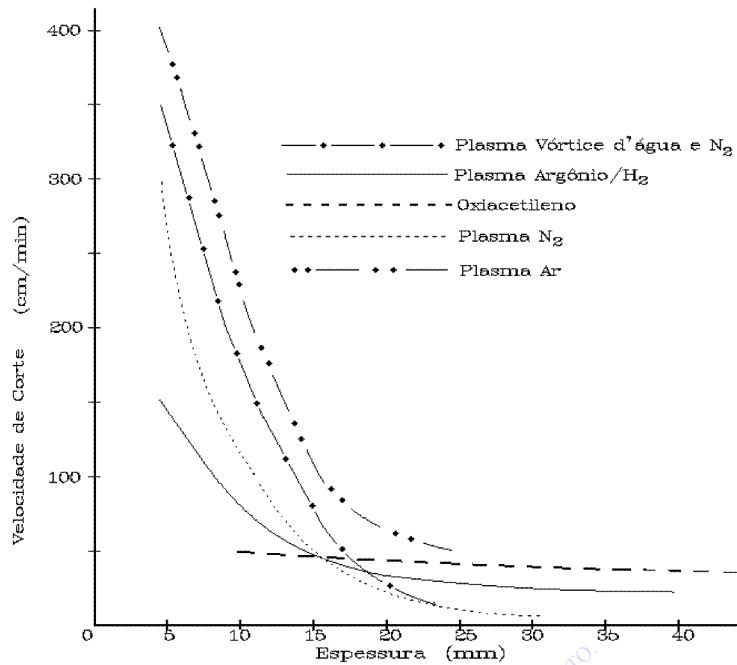


Figura 19.25 - Velocidade de Corte para Plasma com Diversos Gases e Oxiacetileno, em Função da Espessura da Peça.

20 mm, os gases se posicionam na seguinte ordem crescente de velocidade de corte: argônio/hidrogênio; nitrogênio; nitrogênio com vórtice d'água; ar. A partir dessa espessura, há uma inversão, sendo que acima de 30 mm a mistura argônio/hidrogênio apresenta uma melhor performance.

Por outro lado, o corte Plasma produz, inerentemente, grande nível de ruído. A intensidade desse ruído depende da corrente empregada, sendo de aproximadamente 100 dB a uma distância de 2 m de um equipamento operando a 400 A, ou de 110 dB quando a corrente alcança 750 A, numa frequência entre 5000 e 20.000 Hz. Algumas técnicas são geralmente empregadas, tanto para diminuir o nível desse ruído, quanto para minimizar a emissão de fumos para o ambiente de trabalho. A primeira consiste no posicionamento da peça exatamente sobre uma superfície d'água, com as condições de corte se mantendo aproximadamente similares ao corte convencional e criar uma cortina d'água de alta pressão envolvendo o bocal. A água pode ser re-circulada, numa vazão entre 55 a 75 l/min. O corte submerso também é empregado, com a superfície da peça numa profundidade entre 20 a 30 mm, sendo que nesse caso a velocidade sofre grande redução, com exceção do Plasma com vórtice d'água, o qual foi visto acima.

Outrossim, a **Tab. 19.6** apresenta algumas su-

gestões de parâmetros de corte, para aços ao carbono e inoxidáveis além de alumínio e suas ligas. Nessa tabela, a vazão dos gases varia desde cerca de 47 l/min para um orifício com 3,2 mm de diâmetro, até em torno de 94 l/min para um diâmetro dessa peça igual a 4,8 mm.

QUALIDADE DO CORTE

Na Introdução desse Capítulo, foram discutidos diferentes aspectos que podem ser estabelecidos para analisar a qualidade do corte. Com a atual tecnologia para o Plasma, em particular, são enfatizados os seguintes fatos:

- Em espessuras de até 75 mm, o Plasma produz cortes de alta qualidade, comparáveis ao Oxicorte. Entretanto, acima dessa espessura, a superfície se torna progressivamente mais grosseira. Em aços inoxidáveis, acima de 125 mm de espessura, é muito pequena a vantagem desse processo sobre o Oxicorte com adição de pó de ferro;
- A largura do rasgo aumenta notavelmente com a espessura da peça, sendo em torno de 25 mm para aço inoxidável com 180 mm. Para chapas com até 50 mm de espessura, a largura provocada pelo Plasma é cerca de 1,5 vezes maior do que a por Oxicorte.;

Tabela 19.6 - Condições para Corte Plasma de Aços ao Carbono, Inoxidáveis e Alumínio

Espessura (mm)	Velocidade (mm/s)	Diâmetro do Orifício (mm)	Corrente (A)	Potência (kW)
AÇOS AO CARBONO (a)				
6	90	3,2	275	55
13	40	3,2	275	55
25	20	4,0	425	85
50	10	4,8	550	110
AÇOS INOXIDÁVEIS (b)				
6	90	3,2	300	60
13	40	3,2	300	60
25	20	4,0	400	80
50	9	4,8	500	100
75	7	4,8	500	100
100	3	4,8	500	100
ALUMÍNIO E SUAS LIGAS (b)				
6	127	3,2	300	60
13	90	3,2	250	50
25	40	4,0	400	80
50	9	4,0	400	80
75	6	4,8	450	90
100	5	4,8	450	90
150	3	6,4	750	170

(a) Gases: ar comprimido, ou nitrogênio com até 10% de hidrogênio; (b) Gases: nitrogênio ou argônio com até 35% de hidrogênio

- O Plasma geralmente remove mais metal da superfície da chapa do que de sua base, provocando um ângulo típico de 5° num chapa de aço ao carbono com 25 mm de espessura;

- A produção de escória aderente é outro problema encontrado no corte Plasma, sendo que dificilmente se pode eliminá-la em aço ao carbono com espessura superior a 40 mm, ou alumínio e aços inoxidáveis acima de 75 mm;

- O arredondamento das bordas pode ser provocado, ou por excessiva potência, ou por muito grande distância bocal/peça. Outrossim, esse defeito também pode ser produzido por uma muito alta velocidade de corte, especialmente sobre materiais relativamente finos (espessura menor do que 6 mm);

- A extensão da ZAC no metal base é inversamente proporcional à velocidade do corte. Num aço inoxidável com espessura de 25 mm, cortado a 21 mm/s, a mesma se situa entre 0,08 e 0,13 mm, enquanto no alumínio essa ZAC é bastante maior.

A Parte 4 da DIN 2310 especifica parâmetros para qualificação de chapas metálicas, com espessura “a” entre 1 e 100 mm da seguinte forma:

□ Paralelismo e Tolerância de Inclinação (U)

Esse fator U(mm) é definido em função da espessura da chapa, sendo:

- Zona 1: $U \leq (0,8 + 0,022.a)$;
- Zona 2: $(0,8 + 0,022.a) \leq U \leq (1 + 0,03.a)$;
- Zona 3: $(1 + 0,03.a) \leq U \leq (1,5 + 0,045.a)$.

❑ Tolerância de Rugosidade (R_z)

Esse parâmetro não pode ser especificado para o alumínio, magnésio e suas ligas, já que geralmente a superfície do corte é excessivamente grosseira. Para os outros materiais, R_z (mm) é dado em função da espessura da peça:

- Zona 1: $R_z \leq (50 + 0,5.a)$;
- Zona 2: $(50 + 0,5.a) \leq R_z \leq (80 + a)$;
- Zona 3: $(80 + a) \leq R_z \leq (130 + 1,5.a)$.

Portanto, com U , R_z e o auxílio da **Tab. 19.1**, pode ser determinado o Grau (qualidade) do corte.

CORTE COM LASER

CARACTERÍSTICAS

Para melhor entender esse processo, o leitor deve rever o **Capítulo 14**, no qual foram explicados os princípios físicos e detalhados os seus equipamentos.

O corte com LASER é realizado através de um feixe com alta densidade de potência, geralmente entre 10^4 e 10^5 W/mm², o qual funde e/ou vaporiza o material base. O “keyhole” (furo controlado) é produzido na peça, conforme ilustrado na **Fig. 19.26**, após encerrado o transiente inicial. É empregado um jato de gás auxiliar para remover o material fundido e, em certos casos, acelerar o processo, através da reação exotérmica entre os mesmos.

A operação de furar materiais é similar ao corte, mas com feixe do tipo pulsado e empregando mais alta potência, aplicada em intervalos de tempo muito menores.

De forma geral, as principais características desse processo são as seguintes:

- O mercado mundial tem crescido cerca de 20% ao ano, em média;
- A realização de furos com LASER se processa através do tipo pulsado, de alta densidade de potência e pulsos mais curtos que no caso do corte. Furos podem ser feitos com diâmetros de 0,0025 a 1,5 mm e profundidade em geral menores do que 25 mm (pois há limitação no comprimento do foco). Os equipamentos industriais para essa aplicação são principalmente do tipo Nd:YAG;
- Um LASER do tipo CO₂ de alta potência pode cortar, com a atual tecnologia, até 25 mm de aço ao carbono. Entretanto, cortes de boa qualidade são realizados em menores espessuras - até 9,5 mm - devido à limitada profundidade de foco do feixe;
- O LASER corte é dominado pelos do tipo CO₂, de 400 a 1500 W. Os do tipo Nd:YAG são também usados. No modo contínuo, o diâmetro do feixe é da ordem de 1 mm;
- O uso de CNC aproveita muito melhor a alta taxa de produção e qualidade oferecida pelo LASER.
- Principais vantagens gerais do corte com LASER: (a) Muito alta velocidade de corte; (b) Pouca perda de material; (c) Alta qualidade; (d) Baixa energia; (e) Mínima distorção; (f) Possibilidade de cortar a maioria dos materiais; (g) Alta reprodutibilidade.

São utilizados para o corte, equipamentos com princípios similares àqueles descritos no Capítulo 14 para soldagem. Por outro lado, cada tipo de LASER opera segundo os seguintes mecanismos básicos:

❑ LASER no Estado Sólido (Nd:YAG)

Corte realizado por volatilização, ocorrendo numa densidade de potência maior do que 10^5 W/mm². Opera no modo pulsado para realizar furos, com frequências geralmente menores do que 200 Hz.

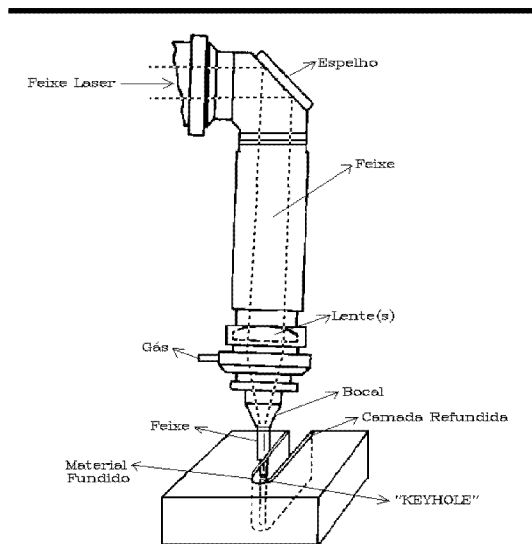


Figura 19.26 - Corte com LASER.

❑ LASER a Gás CO₂

Opera tanto no modo pulsado (com frequências que podem alcançar 10 kHz) quanto no contínuo. São dois os modos que o corte é realizado:

- Por fusão, com o material líquido removido por um gás auxiliar inerte e densidade de potência maior do que 10^4 W/mm²;
- Condições similares à anterior, mas com o gás sendo oxigênio e ocorrendo, por isso, reação exotérmica.

❑ LASER EXCIMER

O corte é realizado por ablação, ou seja, a ligação molecular do material (geralmente polímeros) possui energia menor do que a do feixe. Opera no modo pulsado com baixa potência (cerca de 200 W) e comprimento de onda de 248 nm.

Devido à alta refletividade da maioria das superfícies metálicas, a absorção do LASER pelo material é baixa, sendo função da temperatura e existindo sempre, portanto, uma fase transiente no início do corte, como mostrado na Fig. 19.27. A profundidade do corte é controlada pela relação de fusão e evaporação, sendo que com potências menores do que $5 \cdot 10^3$ W/mm², somente a superfície da peça funde. Para ocorrer o “keyhole” é necessária uma densidade de potência entre 10^4 a 10^5 W/mm².

Os seguintes gases auxiliares são geralmente utilizados, dependendo do material:

- Ar: Alumínio (até 1,5 mm); Plástico (especial cuidado com o material decomposto); Madeira; Compósito; Vidro; Quartzo (praticamente transparente ao comprimento de onda do Nd:YAG, ou 1,06 mm).

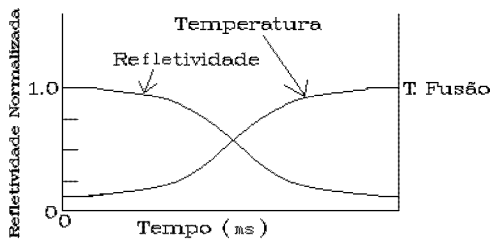


Figura 19.27 - Redução da Refletividade e Aumento da Temperatura da Superfície Atingida pelo Feixe LASER.

- Argônio: Titânio e outros materiais que precisam ser isolados da atmosfera. O alumínio também pode ser cortado com vantagem.
- Nitrogênio: Aço Inoxidável; Níquel; Alumínio.
- Oxigênio: Aço ao Carbono; Aço Inoxidável; Cobre.

Outro fator importante que deve ser considerado, é o balanço de energia no corte LASER. Como mostrado na Fig. 19.28, as fontes de energia são o próprio feixe e (quando existir) a reação exotérmica do gás auxiliar. Na frente de fusão ocorre uma delicada situação, pois na falta de absorção do feixe nesse ponto, o corte não é produzido. Por sua vez, a eficiência dessa absorção depende, dentre outros fatores, de: (a) Largura do rasgo; (b) Inclinação instantânea da frente de fusão; (c) Polarização do feixe; (d) Distribuição da intensidade do feixe nas direções longitudinal e radial.

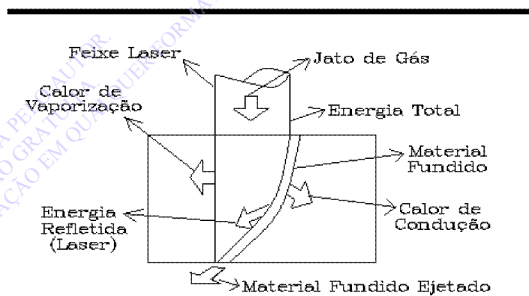


Figura 19.28 - Distribuição da Energia Gerada pelo LASER.

Como visto no Capítulo 14, se o feixe for linearmente polarizado, a qualidade do corte depende de sua direção; se o mesmo for circularmente polarizado, o corte pode ser realizado com boa qualidade nas duas direções. Entretanto, a polarização circular diminui a eficiência do corte. Num ângulo de incidência de 85°, até 80% do feixe é absorvido se estiver linearmente polarizado; por sua vez, somente 40% é absorvido estando o feixe circularmente polarizado, mesmo no ótimo ângulo de incidência.

Outrossim, a profundidade do foco de um LASER tipo CO₂ pode variar desde 0,25 mm até cerca de 2 mm. Dessa forma, se deve tomar muito cuidado para mantê-lo numa mesma posição relativa, quando se está cortando peças irregulares.

APLICAÇÕES

As principais variáveis do corte a LASER são:

□ Aquelas que dependentes do Material (além do seu tipo), as quais incluem:

- Espessura da peça: a velocidade é inversamente proporcional à espessura;

- Acabamento da superfície: materiais com a superfície muito polida, podem não ser cortados e, o que é pior, refletirem o feixe, podendo até causar a destruição do equipamento (alumínio e cobre, principalmente); materiais estranhos na superfície também podem diminuir a qualidade do corte, ou mesmo impedi-lo.

□ Particularidades do Processo, encontrando-se entre as mesmas:

- Potência: No feixe contínuo, a densidade de potência pode definir sua capacidade, sendo que esse tipo é preferido para materiais tais como aços de grande espessura. Entretanto, na operação pulsada, mesmo a potência nominal (média) sendo pequena, a de pico é que interessa e, na maioria das vezes, a mesma é elevada;

- Modo (TEM): O TEM₀₀ (Gaussiano) é o ideal para corte, apresentando o menor diâmetro e o maior comprimento de foco;

- Ciclo de Trabalho: depende do tipo específico de equipamento e modo de operação (pulsado/contínuo);

- Focagem: o diâmetro e profundidade de foco do feixe são controlados pelo comprimento de foco da lente. Para um LASER CO₂, por exemplo, cujo diâmetro do feixe antes de ser focado é de 20 mm, tem-se:

- Lente com comprimento de foco 64 mm: diâmetro do feixe útil de 0,125 mm; profundidade de foco 0,125 mm. Como o diâmetro do foco é pequeno, é possível cortar em alta velocidade, com muito bom acabamento da superfície e pequeno rasgo. Entretanto, devido à pequena profundidade de foco, é mais adequado para peças com espessura menores do que 3,2 mm;

- Lente com comprimento de foco 125 mm: diâmetro do feixe útil de 0,25 mm; profundidade de foco 0,5 mm. É o comprimento de foco mais popular para esse tipo de LASER, podendo cortar satisfatoriamente peças com espessuras entre 0,25 a 10 mm;

- Lente com comprimento de foco 250 mm:

diâmetro do feixe útil de 0,5 mm; profundidade de foco 2 mm. Próprio para espessuras de metal superiores a 10 mm e materiais orgânicos. Devido à relativamente grande profundidade de foco, o rasgo desvia menos da ortogonal à superfície do que nos outros casos.

- Gás Auxiliar: veja os tipos e aplicações no item anterior. A pressão do jato é praticamente zero no corte de acrílico, ou outros materiais orgânico, pois há decomposição dos mesmos na metade da altura do rasgo, alargando-o. Para cortes com gases inertes, essa pressão pode alcançar até 830 kPa, mas nos aços, com oxigênio, geralmente se situa entre 70 e 140 kPa, pois acima desse valor, pode causar fusão incontrolável do mesmo;

- Diâmetro do Bocal (coaxial com o feixe): deve possuir uma alta razão entre seu comprimento e diâmetro. Os diâmetros geralmente utilizados se situam entre 0,75 e 3,2 mm. Um aço com 6,3 mm de espessura, por exemplo, deve empregar um bocal com diâmetro superior a 1,5 mm. Um diâmetro menor não permite que o jato expulse o material fundido da parte inferior do rasgo. Por outro lado, um excessivo diâmetro do bocal resulta em desperdício de gás;

- Distância do Bocal à Peça: essa dimensão controla a pressão exercida pelo gás auxiliar sobre o metal fundido. Geralmente a velocidade desse gás é supersônica e, portanto, não é linear a relação entre esses fatores. Como são produzidos complexos campos de pressão, a mesma pode diminuir quando o bocal é mantido muito perto da peça. Típicas distâncias são similares ao diâmetro do bocal;

- Ponto Focal: obtido por testes. Geralmente o mesmo se situa na superfície da peça, ou numa pequena distância abaixo da mesma. Entretanto, sendo utilizado gás inerte, a adesão da escória é minimizada se esse ponto estiver bem mais abaixo da superfície. O mais fino rasgo indica o melhor ponto;

- Alinhamento e Concentricidade do Feixe: o feixe deve estar perfeitamente alinhado no interior do equipamento e passar no centro do bocal, o qual também é percorrido pelo jato de gás. O fabricante do equipamento deve fornecer precisas instruções e dispositivos para proceder essa operação.

Além dessa variáveis, a determinação da velocidade deve ser realizada, de forma que a relação custo/benefício desejada seja atendida. Na **Tab. 19.7** são sugeridas algumas condições para o corte por LASER de diferentes materiais.

Tabela 19.7 - Condições Típicas para Corte LASER sobre Diferentes Materiais

Material	Espessura (mm)	Velocidade (mm/s)	Potência (W)	Gás Auxiliar
Acrílico	6	28	400	-
Aço ao carbono	1,5	60	400	Oxigênio
	3,2	50	800	Oxigênio
	6,3	34	1200	Oxigênio
	9,5	21	1500	Oxigênio
Aço Inoxidável	1,5	60	1500	Nitrogênio
	3,2	17	1500	Nitrogênio
	6,3	17	650	Oxigênio
	9,5	13	800	Oxigênio
Cerâmica (telha)	6,3	5	400	-
	Formica	1,6	130	400
Madeira (compensada)	18	8	400	-
Papelão	0,1	1600	400	-
Plástico ABS	4	75	400	-
Titânio	3	68	400	-
Ti6Al4V	1,5	60	1500	Argônio

QUALIDADE DO CORTE

A Parte 5 da DIN 2310 trata somente qualitativamente do corte realizado por LASER. Comparando com os outros processos estudados, em geral o mesmo apresenta melhor acabamento; menor largura do rasgo; muito pouca distorção e superfície muito mais lisa (dependendo da espessura do material).

Típicos resultados possíveis de se obter em produção são:

- **Largura do Rasgo**

Em qualquer processo de corte o rasgo deve ser o mais estreito possível. Além de diminuir a perda de material, a ZAC e a distorção são minimizadas. A menor largura do rasgo no LASER, é obtida através do uso de lente com pequeno comprimento de foco, como visto acima. Rasgos típicos produzidos por LASER CO₂ se situam entre (somente) 0,1 e 1 mm.

- **Rugosidade Média da Superfície do Corte**

Para um mesmo material, a rugosidade média da superfície de corte é diretamente proporcional à espessura da peça, dependendo de certas características do equipamento, tais como estabilidade e rigidez do feixe, bem como do siste-

ma de movimentação relativa feixe-peça. Além disso, o tipo de gás auxiliar empregado também tem influência sobre esse fator. Gases inertes, por exemplo, utilizam alta pressão para cortar e a turbulência criada aumenta a rugosidade da superfície. Chapas de aço ao carbono tão finas quanto 1,5 mm apresentam uma relativamente alta rugosidade (1,6 mm) com esse tipo de gás. Entretanto, usando oxigênio como gás auxiliar, chapas de aço ao carbono com 1 mm de espessura são cortadas com superfície de rugosidade menor do que 0,8 mm, mas é praticamente impossível obter rugosidade menor do que 6,3 mm com espessura igual ou superior a 9,5 mm. Por sua vez, acrílico em espessura de até 25 mm apresenta rugosidade tão pequena quanto 0,2 mm, desde que o fluxo do gás auxiliar seja suficientemente baixo para evitar turbulência.

- **Aderência de Material**

Escória ou metal podem permanecer aderidos à parte inferior do rasgo. Esse defeito geralmente ocorre quando: (a) O foco está mal posicionado, e/ou; (b) A pressão do gás auxiliar é muito baixa, e/ou; (c) A velocidade de corte é muito alta. Particularmente nos aços inoxidáveis e alumínio, mesmo em seções finas, uma muito alta pressão do gás auxiliar é necessária para eliminar essa aderência e pode-se utilizar, inclusive, um anti-aderente sobre a superfície inferior, tal como grafita.

CORTE COM O ARCO ELÉTRICO

ELETRODO DE CARVÃO/GRAFITA

Esse é o método mais popular entre todos que serão aqui apresentados, tendo sido desenvolvido na sua forma atual em torno de 1948, sendo hoje provavelmente mais utilizado para goivagem (veja a seção seguinte), do que realmente corte.

Essencialmente, o processo consiste num eletrodo de carvão aglomerado com grafita, o qual forma um arco elétrico com a peça a ser cortada. Simultaneamente, um jato de ar expulsa o material fundido, por ação mecânica, conforme mostrado na Fig. 19.29, sendo que a operação pode ser manual, ou automática. Originalmente esse processo, desenvolvido durante a 2ª Grande Guerra Mundial, não possuía o jato de ar e, portanto, o eletrodo era utilizado na posição plana, com o metal fundido caindo por gravidade.

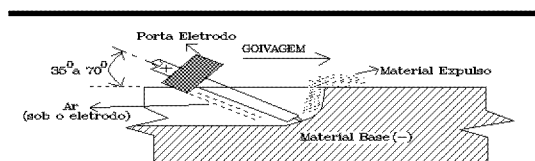


Figura 19.29 - Corte (Goivagem) com Eletrodo de Carvão/Grafita.

Portanto, esse processo não depende de nenhum fenômeno de oxidação para ocorrer, sendo a taxa com que o corte é realizado função da corrente do arco; da vazão e velocidade do jato de ar. Como consequência, além de aços ao carbono e baixa liga, são geralmente cortados aços inoxidáveis; a maioria das ligas de cobre, alumínio, magnésio e níquel; além de ferros fundidos.

O equipamento consiste principalmente de:

- Fonte de potência

São admitidas praticamente todas as fontes CA e CC, com curvas características plana, ou tombante. Entretanto, nem todo o tipo de fonte empregada na soldagem pode ser utilizada nesse processo, pois é geralmente muito grande o ciclo de trabalho e a tensão de operação tão alta quanto 55 V, sendo que o fabricante da mesma deve opinar a respeito.

- Porta-Eletrodo

O eletrodo é seguro num suporte rotativo, com vários orifícios, de forma que, seja qual for sua posição relativa à tocha, o jato de ar comprimido estará alinhado com o mesmo. Os porta-ele-

trodos são geralmente classificados com relação à robustez, sendo que aqueles para trabalhos leves podem operar com 450 A máximo em CC, enquanto os extra-pesados alcançam até 1600 A, ou 2000 A com cabos refrigerados a água.

- Ar comprimido

A pressão do ar comprimido oscila entre 560 (81) e 700 kPa (101 psi), com exceção das operações relativamente leves, nas quais a mesma pode ser de até 280 kPa (41 psi) com vazão de 8,5 l/min, sendo que essa condição e a vazão deverão ser ajustadas para cada situação específica. Quando ar não for disponível, é possível o emprego de nitrogênio, ou um gás inerte comprimido. Entretanto, oxigênio não deve ser utilizado.

- Eletrodos

Os eletrodos maciços são geralmente cilíndricos, mas formas do tipo chato e meia-cana tem sido empregados para produzir chanfros retangulares. Os diâmetros disponíveis geralmente se situam entre 3,2 e 25,4 mm.

O material do eletrodo mais utilizado, é aquele fabricado por extrusão de uma massa aglomerada de carvão e grafita, recoberto com uma camada de cobre e usado em CC. As suas principais características residem na baixa resistência elétrica que apresentam; relativamente longa vida útil e boa estabilidade do arco. Como consequência, os chanfros produzidos são bastante uniformes.

Outro tipo existente é similar ao anterior, mas sem recobrimento de cobre. O mesmo está sendo cada vez menos utilizado, pois sua vida útil é muito mais curta.

Para uso em CA, são também fabricados eletrodos similares ao primeiro tipo, mas com adição de terras raras à massa. Dessa forma é obtida a necessária estabilização do arco, permitindo o uso de transformadores.

A técnica da operação é conservar o eletrodo num ângulo de ataque de aproximadamente 75° com a peça, manter o jato de ar sempre sob o mesmo e cortar “empurrando”. Os parâmetros de corte são muito variáveis dependendo, dentre outros fatores, do tipo e espessura do material; qualidade desejada do corte; velocidade do corte; habilidade do operador e posição em que o corte está sendo realizado. Portanto, as recomendações do fabricante devem ser seguidas, bem como experiências prévias sempre realizadas. Somente a título ilustrativo, são indi-

cados na **Tab. 19.8** intervalos recomendados de corrente para alguns eletrodos recobertos com co-

bre, operando em corrente alternada (CA) e corrente contínua eletrodo positivo (CCEP).

Tabela 19.8 - Intervalos Típicos de Corrente para Eletrodos de Carvão/Grafita

Diâmetro do Eletrodo (mm)	CCEP (A)		CA (A)	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
4,0	90	150	-	-
4,8	150	200	150	200
6,4	200	400	200	300
9,5	350	600	300	500
12,7	600	1000	400	600

OUTROS MÉTODOS

▪ Eletrodos Revestidos

Praticamente qualquer tipo de eletrodo revestido pode ser utilizado para corte, operando de preferência em CCEN, sendo mais efetivos aqueles das classes AWS E6010, E6012 e E6020, mas existindo eletrodos especialmente projetados para esse fim. O método é mais utilizado em fundições de não-ferrosos; para cortes grosseiros de massalotes e canais de alimentação, apresentando baixa qualidade, sendo raramente utilizado para produção de chanfros, pois normalmente exige trabalho mecânico posterior.

A técnica de corte é simples, geralmente “empurrando” o eletrodo e posicionando o mesmo no furo provocado por uma adequada (alta) corrente, sem ocorrer curto circuito.

▪ TIG

Sob certas condições, pode ser realizado corte com um equipamento TIG convencional. O eletrodo deve ser posicionado cerca de 6 mm além

do bocal, sendo preferencialmente utilizado uma mistura de gases do tipo 65%Ar + 35%H₂, numa (alta) vazão em torno de 29 l/min. A qualidade do corte é média, encontrando aplicação para praticamente todos as ligas metálicas. A vida útil do eletrodo (geralmente W-2%Th₂O) é relativamente curta, devido à deficiente proteção e, também, às elevadas intensidades de corrente empregadas.

▪ Corte ao Arco com Oxigênio

Esse método, inicialmente desenvolvido para corte subaquático, emprega um tubo de aço baixo carbono, com revestimento similar ao de eletrodo revestido (geralmente da classe AWS E6013), o qual forma um arco elétrico com a peça, normalmente em CCEN. Um jato de oxigênio emerge pelo tubo, podendo oxidar catastrófica o metal, ou simplesmente expulsar mecânica o metal fundido. As superfícies de corte não são de alta qualidade e usualmente necessitam algum trabalho mecânico, caso a finalidade for para chanfros. A técnica de operação preferida é cortar “puxando” o tubo e exercendo uma leve pressão contra a peça.

CORTE SUBAQUÁTICO

Desde 1908 é realizado o corte subaquático, mas naquela época era utilizado o processo oxigás, com equipamento similar àquele empregado na superfície. Entretanto, a água prejudicava a estabilidade da chama e a operação de pré-aquecimento até a temperatura de ignição, sendo produzidos cortes de muito má qualidade.

No mês de setembro de 1928, o vapor City of Rome se chocou com o submarino S-51 da Marinha dos E.U.A.. Para realizar o salvamento do submersível, o qual encontrava-se a cerca de 40 m de profundidade, foi desenvolvida uma tocha para corte utilizando oxigênio e hidrogênio, com resultados animadores. Em seguida, essa tocha sofreu posteriores aperfeiçoamentos, tal como uma cortina adicional de ar comprimido em torno da chama, a qual melhora sua estabilidade e não permite o imediato contato da água com o metal aquecido.

Como regra geral, para cada 1 m de profundidade, deve ser acrescentado cerca de 12 kPa de pressão dos gases de corte em relação àquela utilizada na superfície. O acetileno, devido à máxima pressão de trabalho no cilindro ser de 103 kPa, não é empregado em profundidades maiores do que em torno de 6 m. Então, os gases geralmente considerados para essa situação são: (a) Mistura estabilizada de metilacetileno com propadieno (MAP), o qual pode cortar com segurança em lâminas d'água de até aproximadamente 60 m; (b) Hidrogênio, para muito grandes profundidades, pois sua pressão de cilindro alcança 14 MPa.

Como consequência, o método oxihidrogênio se tornou padrão, tendo sido extensivamente utilizado na 2ª Grande Guerra Mundial e até o início de 1960. Esse método oferecia um meio relativamente econômico e rápido para cortar aços ao carbono. Entretanto, o mesmo é impraticável para cortar materiais que não se oxidam tão rapidamente. Nessa época, então, os métodos ao arco elétrico e

tubo de aço com oxigênio substituíram o oxihidrogênio para uso em plataformas submarinas.

Durante a 2ª Grande Guerra Mundial, outro método também iniciou a ser melhor explorado, o qual foi o arco elétrico com jato de oxigênio. O mesmo pode ser aplicado para cortar qualquer metal, sendo efetivo em espessuras de até cerca de 50 mm de aço ao carbono, mas as superfícies se apresentavam irregulares. Com a implementação de um eletrodo ôco, com um jato de oxigênio passando pelo seu interior, o qual rapidamente oxida o metal fundido, ou o expulsa por arrasto, o corte foi sensivelmente melhorado. A superfície do metal deve estar limpa e geralmente é empregada intensidade de corrente no intervalo 300 a 400 A. Por sua vez, o eletrodo se consome rapidamente; em cerca de 1 minuto para o de aço e 10 minutos para os cerâmicos, os quais não são mais utilizados devido às quebras e custos. Tubos com revestimento similares aos de eletrodos convencionais ainda hoje são usados, pois é reduzido o consumo de oxigênio e o arco é mais estável.

Atualmente existem tochas especialmente projetadas para corte por chama com oxiacetileno; oxigênio e MAP e oxihidrogênio, além de ao arco elétrico com eletrodo (tubo) revestido e oxigênio.

Entretanto, hoje o método preferido é o denominado exotérmico, o qual foi introduzido em torno de 1975. O mesmo é similar àquele ao arco com oxigênio, na medida em que o arco inicia a combustão. A principal diferença, reside no fato de que o eletrodo possui material que se oxida e produz reações exotérmicas de tal intensidade, que o corte pode prosseguir, mesmo após a corrente ter sido interrompida. A temperatura alcançada é maior do que por qualquer outro método, sendo a taxa de corte o dobro daquela quando tubo de aço é empregado.

**C
A
P
Í
T
U
L
O

20**

**A ECONOMIA DA
SOLDAGEM**

INTRODUÇÃO	402
NOÇÕES GERAIS	404
Conceituação dos Custos	404
Depreciação	407
O Avanço Tecnológico	408
Gráficos de Produção Econômica	408
A Curva do Aprendizado	409
Os Efeitos da Inflação e da Produtividade	410
CUSTOS DA SOLDAGEM	411
Etapas Gerais	411
Estimativa dos Custos da Soldagem	415

INTRODUÇÃO

Numa economia global altamente competitiva, uma vez estabelecido pelo mercado o preço de venda para um dado produto, com um nível de qualidade especificado, a margem de lucro é principalmente determinada pelos custos envolvidos na sua fabricação.

Portanto, em soldagem e técnicas conexas, como de resto nas outras atividades industriais, fundamentalmente está em jogo o binômio produtividade e qualidade.

Produtividade é um conceito geralmente definido pela razão entre o ganho e o investido, com seus valores devidamente corrigidos para o instante considerado. Entretanto, apesar de sua aparência simples, a quantificação desse fator pode ser bastante complexa. Por exemplo, há inerente aumento da taxa de produção conforme se altera o processo de soldagem na seqüência manual; semi-automático; mecanizado; robotizado. Apesar de existirem óbvios ganhos de produtividade nas células (estações de trabalho) que realizarem tal modificação, é necessário que seu efeito sobre o restante da empresa seja devidamente avaliado, considerando no mínimo os seguintes aspectos:

- Deficiência no suprimento de componentes para estas células, diminuindo o ritmo previsto para a mesmas;
- Excesso de produção dessas células, em relação àquela que pode ser absorvida pelas outras unidades da empresa;
- Aumento de pessoal e/ou equipamentos nas outras unidades, para suprir, ou utilizar a produção destas células, aumentando os custos gerais.

Por outro lado, é preciso que o acréscimo de produtividade nessas células da empresa, seja comparado com outras similares a nível mundial. Além disso, a compra de um equipamento para aumentar a produtividade e/ou qualidade somente se justifica, após ter sido esgotadas todas as possibilidades daquele que está sendo utilizado.

Há de se considerar, ainda o (fundamental) aspecto humano envolvido na indústria da soldagem, não sendo possível exigir de um soldador mal remunerado e/ou trabalhando num ambiente insalubre, alta produção e com qualidade. Essa baixa produtividade não será conseqüência somente do descontentamento do funcionário mas, também, por sua impossibilidade física de trabalhar satisfatoriamente, mesmo contando com os recursos

mais avançados.

Apesar de não ser o objetivo desse Capítulo discutir a qualidade sob seus aspectos técnicos, ou de gerenciamento, é necessário reconhecer que a mesma é um fator muito importante na análise econômica da indústria da soldagem e técnicas conexas. Portanto, produzir com qualidade depende basicamente da mentalidade e postura da alta direção da empresa com relação a esta questão, sendo que a mesma deve atuar positivamente pelo menos sobre os seguintes itens:

- O nível de educação dos seus funcionários;
- As tecnologias disponíveis para fabricação;
- Os meios de controle;
- O gerenciamento da produção.

A expressão “...fazê-los bem na primeira vez...”, cunhada há mais de 30 anos por A.F. Feigenbaum, talvez nunca foi tão atual quanto na presente conjuntura mundial, apesar de muitos ainda não terem compreendido seu significado na total plenitude, ou seja: todos na empresa são responsáveis pela qualidade.

O efeito da manutenção de um relativamente alto padrão de qualidade sobre os custos é melhor entendido, quando se percebe que a fabricação de produtos defeituosos em relativamente alta proporção, não causa “somente” redução do lucro final. É surpreendente que esse fato ainda seja novidade para alguma empresas, pois foram sintetizadas por J.M. Juran há mais de 40 anos, quando o mesmo forneceu as coordenadas para a localização da sua famosa “Mina de Ouro”. Em outras palavras, os seguintes itens principais afetam de forma global a empresa e são diretamente dependentes do nível de qualidade do produto:

- Refugos;
- Retrabalho;
- Investigação das Causas dos Defeitos;
- Atrasos e Paradas da Produção;
- Descontos sobre os Produtos com Qualidade Inferior;
- Perda de Confiança do Consumidor;
- Excesso de Produção;
- Perda de Prestígio;
- Necessidade de Compras Adicionais;
- Excesso de Inspeções;
- Atendimento às Reclamações dos Clientes;
- Perda de Futuros Negócios;

- Baixo Moral dos Funcionários;
- Relações Díficeis com o Mercado.

Como conseqüência, não é difícil se chegar à conclusão de que qualidade e custos estão intrinsecamente relacionados, sendo falha a análise econômica que não levar em consideração esse fato. Entretanto, uma das mais importantes e difíceis decisões, geralmente tomada ainda no estágio do projeto, é o estabelecimento do nível de qualidade requerido para o produto. Para tanto, os padrões de qualidade precisam ser realisticamente especificados, sob pena de se inviabilizar a própria existência da empresa.

O simples controle da qualidade e análise dos dados coletados, com os intervalos de desvio tidos como imutáveis para a empresa, de há muito é uma atitude inaceitável. Na **Fig. 20.1** é mostrada a relação genérica existente entre o custo total da qualidade (pessoal; equipamentos; controles; máquinas; treinamentos; etc.) e o valor agregado ao produto pela mesma.

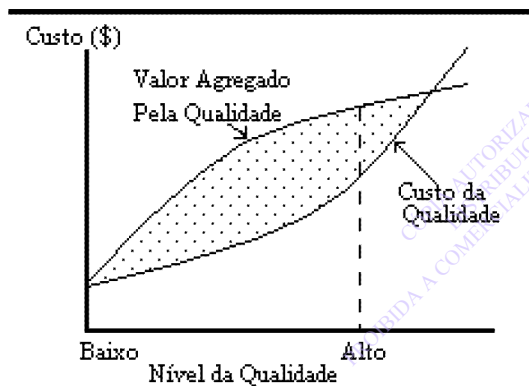


Figura 20.1 - Custo e Valor Agregado pela Qualidade.

Por outro lado, uma vez estabelecido os padrões de qualidade desejados para um dado produto, o mesmo deve ser fabricado com o mínimo custo. Isto implica na minimização da ocorrência de defeitos no mesmo, sendo que a **Fig. 20.2** ilustra a relação entre a proporção de unidades defeituosas e o custo total para sua produção, cuja função claramente apresenta um mínimo.

Desta forma, é fácil se perceber que:

- Produzir com baixa qualidade pode resultar em prejuízos, ou redução de ganhos;
- A cada situação de mercado, existe um limite no nível da qualidade, a partir do qual a mesma passa a custar mais do que agrega de valor ao

produto;

- Em cada instante, há um nível de qualidade mais vantajoso para a empresa;

Neste ponto é importante se salientar, que o nível da qualidade somente é determinado exclusivamente pelo produtor, quando estão operando monopólios, ou oligopólios, casos geralmente nocivos aos interesses dos consumidores. Na realidade, o nível mínimo da qualidade deve ser ditado pelo mercado.

Este fato aumenta de importância, quando se constata que internacionalmente a tendência da qualidade - tomada no sentido mais amplo possível - é de se movimentar constantemente para um patamar mais alto, por pressão tanto dos consumidores, quanto da concorrência. O deslocamento em questão deve ser permanentemente efetuado pois, como o valor agregado ao produto pela qualidade é aproximadamente constante para as diferentes empresas, todas buscam ganhar a competição também através desta solução. Além disso, aparentemente é infinita a progressão para níveis mais altos de qualidade e devem existir meios para a redução permanente de seu custo. Mas de que forma?

Entre a várias respostas para essa questão, salientam-se os seguintes meios:

- A conscientização dos funcionários da empresa;
- O desenvolvimento de fornecedores confiáveis;
- O domínio da tecnologia utilizada;
- As inovações tecnológicas.

O aspecto humano é primordial para que a empresa opere com alta qualidade, existindo programas bem estabelecidos e diversas técnicas gerenciais disponíveis para alcançar esse objetivo.

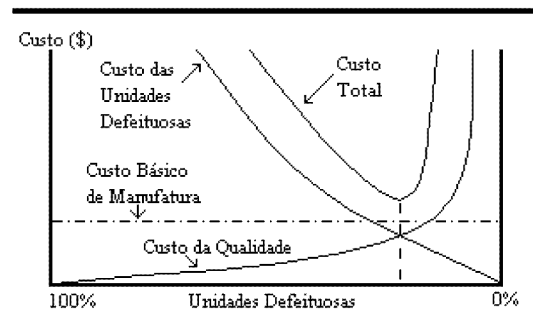


Figura 20.2 - Efeito da Proporção das Unidades Defeituosas sobre os Custos.

De forma geral, o funcionário geralmente produz com a melhor qualidade permitida pelos equipamentos que opera, desde que:

- Entenda perfeitamente as implicações do seu trabalho;
- Seja instruído convenientemente de como realizar suas tarefas;
- Participe da evolução da empresa, sendo informado tanto de seus problemas, quanto de seus sucessos;
- Receba um salário que lhe permitir viver com dignidade.

A questão do fornecimento de matéria prima e/ou componentes com qualidade garantida, é de vital importância para a redução dos custos. Existem inúmeros exemplos de empresas que não realizam inspeção no recebimento, pois desenvolveram fornecedores que mantêm qualidade assegurada. Na realidade, há de ser alterado o (muitas vezes distante e frio) relacionamento comprador-vendedor, para a cooperativa parceria.

Os outros dois itens mencionados, ou seja, domínio da tecnologia e inovações tecnológicas, dependem em grande parte do horizonte político, social e econômico, parcialmente também da empresa, mas fundamentalmente do país. O nível dos

profissionais (universitários, ou não) deve ser alto o suficiente, para que os mesmos consigam entender perfeitamente os princípios de funcionamento dos processos e suas implicações sobre a capacidade do produto em atender ao especificado. Em outras palavras, estes técnicos precisam dominar a tecnologia que utilizam, sabendo explorar todas as possibilidades que o equipamento (processo) oferece; reduzindo o número de peças defeituosas produzidas - através do reconhecimento das origens dos defeitos e eliminação dos mesmos - e otimizando os parâmetros da operação, diminuindo assim os custos de produção. Por outro lado, constantemente são desenvolvidos processos e materiais mais eficientes, os quais reduzem custos e aumentam a produtividade e a qualidade. Portanto, há necessidade do profissional estar absolutamente atualizado, acompanhando ininterruptamente as inovações tecnológicas que se apresentam e selecionando aquelas que podem trazer reais benefícios para a fabricação dos seus produtos.

Entretanto - e de uma vez por todas é necessário ser compreendido esse ponto - a compra de um equipamento mais avançado não significa, de forma alguma, que a empresa obteve sua tecnologia. Na realidade, a empresa simplesmente adquiriu um novo equipamento e as instruções de como realizar certas operações com o mesmo.

NOÇÕES GERAIS

A decisão sobre a oportunidade de realizar um dado investimento, pode exercer grande influência sobre o desempenho futuro da empresa. Existem diversos métodos de análise econômica do investimento, fugindo do escopo desse livro discutí-los, pois se está simplesmente ressaltando aspectos importantes desse assunto, com o intuito de despertar o não especialista para os problemas existentes e as implicações dos mesmos sobre as operações técnicas.

Entretanto, para realizar essa análise é necessário, no mínimo, o conhecimento dos custos envolvidos, além das receitas adicionais resultantes da aplicação desse investimento.

Numa economia sadia - ou seja, na qual a inflação não ultrapasse um dígito anual - os ganhos da empresa são obtidos através da conversão de capital em facilidades, as quais devem retornar um capital maior do que aquele investido. Infelizmente, esse não é o caso de diversos países do mundo no momento e isso inviabiliza investimentos em

novas tecnologias e desorienta os setores produtivos.

CONCEITUAÇÃO DOS CUSTOS

O investimento de capital é composto por:

- Investimento de Capital Fixo

Envolve o capital necessário para prover todas as facilidades, ainda que indiretamente envolvidas com a fabricação. Estão aqui incluídos, então, as obras civis; equipamentos e outras instalações industriais; posta-em-marcha; etc.. Entretanto, geralmente são excluídos os itens que não são depreciados (como o terreno da empresa, por exemplo).

- Investimento em Capital de Giro

É o capital que deve ser disponível para manter as instalações operando. O custo desse investimento se caracteriza por ser realizado somente uma vez, opostamente aos custos de operação (ou

de manufatura), os quais são contínuos, ou repetidos. Encontram-se nesse caso os estoques de matérias primas; produtos semi-acabados, ou acabados; numerário disponível; créditos vencíveis no exercício em questão; ou, ainda, qualquer valor líquido dentro desse prazo.

Entretanto, antes que um novo investimento seja feito, deve ser realizada uma estimativa do retorno de capital do mesmo, considerando os seguintes principais elementos dos custos:

- Custos Diretos

Ou aqueles que serão necessários para a construção da fábrica e de suas instalações permanentes;

- Custos Indiretos

Envolvendo todos os outros necessários para possibilitar as instalações, tais como gastos com a construção; seguros; taxas; etc..

Existem diversos tipos de estimativas para os custos, sendo que as técnicas mais usuais podem ser resumidas, em função da acuracidade geral desejada para os resultados, conforme mostrado

na **Tab. 20.1**.

Por outro lado, a acuracidade de uma estimativa depende, fundamentalmente, do número e da qualidade das informações, bem como do tempo disponível para realizá-la.

As estimativas preliminares ocorrem nos primeiros estágios do programa de investimento, quando geralmente é exíguo o tempo para se alcançar um valor informativo para o custo e ainda não há certeza sobre a qualidade das informações colhidas, pois as mesmas se baseiam em aspectos tais como opiniões individuais, dados históricos, ou regras empíricas.

Por sua vez, após ter sido estabelecida a finalidade do projeto e definido um cronograma para sua execução, podem ser realizadas estimativas detalhadas do mesmo. Nessa fase, as técnicas utilizadas podem ser relativamente simples, ou extremamente complexas, mas todas devem se basear em informações quantitativas e procedimentos formais os quais, reconhecidamente, conduzam a valores confiáveis dentro de uma margem de erro especificada.

Em geral, não há coincidência entre os custos estimados e o real. Entre outras razões, isso ocorre porque: (a) Nem todos os fatores que afetam o

Tabela 20.1 - Acuracidades das Estimativas dos Custos para a Instalação de uma Indústria

Tipo de Estimativa	Acuracidade (%)	Tipo de Estimativa	Acuracidade (%)
Preliminar		Detalhada	
Ordem de Magnitude	+50 à -25	Semi-Definitiva	+25 à -15
Conceitual	+30 à -15	Definitiva	+15 à -10
		Verificação	+10 à -5

custo podem ser avaliados completamente, sendo típico exemplo a previsão das paradas de produção por falha do equipamento; (b) Há um erro percentual dos desvio em relação ao custo real, o qual depende do número de estimativas realizadas.

Entretanto, apesar do reconhecimento desses fatos, num dado período de tempo uma boa prática de estimativa deve levar à uma média bastante próxima daquela do custo de produção.

Os desvios prováveis do custo real se correlacionam com os custos estimados e fatores de contingenciamento, conforme ilustrado na **Fig.20.3**.

Note-se, que o custo para realizar as estimativas aumenta com: (a) O valor do projeto; (b) O número de itens considerados na análise. Um critério para avaliar quão completa é a estimativa, reside em sub-dividir a mesma nas classes mostra-

das na **Tab.20.2**. A classe 1 considera todas as informações pertinentes ao projeto e, portanto, é a de maior custo; a classe 2 é idêntica à 1, exceto por desconsiderar detalhes do local de fabricação; a classe 7 somente envolve as especificações gerais de projeto, além do número e da taxa com que as unidades serão produzidas exigindo, por consequência, que o analista conheça o produto, ou compare-o com outro similar.

Por sua vez, o Custo Total de Produção resulta da adição dos Custos Operacionais e Custos (ou Despesas) Gerais (ou de Administração).

Os Custos Operacionais decorrem da operação dos ativos, sendo pagos repetidamente, diferindo assim dos Custos do Capital, os quais são pagos somente uma vez. Estes custos, também deno-

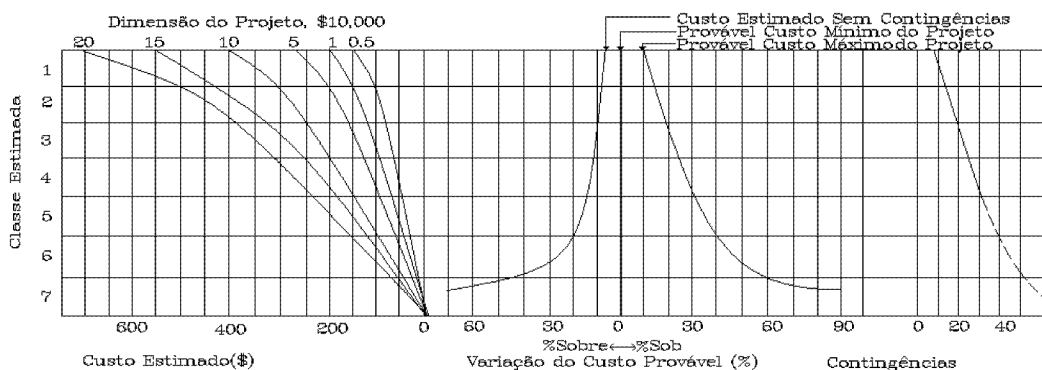


Figura 20.3 - Correlação com os Custos Estimados e Fatores de Contingenciamento dos Desvios Prováveis dos Custos.

Tabela 20.2 - Definição dos Tipos de Classes para Estimativas dos Custos

Descrição dos Itens	Classe da Estimativa						
	1	2	3	4	5	6	7
Especificações gerais de projeto, volume e taxa de produção	*	*	*	*	*	*	*
Desenhos da montagem ou ereção	*	*	*	*	*	*	
Sub-conjuntos propostos	*	*	*	*	*		
Desenhos detalhados e lista dos materiais	*	*	*	*			
Procedimentos e equipamentos para testes e inspeções	*	*	*	*			
Necessidades de ferramentas e equipamentos	*	*	*	*			
Necessidades de acondicionamento e/ou transporte	*	*	*	*			
Roteiros para fabricação	*	*	*				
Listas detalhadas: ferramentas, máquinas, instrumentos e outros equipamentos	*	*					
Análises das operações e estudos dos ambientes de trabalho	*	*					
Informações sobre tempos padronizados	*	*					
Informações sobre liberação dos materiais	*	*					
Informações sobre as entregas e custos dos sub-contratantes	*	*					
Necessidades das instalações	*						

minados Custos de Manufatura, são os gastos necessários para manter toda a planta (ou projeto), ou mesmo um equipamento operando. Então, os Custos de Produção se subdividem em:

- Custos Diretos: Também denominados custos variáveis, tendem a ser proporcionais aos insumos necessários, se incluindo nos mesmos os consumíveis (gases; arames; eletrodos; fluxos); energia elétrica; metal base; salários (mais encargos sociais) dos funcionários diretamente envolvidos na produção; etc.; e/ou;
- Custos Indiretos: Ou custos fixos, incluem gastos que independem da taxa de produção, entre os mesmos se encontrando a mão-de-obra indireta; seguros; administração da produção; alugueis

e/ou arrendamentos; segurança; etc.;

- Custos de Contingências;
- Custos de Distribuição: englobando fretes; operações de terminais; embalagem; alugueis; depreciações; etc..

Por sua vez, os Custos Gerais podem ser analisado entre aqueles provenientes dos esforços de vendas, ou de “marketing”, e despesas administrativas. Os mesmos também permitem a seguinte subdivisão:

- Custos Gerais Variáveis: como os impostos federais; estaduais; comissões; despesas financeiras (de curto prazo); pesquisa e desenvolvimento; etc.;

- Custos Gerais Fixos: impostos municipais; despesas administrativas (todos os salários; benefícios; gastos com escritórios, etc., do pessoal da empresa); análise de mercado; etc.;

- Outros Custos

Além dos custos acima descritos, ainda devem ser consideradas outras despesas e desembolsos como, por exemplo: depreciação contábil; despesas financeiras (médio e longo prazo); amortização de financiamentos; imposto de renda; etc.. A forma como as mesmas comporão a análise, depende do critério contábil utilizado e da legislação vigente.

É prática usual se categorizar os custos em relação ao volume da produção. Entretanto, apesar de geralmente denominados custos fixos e variáveis, os mesmos devem ser analisados somente num dado intervalo relevante, pois podem mostrar alteração na tendência para muito pequeno, ou muito alto volume de produção, conforme ilustrado na **Fig. 20.4**. Essa mesma figura também apresenta uma outra categoria de custos, denominada variável por etapas, o qual se altera súbitamente quando são alcançados dados volumes de produção, podendo influir dessa forma no custo total. Este é o típico comportamento, por exemplo, para máquinas, que praticamente custam o mesmo para produzir tanto uma peça, quanto no seu limite máximo; entretanto, nesse limite mais uma peça, é necessário a aquisição de outra máquina.

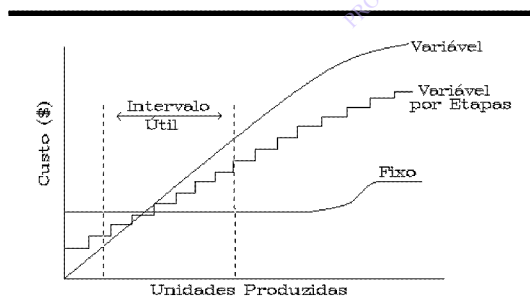


Figura 20.4 - Tipos de Custos.

DEPRECIAÇÃO

Máquinas, ou equipamentos, ou edificações, ou certos serviços, ou outros bens que tenham seus valores reduzidos com o tempo, devem ter os mesmos rateados durante suas vidas úteis. Essa perda de valor é denominada depreciação, sendo devida

principalmente à: (a) Deterioração, ou incapacidade de uma máquina (por exemplo) em realizar as funções para a qual foi projetada; (b) Obsolescência, ou o fato de uma máquina se mostrar ineficiente perante os avanços tecnológicos ocorridos.

Note-se, que para recursos naturais exauríveis, tais como petróleo, madeira, etc., o tratamento é diferente e a análise é denominada de esgotamento, ou de exaustão.

A depreciação é uma despesa, incluindo o próprio ato para calculá-la. Apesar de não ser desembolso, pode ser abatida das receitas, diminuindo o lucro tributável e, por consequência, o imposto de renda da empresa. Devido às características distintas que apresentam, a empresa deve utilizar um sistema de depreciação para propósitos de impostos e outro para sua contabilidade.

Para impedir que as empresas depreciem seus bens num muito pequeno intervalo de tempo e usufruam dos benefícios fiscais decorrentes, a legislação fiscal de cada país estabelece regras rigorosas. Para equipamentos, por exemplo, esse prazo geralmente é de 10 anos, enquanto que investimentos em projetos de engenharia podem ser amortizados à razão de 20% ao ano. Entretanto, os prazos podem se alterar e antes de se realizar os cálculos, informações seguras devem ser obtidas junto ao órgão governamental pertinente.

Portanto, suponha-se que uma máquina possua um custo inicial C_i ; um valor terminal (ou de sucata, ou residual) C_s ; dure “n” anos e a depreciação fracional para cada ano seja representada por d_{p1}, d_{p2}, \dots . Então, a depreciação total, ou o primeiro custo depreciável C_d , é:

$$C_d = C_i - C_s \quad [20.1]$$

Para qualquer ano arbitrário “m”, têm-se:

$$d_m = d_{f,m} C_d \quad [20.2]$$

Portanto, o valor contábil (V_c) no final do ano m será:

$$V_c = C_i - C_d \sum d_{f,m} \quad [20.3]$$

Esse valor contábil também pode ser obtido em função do valor residual e da depreciação futura, simplesmente pela adição e subtração de C_d na equação anterior:

$$V_c = C_s + C_d (1 - \sum d_{f,m}) \quad [20.4]$$

Existem diversos métodos aceitos pelos governos para o cálculo da depreciação, sendo que a forma acelerada é mais realista quando a máquina é vendida antes do período considerado. Como os custos operacionais de uma máquina tendem a ser relativamente baixos nos primeiros anos e altos nos últimos, é prática comum utilizar-se alta e baixa depreciação na mesma ordem. Assim, a soma dos custos operacionais com a depreciação se mantém aproximadamente constante nos anos intermediários.

Entre os vários métodos utilizados, se encontram os seguintes: linear; teórico (oposto à forma acelerada); balanço em declínio (forma acelerada); dígitos da soma-dos-(oito)-anos (forma acelerada); unidades de produção. Pelo método linear, o custo depreciável é alocado de forma uniforme para todos os anos, ou seja:

$$d_{j1} = d_{j2} = \dots = d_{jm} \text{ ou } d_j = \frac{I}{n} \quad [20.5]$$

Portanto, a depreciação para o ano m é:

$$d_m = \frac{C_d}{n} \quad [20.6]$$

enquanto o valor contábil para m anos será:

$$V_c = C_i - \sum d_m = C_i - C_d \frac{m}{n} = C_d \left(1 - \frac{m}{n}\right) + C_s \quad [20.7]$$

O valor presente de m anos de depreciação, ou seja, a perda efetiva de valor do bem com o tempo, é dado por:

$$P_m = \frac{C_d}{n} \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} = \frac{C_i - C_s}{n} \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad [20.8]$$

O AVANÇO TECNOLÓGICO

Uma máquina pode ser reposta, por apresentar deficiências nas suas funções, ou substituída por outra com características tecnológicas mais avançadas. Geralmente ambos os casos se aplicam.

O avanço tecnológico disponível no momento pressiona pela substituição do equipamento existente. Entretanto, apesar do avanço tecnológico futuro ser somente uma possibilidade, a expectativa que cria pode influenciar decisivamente na retenção em operação de uma máquina existente. Esse fato é ainda mais notável em áreas que sofrem transformações muito rápidas.

Ainda que o desenvolvimento de um modelo completo para o assunto em questão apresente grandes dificuldades, é possível criar suas bases através das seguintes premissas:

- Se “ p ” é a taxa do avanço tecnológico (decimal) e C_i o custo de uma máquina nova, então: (a) A cada ano um novo modelo poderá ser disponível, custando $1-p$ do custo do modelo do ano precedente; (b) O custo da máquina recém adquirida será $C_i(1-p)^v$ daqui há v anos.

- Se R_p representar os gastos operacionais no fim do ano com a nova máquina, o modelo do próximo ano gastará $R_p(1-p)$ e após v anos $R_p(1-p)^v$.

Portanto, se uma máquina comprada agora é substituída a cada “ n ” anos, o custo capitalizado da mesma é o valor presente após taxas tomado no infinito para: (a) Os primeiros custos ocorrendo todo “ n ” anos; (b) O custo anual de operação, ocorrendo todos os anos e se modificando a cada “ n ” anos (uma nova máquina é comprada).

Isso pode ser assim equacionado:

$$\frac{K}{C_i} = \frac{(1+r)^n (1-t\psi_{rn}) + \left(\frac{R_p}{C_i}\right) \{(1-t)[(1+r)^n - 1] / r\}}{(1+r)^n - (1-p)^n} \quad [20.9]$$

onde:

K = custo capitalizado;

r = taxa (decimal) de retorno após impostos;

t = taxa (decimal) dos impostos;

enquanto “ ψ ” é o valor presente da depreciação de uma unidade monetária em uso (\$1) e depende do método de depreciação utilizado, sendo expresso por:

$$\psi = \sum \frac{d_{jm}}{(1+r)^m} \quad [20.10]$$

Uma vez especificado o método de depreciação e os parâmetros r , t , R_p/C_i e p , a vida útil ótima para a máquina - em termos de tecnologia - é encontrada para aquele n que torne mínima a razão K/C_i .

Portanto, talvez um dos mais importantes aspectos do modelo em pauta, é mostrar que a inflação neutraliza a redução dos custos obtida através do avanço tecnológico. Em outras palavras, um país com altas taxas de inflação está fadado a permanecer às margens da evolução tecnológica.

GRÁFICOS DE PRODUÇÃO ECONÔMICA

Gráficos de produção econômica (ou do ponto de equilíbrio - “break-even point”), tais como o ilustrado na **Fig. 20.5**, permitem a visualização da relação entre o número de unidades vendidas de um produto; as receitas totais; os custos envolvi-

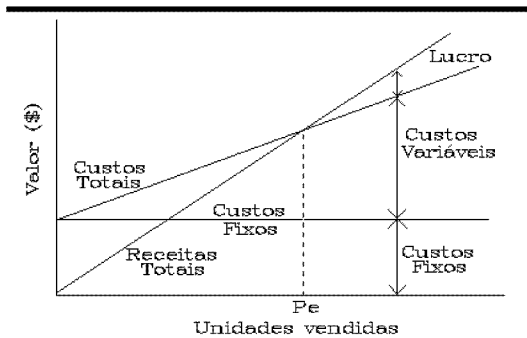


Figura 20.5 - Gráfico de Produção Econômica.

dos (fixos e variáveis) e o lucro resultante.

Numa primeira aproximação, esses gráficos podem ser construídos baseados nas seguintes premissas:

- Os custos fixos (C_f em \$/ano) não dependem da taxa de produção, nem de outros fatores;
- O custo por unidade de produção (V em \$) é constante, sendo independente do número de unidades produzidas (N);
- O custo variável é dado por NV , sendo linearmente dependente da produção;
- Não existem custos financeiros;
- As receitas provêm somente da produção;
- Independentemente do volume produzido, todas as unidades são vendidas e pelo mesmo preço.

Sendo assim, o custo anual total (C_t) é dado por:

$$C_t = NV + C_f \quad [20.11]$$

Logo, se R é a receita bruta por unidade vendida e L_b o lucro bruto, tem-se:

$$L_b = NR - C_t = NR - (NV + C_f) \quad [20.12]$$

Desta forma, considerando a taxa do imposto (t), o lucro líquido (L_l) é dado por:

$$L_l = L_b(1-t) \quad [20.13]$$

Conforme mostrado na **Fig. 20.5**, o ponto onde a linha da receita cruza aquela do custo total é denominado de “ponto de equilíbrio” - P_e , sendo que abaixo do mesmo a operação ocorre com perdas. Como não é obtido lucro líquido nesse ponto, o mesmo independe da taxa do imposto e pode ser determinado se colocando $L_b = 0$ na equação 20.12, com o que é obtida a produção de equilíbrio (N_e):

$$N_e = C_f / (R - V) \quad [20.14]$$

Todas as considerações acima foram realizadas para uma planta operando a 100% de sua capacidade. Entretanto, mesmo se o custo variável por unidade (V) aumentar acima dessa capacidade, o lucro provavelmente continuará a crescer. Para conferir a vantagem de operar em outra capacidade de produção, basta acrescentar na equação para o lucro líquido a porcentagem com que a planta está operando, ou seja:

$$L_b = (N + N_a)R - (NV + N_a V_a + C_f) \quad [20.15]$$

onde N_a e V_a são o número de unidades produzidas acima de 100% da capacidade e a variável de custo associada por unidade, respectivamente.

Através de modificações relativamente simples, os gráficos de produção econômica permitem, ainda, os seguintes cálculos: (a) Como reduzir o preço de venda numa diferente escala de produção (“dumping”); (b) Análise de custos que se alteram de forma não proporcional com o aumento do volume produzido (ou custos regulados); (c) O mínimo custo de produção para um mesmo produto fabricado por diversas máquinas; (d) O mínimo custo de produção para vários produtos fabricados numa mesma máquina.

Várias críticas são geralmente tecidas em relação a esse tipo de análise, pois a mesma possui as seguintes principais falhas: (a) Exige condições de certeza que limitam bastante sua aplicação aos casos reais; (b) Desconsidera o valor da moeda no tempo; (c) Projeta o mesmo preço de venda para qualquer volume de produção.

Entretanto, apesar dessas limitações, os gráficos de produção econômica são úteis modelos matemáticos - pois apontam tendências - além de permitir ao analista utilizar elementos de seu próprio julgamento para melhorar as previsões efetuadas.

A CURVA DO APRENDIZADO

A repetição de uma operação, faz com que a mesma seja aperfeiçoada. Esse é um dos principais aspectos da evolução tecnológica da humanidade e possui grande implicação econômica.

A **Fig. 20.6** ilustra a relação típica existente entre o volume cumulativo da fabricação de um produto (N), com uma medida do esforço por unidade de produção (como homem/hora, por exemplo). A forma da curva sugere uma equação do

seguinte tipo:

$$E_N = KN^s \quad [20.16]$$

onde:

E_N = esforço por unidade de produção, requerido para produzir a N^{a} unidade;

K = constante, sendo numericamente o esforço teórico para produzir a primeira unidade;

s = declividade da curva (negativa).

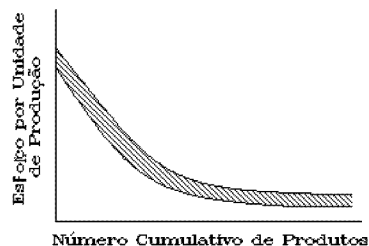


Figura 20.6 - A Curva do Aprendizado.

O esforço por unidade de produção (E_N) poder ser expresso em qualquer unidade conveniente ao usuário. Entretanto, se o mesmo for em alguma unidade monetária, por exemplo, é preciso considerar seu valor presente em qualquer momento.

A forma mais fácil de se utilizar a equação 20.16 é como uma linha reta, logo:

$$\log E_N = s \cdot \log N + \log K \quad \text{ou} \quad Y = sX + b \quad [2.17]$$

Portanto, a representação da redução do esforço por unidade, conforme aumenta o volume da produção, é dada pelas curvas do aprendizado (exponencial, ou linear), bem como pela função apresentada pela Eq.20.16. Aliás, essa equação mostra algumas propriedades importantes, entre as mesmas, ao se dobrar a produção, o esforço requerido em relação ao anterior (metade do considerado) por unidade é reduzido pelo fator 2^s . É prática usual se expressar as curvas do aprendizado para ganhos quando se dobra a produção e denominando L_d de razão decimal do aprendizado, resulta:

$$L_d = \frac{E_{2N}}{E_N} = \frac{K(2N)^s}{K(N)^s} = 2^s \quad [20.18]$$

Da mesma forma, pode-se considerar a razão porcentual do aprendizado L_p (ou $100L_d$) na equação acima e aplicando logaritmo tem-se:

$$-s = \frac{2 - \log L_p}{\log 2} \quad [20.19]$$

Em certas situações, é desejável se saber qual o esforço acumulado de produção (da primeira à última unidade) e, portanto:

$$E_T = E_1 + E_2 + \dots + E_N$$

ou

$$E_T = \sum E_N \approx \frac{K}{s+1} [(N+0,5)^{s+1} - 0,5^{s+1}] \quad [20.20]$$

Para se calcular o esforço cumulativo médio, basta dividir a equação acima pelo número acumulado de unidades produzidas (N). Na prática da produção, entretanto, é usual que se conheça o esforço requerido para produzir um lote de unidades.

OS EFEITOS DA INFLAÇÃO E DA PRODUTIVIDADE

O aumento, ou redução do volume de dinheiro circulante, ou crédito, sem correspondente alteração na quantidade ofertada de bens, ou serviços, resulta na variação dos seus preços. Esse fenômeno ocorre devido ao próprio valor da moeda ter se alterado e é denominado *inflação*, quando a mesma se desvaloriza, ou, mais raramente, *deflação*, quando se passa o inverso.

Com exceção do item **O Avanço Tecnológico**, por onde pode-se inferir a dificuldade de um país (ou uma empresa) evoluir tecnologicamente se sua economia estiver desorganizada, nas análises realizadas até aqui não foram considerados os importantes efeitos que a inflação exerce sobre as decisões econômicas.

Além da geração das pragas mais terríveis de todas, que são a difusão da fome e a anulação da dignidade humana, existem diversas outras importantes implicações da inflação sobre um país, entre as quais se encontram:

- A destruição dos princípios éticos básicos da sociedade;
- A instabilização social e política;
- A facilitação da especulação e da corrupção;
- A grande dificuldade da realização de previsões de médio prazo e a impossibilidade de planejar a longo prazo;
- O desvio dos interesses econômicos para atividades não produtivas;
- A idolatria por um novo tipo de atividade improdutiva, ou aquela que permite a alguém viver da rentável troca de “papéis” - os quais geralmente não possuem valor real algum - nos momen-

tos mais convenientes, com informações (as quais normalmente deveriam ser sigilosas) obtidas desde pessoas influentes.

Foge do escopo desse livro a análise desses fatores, mas os mesmos devem estar sempre presentes na mente do analista, pois podem alterar de forma imprevisível e completamente o cenário imaginado.

Portanto, para uma mais realista análise econômica, a inflação deve ser considerada em praticamente todos os casos até aqui apresentados. Denominando “*f*” à taxa de inflação num dado período de tempo, o valor presente *M* de uma quan-

tia que valia M_0 há “*n*” períodos de tempo, é dado por:

$$M = \frac{M_0}{(1 + f)^n} \quad [20.21]$$

Por outro lado, é possível existir ganho da taxa de produtividade na manufatura de qualquer produto, entre outras razões, devido a avanços tecnológicos obtidos e/ou maior empenho dos funcionários. Apesar da produtividade ser de difícil avaliação, como mencionado, e o seu efeito mascarado em sistemas com inflação, a empresa deve empregar todos seus esforços para analisá-la com justiça.

CUSTOS DA SOLDAGEM

ETAPAS GERAIS

A estimativa dos custos da soldagem de uma estrutura pode possuir diversos propósitos, entre os quais se encontram os seguintes:

- Compor o preço de venda;
- Auxiliar na decisão da oportunidade de fabricar um produto;
- Determinar o volume de investimentos necessários para uma operação;
- Prever modificações provocadas por alteração na escala de produção;
- Estabelecer os princípios para a implantação de um programa de redução de custos;
- Fornecer subsídios para a escolha entre diversos processos de soldagem.

Por sua vez, os custos da soldagem propriamente dita, estão relacionados com todos os outros decorrentes das operações acessórias inerentes a este processo de fabricação, as quais podem ser decompostas em diversas fases, que analisadas individualmente facilitarão o estabelecimento dos custos envolvidos, ou seja:

□ Projeto da Junta Soldada

Os Projetistas - em conjunto com a Engenharia de Soldagem da empresa fabricante e a direção do contratante da obra (se for o caso) - somente devem dar início às operações, após todos terem perfeitamente entendido e acordado (por escrito) pelo menos sobre os seguintes tópicos:

- As Aplicações para as quais a estrutura se

destina;

- O Código, ou Norma convencionada para Projeto e Construção e suas principais exigências;
- Os Fatores de Segurança utilizados nas diferentes partes;
- A Filosofia geral que orientará o Projeto;
- O Reconhecimento de possíveis deficiências que a estrutura possa apresentar, ao enfrentar certas situações excepcionais.

Existindo acordo sobre as questões acima descritas, os seguintes aspectos do Projeto devem no mínimo ser considerados em cada caso, especificamente com relação à soldagem:

- As Propriedades Mecânico/Metalúrgicas requeridas pela Junta Soldada;
- A Seleção da Junta e Dimensionamento do Cordão de Solda;
- A Especificação do Material Base e dos Consumíveis;
- A Especificação do Processo (e dos Equipamentos que serão utilizados);
- A Descrição das Operações Acessórias (limpeza; tratamento térmico, etc.);
- A Discriminação dos Ensaios Destrutivos e Não Destrutivos a serem realizados;
- A Especificação dos Níveis Toleráveis de Descontinuidades;
- O Estabelecimento dos Procedimentos de Soldagem;
- Os Principais Aspectos de Segurança a serem observados;
- A Confecção dos Desenhos detalhados;
- A Certificação dos Consumíveis e Equipa-

mentos;

- A Qualificação do Pessoal envolvido na Construção e Inspeção;
- A Descrição dos Equipamentos Auxiliares necessários, tais como posicionadores e guindastes;
- A Previsão da Distorção e Tolerâncias Dimensionais admitidas.

Nesta fase, também está incluído exatamente o assunto ora analisado, ou seja, dadas as restrições existentes para a junta (cargas aplicadas; efeitos do meio ambiente, etc.), são selecionados os processos e procedimentos de soldagem adequados, sendo após escolhido o mais econômico.

❑ Organização

Conhecendo-se as necessidades para a realização da soldagem e operações acessórias, são estabelecidas as facilidades que deverão estar disponíveis; a seqüência de utilização das mesmas; o “lay-out” para fabricação e as questões relativas a segurança do trabalho. Inclui-se nessa etapa o desenvolvimento dos fornecedores de produtos e serviços, além de compras.

Dependendo do porte da obra, poderão ser empregados sistemas para controlar os fluxos dos materiais e serviços, os quais devem ocorrer nos tempos exigidos.

❑ Seleção de Pessoal e Certificação da Qualidade

Antes da obra iniciar, já deverá estar em pleno funcionamento o sistema de seleção de pessoal, principalmente para Soldadores e Inspetores. Após a admissão, os mesmos deverão provavelmente sofrer treinamento para o trabalho específico que irão desenvolver. Por sua vez, aqueles que ainda não sejam Qualificados, ou Certificados, deverão receber aprovação por um Órgão credenciado. Após ter sido decidido quais equipamentos, consumíveis e materiais base serão utilizados, todos também serão Certificados.

❑ Preparação para a Soldagem

As seguintes operações deverão então ser iniciadas: (a) Corte das Partes; (b) Preparação dos Chanfros; (c) Limpeza; (d) Posicionamento das Partes.

Entre essas operações, diversas inspeções devem ser realizadas (pelos operadores), ressaltando-se aqueles sobre a qualidade dos chanfros e controle dimensional. Caso seja necessário, as facilidades para realização de Pré-Aquecimento pre-

cisam estar disponíveis.

❑ Soldagem

De posse dos procedimentos de soldagem, essa operação deve iniciar. Meios para mensurar a temperatura de pré-aquecimento; temperatura de interpasse e dimensão do cordão devem estar disponíveis, bem como os ajudantes precisam estar a postos, apoiando o soldador.

❑ Operações Após a Soldagem

Constam geralmente de: (a) Limpeza (usualmente entre-passes e, em certos casos, com banhos químicos, ou jateamento com areia/granalha); (b) Pós-Aquecimento; (c) Inspeções Visuais e Ensaios Não Destrutivos (muitas vezes também entre-passes); (d) Reparos e Correções de Defeitos.

Na soldagem e técnicas conexas, geralmente existem vários processos que são tecnologicamente aceitáveis para se fabricar uma mesma junta, sendo o mais econômico detectado através de um elaborado trabalho de otimização, envolvendo a seleção daquele de menor custo para um específico nível de qualidade.

Entretanto, para que esta análise se desenvolva a contento, devem ser perfeitamente entendidos os seguintes principais conceitos relativos à produtividade:

- **Fator de Operação:** razão entre o tempo de arco efetivamente aberto (há arco formado) e o tempo total para realizar a soldagem;
- **Rendimento de Deposição:** razão entre a massa do metal de solda depositado e a massa consumida do consumível, expressa como porcentagem. Nesse caso se considera: (a) No processo eletrodo revestido, somente a massa da alma; (b) Nos outros processos, somente o arame (maciço, ou tubular), mas não o gás, ou fluxo;
- **Eficiência do Consumível:** razão entre a massa do metal de solda depositado e a massa total utilizada do consumível (inclui, portanto, aquela que não fundiu, mas restou inutilizada), expressa como porcentagem. Nesse caso se considera: (a) No processo eletrodo revestido, alé da alma, o revestimento e o toco; (b) Nos outros processos, além do arame (maciço, ou tubular), o gás, ou fluxo;
- **Eficiência de Deposição:** razão entre a massa do metal de solda depositado e a massa total consumida do consumível, menos as sobras, expressa como porcentagem. Nesse caso se considera: (a) No processo eletrodo revestido, somente

o realmente consumido, não o toco; (b) Nos outros processos, além do arame (maciço, ou tubular), o gás, ou o fluxo.

- **Taxa de Deposição:** massa do metal de adição depositado por unidade de tempo, numa dada intensidade de corrente, com fator de operação igual a 100%;

- **Rendimento do Fluxo:** razão entre a massa do fluxo e a massa do arame consumido (arco submerso).

Então, uma vez tendo sido decidido o processo e o procedimento de soldagem, de forma objetiva são os seguintes alguns dos mais importantes itens que devem ser explorados para minimizar os custos:

- **Redução da Massa do Metal de Solda Depositado**

Este fator depende essencialmente da otimização do projeto da junta. A Fig. 20.7 ilustra a relação existente entre a massa do metal de solda a ser depositado por metro (MSOL), para diferentes tipos de juntas e espessuras do material base. Note-se, que a partir de uma espessura com cerca de 20 mm, torna-se notável a diferença de massa requerida por cada tipo de junta. Entretanto, no contexto geral dos custos da soldagem, deve ser

considerado que um tipo de junta é mais caro para preparar do que outro e, dependendo do volume a ser fabricado, em certos casos aquele que necessita menos metal de adição para ser preenchido, pode não ser o mais econômico. Observe-se, ainda, que também existe a possibilidade de se trocar, ou modificar o processo, como é o caso, por exemplo, do chanfro estreito (“narrow-gap”) com MIG/MAG, ou Arco Submerso.

- **Redução do Tempo Total de Soldagem**

Neste caso, a ação deve ser sobre o Fator de Operação (FOPE) e a Taxa de Deposição (TDEP).

O FOPE depende parcialmente da disciplina do soldador, sendo decisivos o processo e seu modo de operação, os quais limitam inerentemente o tempo para se efetuar a soldagem.

Por outro lado, para uma dada bitola de consumível, a corrente de soldagem é o principal parâmetro que deve ser alterado na busca de maiores TDEP. Entretanto, existem outras alterações, as quais também resultam em efetiva redução dos custos. A posição, por exemplo, influencia de forma dramática o tempo necessário para a realização da soldagem, sendo que na Fig.20.8 são comparados os casos, quando se passa da plana para a vertical, com eletrodos revestidos do tipo rutilico

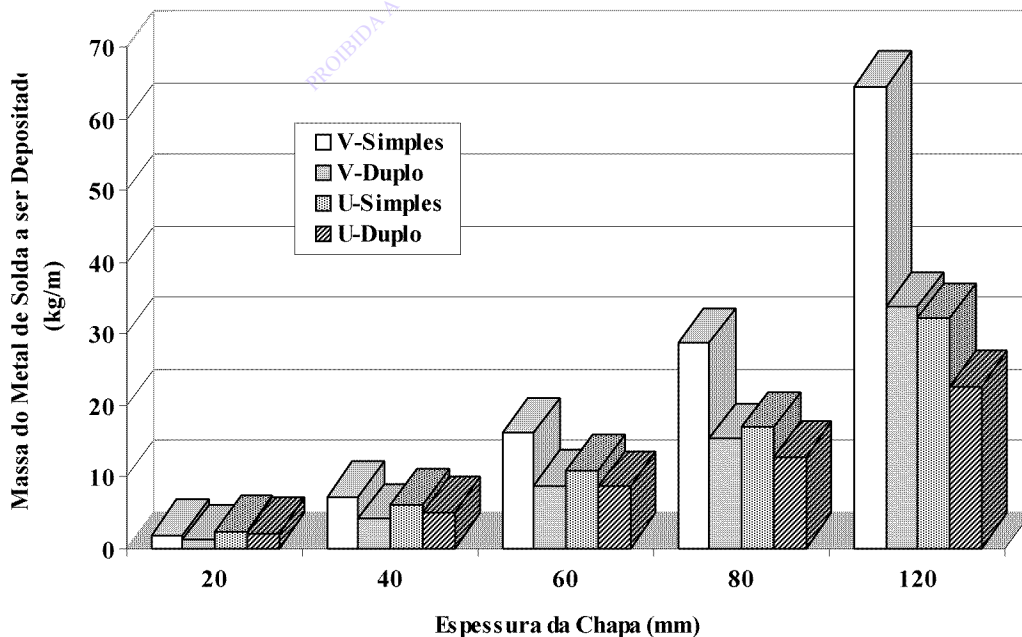


Figura 20.7 - Massa do Metal de Solda a ser Depositado (por metro), em Função da Espessura do Metal Base e do Tipo da Junta.

em juntas de diversas espessuras.

Outrossim, o aumento na distância de raiz da junta também provoca notável redução da velo-

cidade de soldagem, conforme mostrado na Fig. 20.9, para diferentes espessuras do material base.

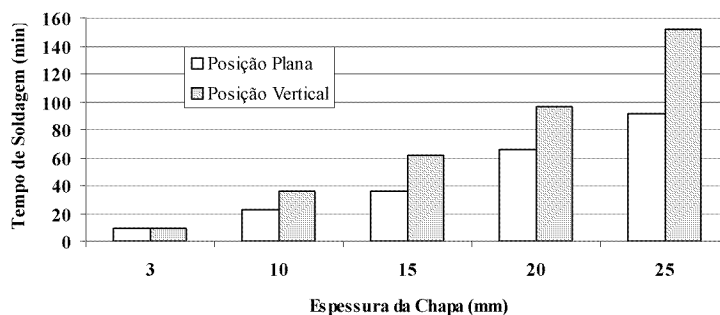


Figura 20.8 - Efeito da Posição de Soldagem e Espessura da Chapa sobre o Tempo para a Realização de 1 m de Solda (Eletrodo Revestido, tipo Rutílico).

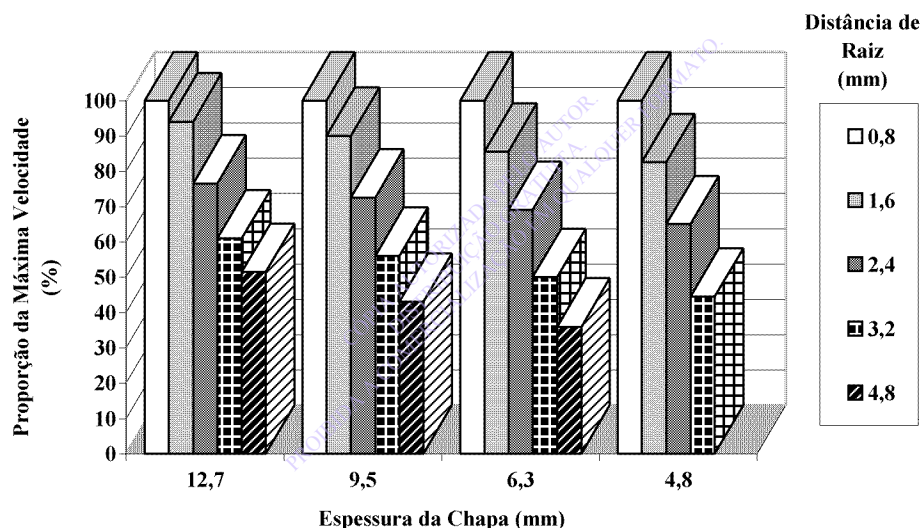


Figura 20.9 - Efeito da Distância de Raiz e da Espessura da Chapa sobre a Máxima Velocidade de Soldagem

▪ Redução do Custo do Metal de Solda Depositado

Minimiza-se o custo do metal de solda, através do emprego de consumíveis com maior eficiência de deposição e/ou melhor rendimento do fluxo, ou gás (menor a razão entre as massas do fluxo ou gás e do arame consumido).

Nem todo o consumível (ou consumíveis) utilizado é transformado em metal de solda, sendo parte composta por fluxo, ou gás. Além disso, existem sempre perdas devido ao salpico; volatilização; danificação; e desperdício, além da parte do consumível inutilizada devido à necessidade de cortar o arame (arco submerso; eletrodo tubular; MIG), ou o “toco” (parte próxima ao porta-ele-

trodo) no eletrodo revestido. Neste último processo, é inerente a perda de cerca de 50 mm em cada troca do eletrodo, sendo que isso representa aproximadamente 14% e 11% para os comprimentos dos consumíveis de 350 mm e 450 mm, respectivamente. Portanto, grande cuidado deve ser tomado com relação ao máximo aproveitamento do eletrodo revestido.

No processo MIG/MAG, por exemplo, o salpico diminui notavelmente se corrente pulsada é utilizada, ou as condições na soldagem convencional são cuidadosamente ajustadas. Por outro lado, nesse processo é de suma importância o controle do consumo específico de gás - ou seja, o volume de gás utilizado por unidade de massa do

metal de adição fundido. Para um dado tipo e diâmetro de eletrodo, o mesmo pode ser calculado pelas seguintes equações:

$$F = 0,0471 \cdot D^2 \cdot d \cdot W \quad (\text{kg/h}) \quad [20.22]$$

$$C = 60 \cdot Z / F \quad (\text{l/kg}) \quad [20.23]$$

onde **F** é a taxa de fusão do arame e **C** o consumo específico de gás, com:

D = diâmetro do arame (mm);

d = massa específica do arame (g/cm³);

W = velocidade de alimentação do arame (m/min);

Z = vazão do gás (l/min).

Desta forma, as seguintes principais estratégias podem ser empregadas para a redução dos custos da soldagem:

- Desenvolver um Bom Projeto;
- Otimizar o Processo e Consumível;
- Trocar de Processo;
- Modificar o Equipamento;
- Introduzir Mecanização e/ou Automação;
- Melhorar o Treinamento dos Soldadores/Operadores;
- Exigir Organização e Controle.

A questão de organização e controle, por exemplo, depende essencialmente do treinamento e da atitude dos funcionários. Uma empresa mal organizada e sem métodos de controle efetivos, pode dispendir muito mais tempo (e dinheiro) para realizar uma dada operação do que outra, que possua ativo gerenciamento da produção. Basta, para isto, que as típicas atividades não-produtivas (a soldagem não está ocorrendo) se realizem de forma vagarosa, ou mal concatenadas. Quando não forem bem administradas, estas atividades podem tomar até 42% do tempo do soldador, ou seja:

- Espera pela ponte rolante e/ou talha: 5 a 12%;
- Instalação do equipamento: até 15%;
- Outros: até 15%.

Por outro lado, deve ser evitado que a qualidade se torne inconsistente e os reparos rotineiros. Isso pode resultar em altos custos inesperados e as seguintes rotinas podem auxiliar a inibi-los:

- Estabelecer procedimentos de soldagem e monitorá-los;
- Responsabilizar o soldador por alguma inspeção do trabalho, após cada estágio da fabricação;

- Realizar manutenção programada nos equipamentos;
- Aferir regularmente os instrumentos de medida.

ESTIMATIVA DOS CUSTOS DA SOLDAGEM

Após avaliadas detidamente todas as considerações até aqui realizadas (no mínimo), a próxima etapa é responder, de forma quantitativa, às seguintes questões básicas:

- Quais as condições e qual o processo mais econômico para a soldagem de uma estrutura que será fabricada?
- Quanto custa a soldagem de uma estrutura rotineiramente realizada? A mesma poderá ser fabricada empregando condições e processo mais econômico?

Apesar de existir diversos métodos propostos para a estimativa dos custos da soldagem, esta questão ainda não foi satisfatoriamente equacionada. Provavelmente, isto se deve à mesma ser geralmente desenvolvida por um especialista em Administração e/ou Custos, mas leigo nessa tecnologia, sendo aplicada, ou empiricamente, ou com adaptações de métodos empregados em outros processos de fabricação. Além disto, este problema se torna ainda mais agudo, porque não há pronto reconhecimento por muitos de quão distintos são os conceitos de "preço" e "custo", sendo normalmente difusos os principais vetores que compõem este último.

Portanto, a seguir será apresentado um novo sistema, através do qual é possível calcular os custos da soldagem e, concomitantemente, simular diversos cenários, inclusive entre diferentes processos. A originalidade deste modelo reside no mesmo ser completamente baseado em alguns princípios fundamentais da tecnologia da soldagem, ou seja, Produtividade ("Taxa de Deposição" e "Fator de Operação") e Projeto ("Massa do Metal de Solda a ser Depositado na Junta"). Portanto, este sistema não permite que a incompetência técnica seja dissimulada por fatores sociais e/ou econômicos os quais, apesar de muito importantes, freqüentemente não são os responsáveis diretos pela falta de competitividade de uma empresa.

Para os cálculos dos custos por metro da junta soldada, serão utilizadas as seguintes variáveis:

ASOL: Área da Seção Transversal do Metal

de Solda (m²);

CARA: Custo do Arame ou Eletrodo (\$/m);

CENE: Custo da Energia Elétrica (\$/m);

CEQU: Custo do Equipamento (\$/m);

CFLU: Custo do Fluxo no Arco Submerso (\$/m);

CGAS: Custo do Gás de Proteção (\$/m);

CINS: Custo da Inspeção, incluindo os Ensaios Destrutivos e Não-Destrutivos (\$/m);

CMAN: Custo Anual de Manutenção do Equipamento (\$/ano);

COUT: Custos não especificados, tais como limpeza, materiais de proteção (\$/m);

COVE: Custo do “Overhead”, englobando gerenciamento e qualidade (\$/m);

CPAR: Custo Parcial, não inclui o custo dos reparos das soldas (\$/m);

CPRE: Custo da Preparação dos Chanfros (\$/m);

CREP: Custo dos Reparos das Soldas Defeituosas (\$/m);

CTOT: Custo Total (\$/m);

CTRA: Custo do Trabalho (\$/m);

CTTO: Custo do(s) Tratamento(s) Térmico(s), incluindo a manutenção da temperatura de interpasso; pré- e pós-aquecimento (\$/m);

ECON: Eficiência do Consumível (%);

ELEE: Eficiência Elétrica do Equipamento de Solda (%);

ENCA: Encargos Sociais (\$/h);

FOPE: Fator de Operação (%);

GMAN: Gasto anual com a Manutenção do Equipamento (\$/ano);

JURO: Taxa anual de juros sobre o capital empregado (%);

LSOL: Comprimento da Junta a ser Soldada (m);

MESP: Massa Específica do Metal de Solda (kg/m³);

MSOL: Massa do Metal de Solda Depositado (kg/m);

PCON: Preço do Arame ou Eletrodo Revestido (\$/kg);

PENE: Preço da Energia Elétrica (\$/kWh);

PFIN: Preço final (de venda) do equipamento na data do cálculo (\$);

PFLU: Preço do Fluxo (\$/kg);

PGAS: Preço do Gás de Proteção utilizado na Soldagem (\$/m³);

PINI: Preço inicial (de compra) do equipamento (\$);

RFLU: Rendimento do Fluxo (adimensional);

SALA: Salário(s) do(s) Soldador(es) (\$/h);

SCOR: Corrente de Soldagem (A);

STEN: Tensão de Soldagem (V);

SVEL: Velocidade de Soldagem (m/h);

TABE: Período de Tempo em que o Arco permaneceu Efetivamente Aberto (h);

TDEP: Taxa de Deposição (kg/h);

TOVE: Taxa Utilizada para o “Overhead” (%);

TREJ: Proporção das Soldas Rejeitadas por Defeitos (%);

TTOT: Período de Tempo Total de Soldagem (h);

TUTI: Período de Tempo que o Equipamento é Utilizado por ano (h/ano);

VGAS: Vazão do Gás de Proteção (m³/h);

WABE: Potência Elétrica em Circuito Aberto (kW);

WARC: Potência Elétrica na Soldagem, ou $SCOR * STEN * 10^{-3}$ (kW).

É necessário se dispor, ainda, de diversas informações para a aplicação das fórmulas que serão a seguir apresentadas. Entre as mesmas, encontram-se as massas específicas de alguns materiais, mostradas na **Tab. 20.3**, e os fatores de operação (**FOPE**) para os diferentes métodos de soldagem, os quais tipicamente apresentam os seguintes intervalos:

- Manual: 5 à 30%;
- Semi-Automático: 10 à 60%;
- Mecanizado: 40 à 90%;
- Automático: 50 à 100%.

Tabela 20.3 - Massa Específica Aproximada de Algumas Ligas Metálicas

Material	Massa Específica (kg/m ³ x 10 ⁻³)	Material	Massa Específica (kg/m ³ x 10 ⁻³)
Aços ao carbono	7,8	Ligas Co-Cr-W	8,0 a 9,0
Aços baixa liga	7,9	Magnésio e suas ligas	1,8
Aços inoxidáveis austeníticos	7,9	Níquel e suas ligas	8,6
Aços inoxidáveis martensíticos	7,7	Titânio e suas ligas	4,7
Alumínio e suas ligas	2,8	Hastelloy (Ligas Ni-Cr-Mo-Fe)	7,8 a 9,1
Cobre e suas ligas	8,6		

Note-se que o valor exato para o **FOPE** depende de características próprias da empresa e deve ser devidamente avaliado pela mesma.

Por outro lado, as simulações e os cálculos serão facilitados dispondo-se da área da seção transversal do metal de solda (**ASOL**), como ilustrado na **Tab. 20.4** para os principais tipos de juntas. Nesta tabela, adotou-se a seguinte convenção: (a) “E” = espessura da chapa; (b) “N” = altura do nariz; (c) “R” = distância de raiz; (d) “A” = ângulo da junta; (e) “r” = raio do chanfro (chanfros em “U”, ou “J”); (f) “S₁”, ou “S₂” = tamanho da perna (ângulo, ou filete); (g) “h” = altura do cordão sobre a superfície da peça (revestimento); (h) “L” = largura da camada depositada sobre a peça (revestimento).

Antes, porém, que as equações para cálculo dos custos sejam apresentadas, é preciso se entender perfeitamente as relações a seguir, pois as mesmas são básicas para o desenvolvimento do assunto:

$$\frac{FOPE}{100} = \frac{TABE}{TTOT} \quad [20.24(a)]$$

Portanto:

$$TTOT = \frac{100}{FOPE} \cdot TABE \quad [20.24(b)]$$

Por outro lado:

$$SVEL = \frac{LSOL}{TABE} \quad [20.25(a)]$$

Como consequência:

$$LSOL = SVEL * TABE \quad [20.25(b)]$$

Além disto:

$$TDEP = SVEL * MSOL \quad [20.26(a)]$$

Então:

$$SVEL = \frac{TDEP}{MSOL} \quad [20.26(b)]$$

Portanto, o tempo de soldagem por unidade de comprimento da junta é:

$$\frac{TTOT}{LSOL} = \frac{100 * MSOL}{FOPE * TDEP} \quad [20.27]$$

De forma geral, para “N” passes a equação 20.27 se transforma em:

$$\frac{TTOT}{LSOL} = 100 * \sum_1^N \frac{MSOL_N}{TDEP_N * FOPE_N} \quad [20.28]$$

Tabela 20.4 - Área da Seção Transversal do Metal de Solda (ASOL)

Tipo de Junta	ASOL
Y	$\frac{1}{4} [(E-N)^2 * \tan A] + R * E$
K	$\frac{1}{2} [(E-N)^2 * \tan A] + R * E$
U-simples	$(E-r-N)^2 * \tan (A/2) + 2r * (E-r-N) + pr^2 / 2 + R * E$
U-duplo	$\frac{1}{2} [(E-2r-N)^2 * \tan (A/2)] + 2r * (E-2r-N) + pr^2 + R * E$
J-simples	$\frac{1}{2} [(E-r-N)^2 * \tan A] + r * (E-r-N) + pr^2 / 4 + R * E$
J-duplo	$\frac{1}{4} [(E-2r-N)^2 * \tan A] + r * (E-2r-N) + pr^2 / 2 + R * E$
Ângulo (filete)	$\frac{1}{2} (S_1 * S_2)$
Revestimento Protetor	h * L
Chanfro Reto (a topo)	R * E
V-simples	$(E-N)^2 * \tan (A/2) + R * E$
V-duplo	$\frac{1}{2} [(E-N)^2 * \tan (A/2)] + R * E$

Neste ponto, deve-se enfatizar que na equação 20.27 foi introduzido o importante conceito aqui denominado “Fator Tecnológico” (Φ), o qual sintetiza os elementos sobre os quais um competente técnico em soldagem realmente pode atuar, ou seja:

$$\Phi = \frac{\text{MSOL}}{\text{FOPE} * \text{TDEP}} \quad [20.29]$$

Os principais componentes dos custos na soldagem, são dados pelo ativo fixo e direto. Outros importantes itens dos custos são a preparação da junta; tratamentos térmicos; reparos e inspeções, os quais deverão ser estimados para cada caso em particular.

Portanto, as fórmulas a seguir descritas fornecem os custos por metro da junta soldada, considerando principalmente aqueles diretamente envolvidos na fabricação (onde \$ = unidade monetária):

1. Massa do Metal de Solda a ser Depositado (kg/m)

1.1 Juntas de Filete, ou a Topo, soldadas somente em um lado:

$$\text{MSOL} = 1,1 * \text{ASOL} * \text{MESP} \quad [20.30]$$

1.2 Juntas a Topo, soldadas em ambos os lados:

$$\text{MSOL} = 1,2 * \text{ASOL} * \text{MESP} \quad [20.31]$$

Nota: Na **Tab. 20.4** encontram-se diversas equações (diferentes tipos de juntas) para o cálculo da área da seção transversal do metal de solda (**ASOL**).

2. Custos dos Consumíveis

2.1 Arame ou Eletrodo Revestido (\$/m)

$$\text{CARA} = 100 * \text{PCON} * \text{MSOL} / \text{ECON} \quad [20.32]$$

2.2 Fluxo (\$/m)

$$\text{CFLU} = \text{PFLU} * \text{MSOL} * \text{RFLU} \quad [20.33]$$

2.3 Gás de Proteção (\$/m)

$$\text{CGAS} = \text{PGAS} * \text{VGAS} * \text{MSOL} / \text{TDEP} \quad [20.34]$$

3. Custos do Equipamento (\$/m)

Este cálculo envolve o custo do capital investido e sua metodologia varia entre as empresas. Considerando-se o período de depreciação (linear) de 10 anos, uma forma para se avaliar o custo do equipamento é apresentado na equação 20.35 abaixo:

$$\text{CEQU} = \frac{\text{PINI} - \text{PFIN}}{\text{TUTI}} * (10 + 0,55 * \text{JURO}) * \Phi$$

4. Custos de Manutenção do Equipamento (\$/m)

$$\text{CMAN} = \frac{\text{GMAN}}{\text{TUTI}} * 100 * \Phi \quad [20.36]$$

5. Custos da Energia Elétrica (\$/m)

Dado pela equação 20.37 abaixo:

$$\text{CENE} = \text{PENE} * \frac{\Phi}{\text{FOPE}} * \left[\frac{\text{FOPE} * \text{WARC}}{100 * \text{EELE}} + \text{WABE} * \left(1 - \frac{\text{FOPE}}{100} \right) \right]$$

6. Custos do Trabalho (\$/m)

$$\text{CTRA} = 100 * \Phi * (\text{SALA} + \text{ENCA}) \quad [20.38]$$

7. Custos do “Overhead” (\$/m)

A utilização da “taxa de overhead” para avaliar custos, apesar de popular em algumas empresas, é uma prática perigosa e que pode apresentar resultados absolutamente diferentes da realidade. Esta taxa é geralmente estabelecida, ou com base num valor determinado pela direção da empresa e que supostamente inclui todos os gastos que não são computados nos cálculos acima, ou “conventionada” como um múltiplo da soma do salário mais encargos sociais daqueles funcionários diretamente envolvidos na operação considerada. No primeiro caso, todos os produtos absorvem indistintamente uma proporção - geralmente determinada pelo tempo consumido na sua produção - do gasto total da empresa e tantas vezes quanto for o número de itens produzidos. No segundo método, existem vários exemplos em que o mesmo varia de 200% a até mais de 700% do salário mais encargos sociais. Em ambos os tipos, não há um real cálculo do custo do item produzido.

Optando-se por este tipo de estimativa, ou seja, considerando-se esta taxa como um múltiplo dos salários e encargos sociais, resulta:

$$\text{COVE} = \Phi * \text{TOVE} \quad [20.39]$$

8. Custos Total Parcial, (\$/m)

No mesmo não está incluído o custo do reparo das soldas defeituosas, sendo dado pela equação 20.40 abaixo:

$$CPAR = (CARA + CFLU + CGAS) + CTRA + CENE + CEQU + CPRE + CMAN + CINS + COVE + CTTO + COUT$$

9. Custos do Reparo das Soldas Defeituosas (\$/m)

$$CREP = TREJ * CPAR / 100 \quad [20.41]$$

10. Custos Total da Soldagem (\$/m)

$$CTOT = CPAR + CREP \quad [20.42]$$

Entre as diversas simulações possíveis, o sistema aqui desenvolvido permite que sejam comparados os custos, quando num mesmo processo são alteradas as condições de soldagem, ou entre diferentes processos.

Uma interessante aplicação direta do efeito da taxa de deposição (**TDEP**) e do fator de operação (**FOPE**) sobre o custo do trabalho (**CTRA**) se encontra na **Fig. 20.10**, a qual apresentará similar

tendência, independentemente dos valores específicos dos diversos componentes das equações apresentadas. Observe-se nesta figura, que o custo do trabalho - apesar de **aparentemente** fixo - não é função exclusiva do quanto o empregador gasta com o salário mais encargos sociais do(s) seu(s) funcionário(s). Na realidade, esse custo depende substancialmente do “**Fator Tecnológico (Φ)**”, cujo principal responsável é o técnico em soldagem da empresa (as outras parcelas da responsabilidade cabem, no mínimo, à direção geral; recursos humanos; organização e controle).

Portanto, é possível pagar salários dignos e manter custos baixos. Melhor ainda, a experiência de diversas empresas têm demonstrado que a sua competitividade aumenta radicalmente, quando a mesma possui em seus quadros funcionários bem remunerados. Para que isto ocorra, entretanto, é necessário que os técnicos em soldagem da mesma utilizem inteligentemente este “**Fator Tecnológico**”.

Em suma, os custos da soldagem devem ser detalhadamente analisados, com este trabalho fundamentalmente realizado por um especialista neste processo de fabricação.

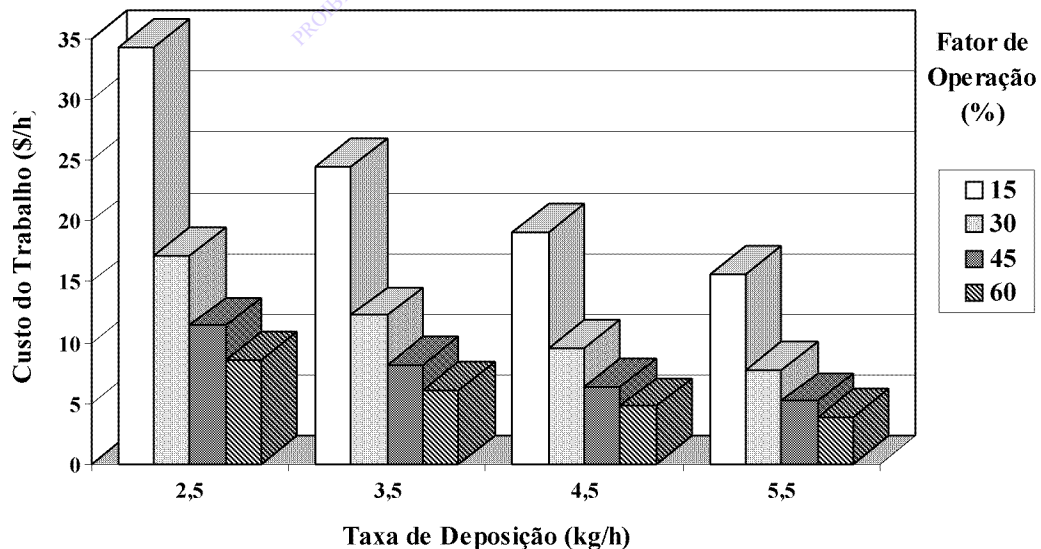


Figura 20.10 - Custo do Trabalho em Função da Taxa de Deposição e do Fator de Operação.

**A
N
E
X
O

01**

**CONTROLE E
ACONDICIONAMENTO DOS
GASES**

CONTROLES DA PRESSÃO E VAZÃO	422
Identificação dos Cilindros	423
Cálculo do Gás Contido no Cilindro	424

CÓPIA AUTORIZADA PELO AUTOR
DISTRIBUIÇÃO GRATUITA
PROIBIDA A COMERCIALIZAÇÃO EM QUALQUER FORMATO.

CONTROLES DA PRESSÃO E VAZÃO

Seja qual for o tipo do gás utilizado para soldagem, o mesmo deve ser suprido no bocal da tocha com pressão; vazão e conseqüente velocidade, de forma constante.

Os instrumentos capazes de reduzir a (variável) pressão de fornecimento e manter uma pressão de trabalho (quase) inalterável, são os reguladores, que podem ser dos seguintes principais tipos:

□ Regulador de Um Estágio

Composto por uma única câmara, com um parafuso de ajuste, mola, diafragma e haste, conforme mostrado na **Fig. A1.1**.

Quando o parafuso avança, o gás é admitido na câmara, aumentando a pressão sobre o diafragma, o que tende a fechar a entrada de gás. Desta forma, é alcançado um equilíbrio de forças, sendo estabilizada a pressão conforme o gás flui.

Apesar de ser efetivo para muitas aplicações, esse tipo de regulador somente deve ser empregado em situações que admitam leves flutuações da pressão de trabalho, conforme varia a pressão de fornecimento.

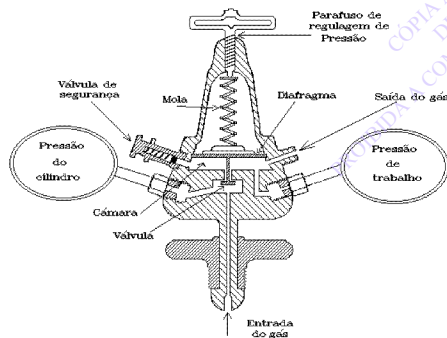


Figura A1.1 - Regulador de Pressão de Um Estágio.

□ Regulador de Dois Estágios

A pressão de fornecimento é inicialmente reduzida numa câmara essencialmente não ajustável, para uma menor pressão previamente calibrada (pelo fabricante). O gás passa, então, para uma segunda câmara, similar àquela descrita no regulador de um estágio, na qual a pressão de trabalho é estabelecida para o valor desejado, sendo que a **Fig. A1.2** apresenta de forma esquemática esse conjunto. Assim, a pressão de trabalho se mantém constante, apesar da variação na pressão de fornecimento, até ser alcançada a pressão calibrada no

primeiro estágio. Desse instante em diante, até o reservatório de gás ficar vazio, a resposta deste regulador é semelhante à de um estágio. Portanto, para aplicações críticas, o limite de utilização do reservatório de gás, é aquele ditado pela pressão de calibração do primeiro estágio.

Uma importante informação que deve ser fornecida ao usuário pelo fabricante do regulador, são as chamadas “curvas características” do mesmo. Na **Fig. A1.3** é apresentado um exemplo genérico, do qual é possível retirar os seguintes dados:

- A máxima vazão possível para uma determinada pressão de trabalho;
- Uma vez estabelecida a pressão de trabalho, a pressão de fornecimento para que seja alcançada a máxima vazão;
- A variação da pressão de trabalho, conforme é alterada a vazão, mas mantendo-se constante a pressão de fornecimento.

Outrossim, as curvas sobre a citada figura devem ser interpretadas da seguinte maneira:

- A curva pressão de trabalho é função da vazão, quando mantida constante a pressão de entrada;
- As regiões à esquerda da curva de fornecimento representam condições de pressão de trabalho e vazão, as quais somente serão obtidas se a pressão for, no mínimo, aquela indicada sobre a curva de fornecimento.

A determinação da vazão ótima do gás de proteção é realizada através de um aparelho denominado rotâmetro (ou fluxômetro). O mesmo é composto por um tubo (coluna), cujo diâmetro interno

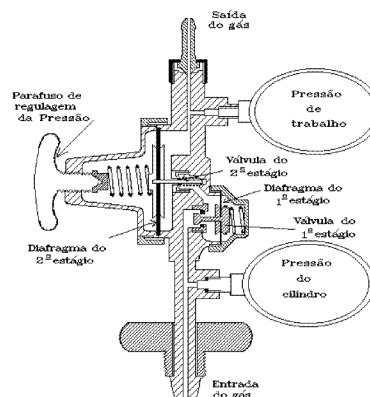


Figura A1.2 - Regulador de Pressão de Dois Estágios.

é precisamente conhecido, com um pequeno objeto (marcador), normalmente esférico, ou cônico, repousando no seu interior. Conforme o gás flui em contracorrente, o marcador flutua e, uma vez essa coluna sendo calibrada, a altura que o mesmo alcança indica a vazão do fluido em questão.

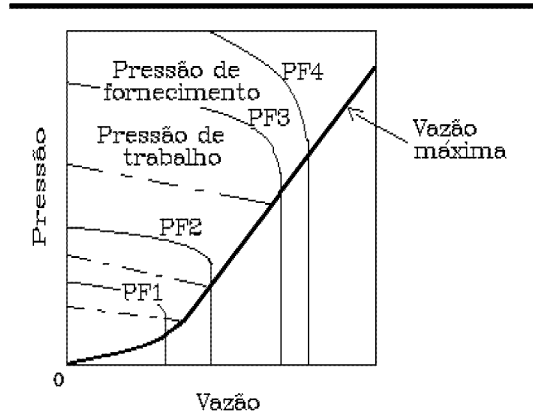


Figura A1.3 - Curva Característica de um Regulador de Pressão.

Um fato que não é muitas vezes claro para o usuário, se refere ao ponto sobre o marcador que a leitura deve ser efetuada, informação essa que deve ser requisitada ao fabricante do aparelho. Para marcador do tipo esférico, geralmente a leitura é realizada no seu equador.

Por outro lado, podem ocorrer situações em que é necessário utilizar um fluxômetro para medir vazões de um gás diferente daquele para o qual o mesmo foi calibrado. Nesses casos, a vazão lida deve ser multiplicada por um coeficiente de correção (F_c) dado por:

$$F_c = F_t \times F_d \times F_p \tag{A1.1}$$

sendo F_t , F_d e F_p os coeficientes de correção devi-

dos à temperatura, densidade e pressão de trabalho do novo gás que será utilizado, respectivamente. Estes coeficientes podem ser obtidos através das seguintes equações:

$$F_t = (T_c + 273) / (T + 273) \tag{A1.2}$$

$$F_d = (d_n / d_u)^{1/2} \tag{A1.3}$$

$$F_p = (P + P_a) / (P_c + P_a) \tag{A1.4}$$

onde:

T_c = temperatura de calibração do aparelho (°C);

T = temperatura de trabalho (°C);

d_n = densidade relativa ao ar, do gás com que o aparelho foi calibrado;

d_u = densidade relativa ao ar, do gás que está sendo utilizado;

P = pressão no interior da câmara do aparelho, com o gás que está sendo utilizado (bar);

P_a = pressão atmosférica (bar);

P_c = pressão de calibração do aparelho (bar).

Para a maioria das aplicações, entretanto, o único coeficiente de importância é aquele devido à correção da densidade do gás. Na **Tab. A1.1** estão apresentados os valores de correção para alguns gases, sendo que as misturas podem ser corrigidas, bastando se conhecer a proporção dos mesmos.

IDENTIFICAÇÃO DOS CILINDROS

O uso indevido e acidental de um gás, que supostamente deveria ser de outro tipo, pode causar problemas muito sérios. Para evitar que isso ocorra, as conexões variam na forma, tipo de rosca e algumas características gerais, além dos cilindros serem pintados com cores padronizadas. No Brasil isto é regido pela NB 46-1985 da ABNT, que normalizou a denominação das partes constituti-

Tabela A1.1 - Coeficientes de Correção devido à Densidade (para a Leitura de um Fluxômetro utilizado com Gás Diferente daquele de sua Calibração)

Gás da Calibração	Coeficiente para o Gás					
	Argônio	Dióxido de Carbono	Hélio	Hidrogênio	Nitrogênio	Oxigênio
Ar	0,87	0,81	2,76	3,89	1,04	0,98
Argônio	1,00	0,92	3,16	4,46	1,19	1,12
Hidrogênio	0,22	0,21	0,71	1,00	0,27	0,25
Nitrogênio	0,84	0,77	2,65	3,73	1,00	0,93
Oxigênio	0,90	0,83	2,83	3,99	1,07	1,00

vas dos cilindros, conforme apresentado na **Fig. A1.4(a)**, além das cores adotadas, as quais estão discriminadas na **Tab. A1.2**. Entretanto, a última edição da Norma Brasileira deve ser consultada.

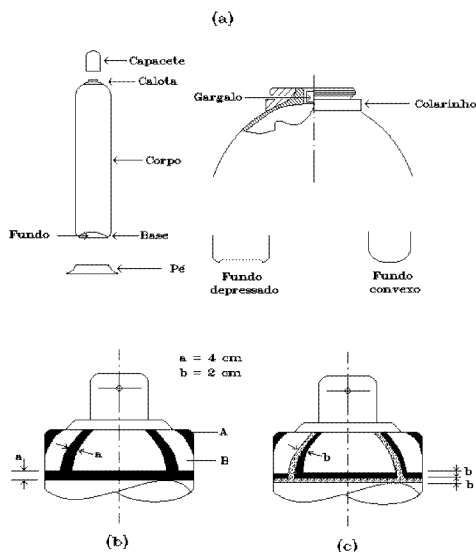


Figura A1.4 - Identificação dos Cilindros com Gases.

Para a pintura do cilindro, devem ser consideradas as seguintes regras:

- O gás é identificado pelas cores da pintura da calota e do capacete do cilindro.
- Em misturas binárias, os gases são identificados pela combinação das cores da **Tab. A1.2**. A cor do gás em maior proporção deve ser pintada no capacete e calota. Além disso, ainda sobre a

Tabela A1.2 - Cores nos Cilindros para Identificação dos Gases (ABNT NB46-1985)

Gás	Cor	Notação Munsell
Acetileno	Bordô	7,5 R 3/8
Ar comprimido (industrial)	Azul segurança	2,5 PB 4/10
Argônio	Marrom canalização	2,5 YR 2/4
Dióxido de carbono	Alumínio	-
Hélio	Alaranjado segurança	2,5 YR 6/14
Hidrogênio	Amarelo segurança	5 Y 8/12
Nitrogênio	Cinza claro	N 6,5
Oxigênio	Preta	N 0,5
"Gás Especial"	Bege	10 YR 7/6

calota, é coloca uma tarja com a cor do outro gás, de acordo com a **Fig. A1.4(b)**.

- Em misturas ternárias, a cor correspondente ao gás em maior proporção deve ser pintada sobre o capacete e a maior superfície da calota. Tarjas com cores dos outros gases devem ser pintadas na calota, conforme ilustrado na **Fig. A1.4(c)**.

- Gases "especiais"; padrão; misturas especiais e misturas com mais de três componentes, devem ter a calota e o capacete pintados com a cor bege.

- Não é obrigatória a pintura do corpo do cilindro. Quando isto ocorrer, a mesma deve ser igual à do capacete.

- Cada cilindro deve ter sobre o seu corpo o nome do gás, ou a sua fórmula química, puncionado com letras de altura mínima igual a 6 mm.

CÁLCULO DO GÁS CONTIDO NO CILINDRO

É importante a informação do quanto ainda resta de gás no cilindro para ser utilizado. Em geral, os gases somente são acondicionados no estado líquido para consumo muito grande e não são, assim, fornecidos em cilindros. O CO_2 , entretanto, está no interior do cilindro quase que totalmente no estado líquido, devido ao seu baixo ponto de ebulição e de ocorrer a liquefação com pequena pressão. Esse gás permanece gasoso somente na porção superior do cilindro. Conforme o mesmo flui, evapora-se imediatamente uma porção equivalente do líquido, sendo mantido o equilíbrio entre as duas fases. Portanto, o manômetro de alta pressão do regulador sempre indicará a pressão com que o cilindro foi fornecido (normalmente 52 bar a 15°C e 1 atm) enquanto existir CO_2 no estado líquido.

Quando restar somente gás no interior do cilindro, essa pressão diminuirá muito rapidamente. Outrossim, devido à absorção de calor na mudança de fase líquido-gás e em altas vazões, pode ser necessário colocar um aquecedor na saída do cilindro, impedindo o congelamento do fluido. Observe-se, também, que um cilindro de CO_2 nunca deve ser utilizado na posição horizontal (regra válida, aliás, para cilindros contendo qualquer tipo de gás), ou muito inclinado, pois a fase líquida pode fluir para o exterior.

Portanto, a estimativa do CO_2 disponível para uso deve ser realizada por pesagem do cilindro, sabendo que 1 kg do mesmo a 15°C e 1 atm produz 563 litros de gás. Caso alguma condição se altere, é possível calcular aproximadamente o novo

volume pela seguinte equação do gás ideal:

$$P_1 V_1 / T_1 = P_2 V_2 / T_2 \quad [A1.5]$$

onde P, V e T significam pressão (bar), volume (m³) e temperatura (K), respectivamente, com os índices “1” simbolizando a condição que o gás se encontrava e o “2” aquela para a qual ela se alterou.

Exemplificando: qual o volume de gás produzido por 15 kg de CO₂ a 30 °C e 1 atm?

Solução: Sabe-se que 15 kg a 1 atm e 15 °C produz 8445 litros de CO₂. Para as condições dadas:

$$P_1 = P_2 = 1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar}$$

$$V_1 = 8445 \text{ l} = 8,445 \text{ m}^3 \quad ; \quad V_2 = ?$$

$$T_1 = 15 \text{ °C} = 288 \text{ K} \quad ; \quad T_2 = 30 \text{ °C} = 303 \text{ K}$$

Aplicando a equação A1.5 resulta $V_2 = 8,885 \text{ m}^3$

Para os demais gases, via de regra, a pressão do manômetro é proporcional ao volume existente e, portanto, deve ser empregada a equação A1.5.

Exemplificando: qual o volume de argônio disponível (para ser utilizado no bocal) a 1 atm e 25 °C, se o cilindro que o contém possui volume interno de 50 litros e o manômetro acusa 110 bar à mesma temperatura que será utilizado ?

Solução: Para estimar o volume, deve se considerar que a pressão de cálculo é a absoluta, ou seja, a lida no manômetro mais a atmosférica. Portanto:

$$P_1 = 110 + 1,013 = 111,013 \text{ bar}$$

$$P_2 = 1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar}$$

$$V_1 = 50 \text{ l} = 0,050 \text{ m}^3 \quad ; \quad V_2 = ?$$

$$T_1 = T_2 = 25 \text{ °C} = 298 \text{ K}$$

Novamente, utilizando a equação A1.5, resulta $V_2 = 5,479 \text{ m}^3$.

Como mencionado, os valores calculados pela equação A1.5 são aproximados. Isso deve-se ao fato de que estes gases são “reais” e, nesse caso, valores bastante próximos são obtidos, se for introduzido o chamado “fator de compressibilidade” (Z) e o volume residual, geralmente bastando considerar o primeiro.

Esse fator Z (adimensional) de compressibilidade depende do tipo de gás; da temperatura e da pressão que o mesmo se encontra, sendo fornecido em manuais. Entretanto, para a precisão geralmente ne-

cessária, é suficiente utilizar a equação A1.5.

Saliente-se, que os outros gases são normalmente fornecidos com pressão muito mais alta daquela do CO₂, sendo extremamente perigoso o uso de acessórios não indicados especificamente para operar com os mesmos.

Por outro lado, o gás representa uma expressiva parcela dos custos da soldagem e nas situações em que ocorre freqüentes interrupções na operação, é conveniente o uso de um “economizador” (aparelho que controla a vazão logo no início do fluxo). Isso é importante, porque quando o solenóide que libera o gás é aberto, a alta pressão da linha provoca um fluxo muito mais alto do que aquele pré-fixado. Conforme mostrado na **Fig. A1.5**, o fluxo de gás sem economizador somente será reduzido para aquele estabelecido, passados de 3 a 4 s após o início da solda. Com o uso do economizador, é praticamente instantâneo o estabelecimento do regime pretendido e a economia pode alcançar 30%, ou até mais.

Uma questão adicional que deve ser ressaltada, relaciona-se com a variedade de gases utilizados numa mesma empresa. O corpo técnico da mesma deve procurar padronizar ao máximo possível os tipos dos gases empregados pois, dessa forma, é aumentado o poder de barganha do comprador junto ao fornecedor, além de ser reduzida a possibilidade de uso indevido dos mesmos.

Outrossim, além das considerações técnicas, outros fatores que influenciam a seleção do gás de proteção são:

- Taxa de consumo;
- Demanda de pico;
- Frequência do uso;
- Conveniência da forma de fornecimento.

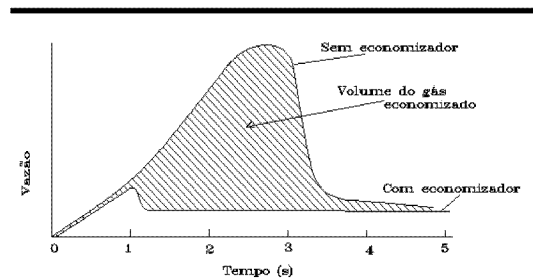


Figura A1.5 - Efeito do “Economizador” sobre o Gás Inutilizado em cada Início de Operação.

**A
N
E
X
O**

02

ASPECTOS AMBIENTAIS E DE SEGURANÇA

INTRODUÇÃO	428
PRINCIPAIS ASPECTOS A SEREM OBSERVADO	428
Gases	428
Fumos e Substâncias Tóxicas	429
Choque Elétrico	432
Ruído	432
Radiação	433
Equipamentos de Proteção	433

INTRODUÇÃO

É essencial que seja minimizado o impacto sobre a saúde e o meio ambiente provocado pelas operações de soldagem e técnicas conexas, pois são incorretas, no mínimo, as atitudes que pretendem desconhecer os problemas gerados, ou que os exageram.

Portanto, o enfoque deve ser maduro o suficiente para que o assunto seja discutido por toda a sociedade, e essa defina os níveis aceitáveis da agressão que sofrerá, por menor que seja. Ou, então, a mesma decida que não pretende admitir esse tipo de atividade.

Não deve ser entendida como verdadeira a opção, muitas vezes colocada por certos indivíduos, de que “ou a sociedade aceita a poluição, ou não terá tal, ou qual facilidade...”. Existem soluções para produzir com níveis muito baixos de polui-

ção mas, obviamente, por um custo, o qual sempre será menor do que aquele da destruição da vida.

Portanto, a seguir são apresentados alguns dos principais problemas de segurança e impacto sobre o ambiente, provocados pelos processos mais usuais de união dos materiais e corte térmico.

Outrossim, com esse Anexo não se está propondo limites de aceitação e nem regras de comportamento. Simplesmente procura-se alertar empresários e demais trabalhadores envolvidos nessas atividades, ou seja, engenheiros; administradores; técnicos e soldadores, pois os mesmos devem conhecer perfeitamente as dificuldades envolvidas e procurar soluções para minimizá-las, já que os efeitos serão sentidos por todos, indiscriminadamente.

PRINCIPAIS ASPECTOS A SEREM OBSERVADOS

GASES

Os gases para soldagem/corte são geralmente estocados numa alta pressão (até cerca de 200 bar), a qual é reduzida para aquela de trabalho (em torno de 2 bar). A liberação súbita dos mesmos é extremamente perigosa, sendo que as seguintes regras devem ser observadas:

- Os cilindros e demais acessórios devem ser tratados com delicadeza;
- A abertura de cilindros, ou a fixação dos reguladores, deve ser realizada somente com ferramentas apropriadas;
- A válvula de um cilindro nunca deve ser removida;
- Chamas, ou qualquer outra fonte de calor (cigarros, etc.), devem ser mantidas afastadas do local de estoque dos gases;
- A estocagem deve ser em área ventilada e protegida de eventuais invasores;
- O equipamento deve ser devidamente limpo e sofrer inspeção e manutenção periódica (programada), não somente sofrer conserto quando ocorrer defeito;

Por outro lado, o risco do retorno da chama no maçarico é minimizado se:

- Válvulas de segurança forem utilizadas;

- Os gases forem empregados com a pressão correta;
- O bico possuir dimensões certas;
- O gás for adequadamente inflamado.

Sob este aspecto, algumas das características dos gases geralmente utilizados são as seguintes:

- Hidrogênio: sendo menos denso do que o ar, o mesmo se acumula nas partes mais altas do ambiente. Esse gás forma uma mistura explosiva com o oxigênio, ou o ar;
- Acetileno: também é menos denso do que o ar. Não é tóxico, mas apresenta efeito anestésico e em alta concentração pode matar por asfixia. Forma mistura explosiva com o ar entre cerca de 2 e 82%;
- Propano: diferentemente dos dois gases anteriores, o mesmo é mais denso do que o ar, não devendo ser utilizado em ambientes confinados, pois se acumula nos espaços mais baixos do mesmo. É estocado na forma líquida a cerca de 6,5 bar, sendo explosivas as misturas entre 2,2 e 9,5% desse gás com o ar. É levemente anestésico e causa asfixia em altas concentrações.
- Gases Inertes e Oxidantes: Os gases inertes geralmente utilizados são argônio e hélio, os quais não são tóxicos, ou inflamáveis. O fato de causarem asfixia, é a principal precaução que deve ser tomada com os mesmos. Ambientes muito ri-

cos em oxigênio são perigosos, pois esse gás promove a combustão. Por sua vez, o dióxido de carbono (CO_2) não é quimicamente inerte e pode causar intoxicação.

FUMOS E SUBSTÂNCIAS TÓXICAS

Há uma séria preocupação em todo o mundo, com relação aos efeitos sobre a saúde e o meio ambiente provocados por fumos e gases produzidos pela soldagem e técnicas conexas. No Brasil, aparentemente a tendência é seguir os padrões estabelecidos por diversas organizações (privadas e governamentais), as quais desenvolveram indicadores de controle, destacando-se as seguintes, todas dos EUA: “National Institute of Occupational Safety and Health” (NIOSH); “Occupational Safety and Health Administration” (OSHA) a qual estabeleceu o PEL (“Permissible Exposure Limits”); “American Conference of Governmental Industry Hygienists” (ACGIH), com o TLV (“Threshold Limit Values”); “Control Substances Hazardous to Health” (COSHH), a qual determinou os padrões MEL (“Maximum Exposure Limits”) e OES (“Occupational Exposure Standard”).

Por outro lado, alguns produtos, apesar de não serem empregados na soldagem propriamente dita, encontram uso nas operações prévias ou posteriores à mesma. Entre estes estão, por exemplo, alguns solventes inflamáveis, os quais são utilizados para limpeza e pintura, devendo ser tomadas as máximas precauções para sua identificação e estocagem em lugar seguro. Em particular, alguns solventes para limpeza contém hidrocarbonetos clorados, os quais se decompõem no arco elétrico e formam substâncias altamente tóxicas. Dióxido de enxofre e cloretos também devem ser manuseadas com extremo cuidado.

Os fumos resultantes das operações de soldagem e corte térmico, consistem de partículas e gases. Para os mesmos serem considerados tóxicos, não basta somente conhecer suas composições químicas. Outras importantes características (no mínimo) são as seguintes: estado de oxidação; estrutura cristalina e solubilidade nos fluidos do corpo. Portanto, não é imediata, ou simples, a constatação da toxidez dos fumos gerados numa dada situação de soldagem e técnicas conexas.

As partículas de fumos com diâmetro médio entre 0,2 e 10 μm podem se depositar nos pulmões. Certos tipos, como aquelas de zinco e cobre, podem causar náuseas e irritação respiratória

conhecida como “febre de fumo metálico”. Fluoretos de cromo hexavalente e bário, podem causar envenenamento sistêmico. Por infortúnio, é maior a produção exatamente daqueles tamanhos de partículas que mais afetam os pulmões (0,2 à 10 μm).

Por sua vez, outros gases podem ser produzidos através da dissociação e/ou ionização do ar pelo arco elétrico (ou chama) e, em alguns casos, pela decomposição do material de proteção, ou outras substâncias contidas no consumível, na região do arco. Geralmente se encontram em maior proporção os óxidos de nitrogênio e ozônio.

Outrossim, os níveis máximos de exposição permitidos são usualmente referidos aos seguintes conceitos:

- Média Ponderada do Tempo (MPT) em 8 h, ou seja, o limite máximo ponderado num tempo normal de trabalho de 8 h;
- Limite para exposição de curto tempo, ou a máxima exposição em até 10 minutos.

O MPT varia para cada país e está sendo constantemente revisado, atualmente apresentando os seguintes valores típicos:

- Ozônio: 0,1 ppm;
- Dióxido de nitrogênio: 3,0 ppm;
- Óxido nítrico: 25 ppm;
- Monóxido de carbono: 50 ppm;
- Fosfogêneo: 0,4 ppm.
- Total dos fumos com partículas: 5 mg/m^3 .

De forma geral, os processos de soldagem produzem os gases nocivos apresentados na **Tab. A2.1**.

Com relação à produção de ozônio, a mesma

Tabela A2.1 - Principais Gases Resultantes da Soldagem

Processo de Soldagem	Principais Gases
TIG (argônio)	Óxidos de Nitrogênio e Ozônio.
MIG (argônio)	Óxidos de Nitrogênio e Ozônio.
MAG (CO_2)	Monóxido de Carbono. Óxidos de Nitrogênio.
Eletrodo Revestido	Flúor. Óxidos de Nitrogênio.
Arame Tubular	Flúor. Monóxido de Carbono. Óxidos de Nitrogênio.
Arco Submerso	Flúor. Monóxido de Carbono.

mostra-se muito maior quando o gás de proteção (em TIG, ou MIG) é argônio puro, tornando-se mínima na soldagem MAG dos aços (CO₂ puro). Além disso, pelo menos na soldagem MIG do alumínio, ocorre um notável aumento do ozônio (cerca de 8 vezes), quando o modo de transferência do metal passa de curto-circuito para aerossol.

A seguir estão listados os principais sintomas provocados por diferentes concentrações de ozônio na atmosfera respirada por um humano, todas acima do limite máximo de 0,1 ppm estabelecido pelos padrões PEL e TLV:

- 0,3 ppm: Irritações no nariz e garganta, acessos de tosse. A exposição por longos períodos agrava casos de asma alérgica.
- 0,5 ppm: Garganta e boca secas; irritações respiratórias; dor de cabeça; fadiga; náuseas.
- 0,9 ppm: Irritações nos olhos, nariz e garganta; dor de cabeça; náuseas.
- 1,0 ppm: Olhos, nariz e garganta secos e irritados, podendo resultar em bronquite.

Portanto, o ambiente deve ser bem ventilado e, em situações extremas, o operador deve respirar através de máscaras, ou ar especialmente fornecido.

Uma interessante questão a ser notada, é que os diferentes consumíveis produzem níveis distintos de fumos e que os parâmetros de soldagem (principalmente a intensidade da corrente) exercem efeito sobre a taxa com que os mesmos são gerados. Por outro lado, o mecanismo da geração destes fumos também é característico para cada tipo de consumível. Por exemplo, nos eletrodos revestidos básicos, há maior formação de fumos devido à vaporização dos elementos mais voláteis na superfície fundida da escória, enquanto que nos outros tipos de eletrodos, a principal fonte dos fumos é a gota do metal fundido.

A “Taxa de Geração dos Fumos” (TGF), em conjunto com o grau de toxidez dos produtos gerados, são indicadores usuais do nível de periculosidade que se pode encontrar em cada operação de soldagem. A TGF tanto pode ser expressa em massa de fumos produzida por tempo de soldagem (g/min), quanto massa desses fumos por unidade de massa utilizada do consumível (mg/g).

Na **Tab. A2.2** estão ilustrados TGF para diversos tipos de eletrodos revestidos. Note-se que a classe AWS E7018 apresenta maior TGF do que a AWS E7024 (possivelmente por ação do CaF₂ no primeiro), enquanto que o celulósico AWS E6010 produz a mais elevada TGF entre todos,

provavelmente devido ao alto conteúdo de materiais orgânicos no seu revestimento.

Por outro lado, também pode-se observar nesta tabela, que a elevação da corrente provoca, em todos os casos, maior produção de fumos.

Na soldagem MIG/MAG de aços ao carbono a

Tabela A2.2 - Taxa de Geração de Fumos (TGF) na Soldagem com Eletrodos Revestidos

Classe AWS*	Corrente** (A)	Tensão (V)	TGF (g/min)	TGF (mg/g)
E6010	110	29	0,32	19
E6010	170	31	0,66	24
E7018	160	22	0,28	8
E7018	220	26	0,65	18
E7024	180	32	0,29	8
E7024	230	36	0,47	8
E308-16	160	23	0,25	10
E308-16	210	28	0,51	16

Notas: * Diâmetro 4 mm; ** Corrente Contínua Eletrodo Polaridade Negativa

TGF é diretamente afetada, tanto pela corrente, quanto proporção de gases oxidantes na mistura com o argônio, conforme ilustrado na **Tab. A2.3**.

Por sua vez, os metais e seus compostos, em dosagens excessivas, podem provocar os seguintes sintomas num ser humano:

- Alumínio: Dores de cabeça; letargia; irritação nos olhos; inflamações no sistema respiratório e edema pulmonar.
- Bário: Vômitos; diarreia; cólicas e colapso cardíaco.
- Berílio: (**PERIGO!**) Extremamente tóxico, tanto na forma elementar, quanto na forma combinada (óxidos).
- Chumbo: (**PERIGO!**) Saturnismo. Perda do apetite; gosto metálico na boca; resfriados; ansiedade; náuseas; cansaço; palidez; dores nos músculos e nas articulações; cólicas. É preocupante o fato de que, pelo menos durante um certo período, o indivíduo pode estar intoxicado, mas não apresentar sintoma algum. A exposição prolongada a fumos ricos em chumbo afeta o sistema urinário e reprodutor, podendo resultar em impotência, esterilidade e descendentes com sérios problemas mentais.
- Cobalto: Irritações no nariz e na garganta; incapacitação permanente por pneumonia crônica.

Tabela A2.3 - Taxa de Geração de Fumos (TGF) para o Processo MAG na Soldagem de Aços ao Carbono*

Gás de Proteção	Corrente (A)	Tensão (V)	TGF (g/min)
Ar+5% CO ₂ +2% O ₂	180	22	0,11
	300	33	0,16
Ar+12% CO ₂ +2% O ₂	160	18	0,12
	270	32	0,24
Ar+20% CO ₂ +2% O ₂	180	23	0,16
	300	35	0,27
CO ₂	180	26	0,20
	300	40	0,44

* Nota: Diâmetro do arame = 1,2 mm.

- Cobre: Febre; irritações no nariz e garganta; dores de cabeça; letargia; náuseas. Pode resultar em edema pulmonar.

- Fluoretos: Irritações nos olhos, nariz e garganta; gastrite e anemia. Podem surgir erupções cutâneas; doenças ósseas; edema pulmonar.

- Óxido de Cádmio: (**PERIGO!**) Irritações nas vias respiratórias e edema pulmonar, podendo evoluir até pneumonia, em curtos períodos de exposição em altas concentrações (0,5 mg/m³ ou mais). Longos períodos de exposição, em baixas concentrações, pode provocar efisema pulmonar e possíveis danos no sistema urinário. Nas (altíssimas) concentrações de 50 mg/m³, a morte não é instantânea, porém ocorre alguns dias após. Além disto, a inalação deste óxido pode provocar gastrite e nefrite crônica.

- Óxido de Ferro: Irritações respiratórias (nariz, garganta e pulmões). Longos períodos de exposição podem causar depósitos de óxido de ferro nos pulmões (siderose), sendo necessário de 6 a 10 anos de exposição para se detectar os mesmos por Raios-X. Não há certeza de seu efeito nocivo sobre os humanos.

- Óxido de Magnésio: Dores de cabeça; letargia; irritações nos olhos; febre; edema pulmonar.

- Óxido de Zinco: Febre; sabor metálico na boca; calafrios; sede intensa; dores musculares e de cabeça; náuseas.

- Manganês: Efeitos neurológicos semelhantes ao “mal de Parkinson” após um período de 6 meses a 2 anos de exposição em pequenas doses. Altas concentrações podem resultar em pneumonia.

- Molibdênio: Irritante respiratório em curtos períodos de exposição. Os efeitos após longos

períodos ainda não são completamente conhecidos.

- Silício: Não existem evidências de que a sílica amorfa (tal como se apresenta nos fumos de soldagem) cause prejuízos notáveis à saúde. Aparentemente, este composto se comporta de forma diferente da sílica cristalina (a qual produz grave doença pulmonar - silicose).

- Vanádio: Dor de cabeça; letargia; irritações na pele e nos olhos; bronquite; efisema; pneumonia.

Por outro lado, existem indícios de que o cromo e o níquel provocam câncer nos humanos. Ambos elementos são encontrados em grande proporção nos aços inoxidáveis (e outras ligas) e não há, em curto prazo, formas conhecidas para eliminá-los, ou substituí-los nestes materiais.

Entretanto, ainda não é definitiva a conclusão de que estes elementos são cancerígenos. Certos compostos apresentam resultados positivos em alguns testes, mas é muito difícil isolar os efeitos destes fumos daqueles provocados pelo hábito de fumar, por exemplo, o qual é, decididamente, cancerígeno. Pesquisas realizadas com trabalhadores em galvanoplastia, os quais lidam com cromatos e sulfeto de níquel, demonstraram que os mesmos são cancerígenos.

Apesar de não ter sido tão bem estudado quanto o cromo, certos testes indicam que o níquel é cancerígeno. Além disto, o mesmo causa irritações e inflamações no sistema respiratório e ocular, provocando dor de cabeça e letargia.

Tal é a preocupação dos órgãos reguladores, que recentemente a OSHA modificou o limite máximo admitido no ambiente para o cromo hexavalente (Cr⁺⁶) produzido na soldagem, passando o mesmo de 0,1 g/m³ para 0,005 g/m³ (ou uma redução de 2000%).

Na soldagem dos aços inoxidáveis com eletrodos revestidos, os fumos possuem entre 3 à 7% de cromo, sendo que deste total, até 90% pode ser composto por Cr⁺⁶, o que excede em mais de 50% os valores admitidos em quaisquer condições de soldagem (ou mais de 10 vezes os limites admitidos pelos padrões PEL e TLV !).

Por sua vez, na soldagem MIG/MAG dos aços inoxidáveis, os fumos produzidos apresentam em torno de 15% de Cr⁺⁶.

Note-se, também, que com a redução dos silicatos de sódio e potássio no revestimento dos eletrodos, há menor produção nos fumos de Cr⁺⁶. Porém, o lítio (metal alcalino da mesma família

do sódio e potássio) não parece cooperar para a formação do Cr^{+6} , enquanto que o cálcio participa da sua formação, mas não na mesma intensidade que o sódio e o potássio.

Entende-se, hoje, que a possibilidade do cromo ser cancerígeno está relacionada com a sua solubilidade nos fluidos do corpo, pois alguns compostos relativamente insolúveis, tais como os cromatos de cálcio, zinco e chumbo não demonstram potencial cancerígeno. Apesar do Cr^{+3} causar irritação das mucosas e febre devido aos fumos, o mesmo aparentemente não é cancerígeno. Porém, o Cr^{+6} (solúvel) facilmente se introduz no interior das células e causa distúrbios incontroláveis.

CHOQUE ELÉTRICO

A circulação pelo corpo humano de correntes tão baixas quanto 40 mA, pode causar contração dos músculos do coração e pulmões, seguido por falha do primeiro órgão e inabilidade para respirar. A suscetibilidade varia para cada indivíduo mas, em média, é aceito que:

- Correntes de 4 a 5 mA causam dor;
- Correntes de 10 a 15 mA causam contração muscular e podem impedir que o contato do corpo com a fonte seja impedido pela própria pessoa;
- Correntes maiores do que 30 mA causam perda de consciência;
- Correntes entre 80 e 100 mA, se circularem através do tórax, geralmente são fatais.

Considerando que o corpo humano possui resistência elétrica média de 1000 Ω , é possível circular pelo mesmo correntes com níveis perigosos, provocadas por tensões tão baixas quanto 30 V. (**Atenção:** esta é a resistência elétrica **média** do corpo humano. O seu corpo provavelmente possui uma resistência elétrica diferente e, portanto, não faça nenhum tipo de "experiência" nesse sentido...). Conseqüentemente, os contatos elétricos das fontes de potência devem ser tratadas com extrema precaução. A utilização de correto isolamento entre o corpo e o circuito elétrico diminui o risco de choque, mas a umidade aumenta este perigo.

As tensões de alimentação no primário das fontes são altas (geralmente 220, 380, ou 440 V em CA). Tensões mais altas ainda podem ser encontradas no circuito interno das fontes, destacando-se o Plasma e a alta corrente contínua do primeiro estágio do primário de um circuito inversor. Ten-

sões extremamente altas são produzidas nos processos LASER e Feixe de Elétrons.

Portanto, todo o circuito elétrico precisa ser muito bem isolado e somente pessoal qualificado pode realizar manutenção das fontes, sendo assegurado o respeito às seguintes recomendações gerais:

- Os soldadores/operadores e ajudantes foram plenamente instruídos sobre as precauções que devem tomar e riscos que correm;
- O isolamento do operador é perfeito (isso pode significar a perda de uma vida humana);
- O equipamento está corretamente instalado e existem dispositivos de alta taxa de resposta para limitar a corrente;
- O equipamento está adequadamente aterrado;
- A manutenção é periodicamente realizada e por pessoal competente;
- São tomadas precauções adicionais, principalmente em ambientes confinados e/ou úmidos (baixar a tensão, por exemplo).

RUÍDO

O excesso de ruído pode causar surdez temporária, ou permanente, além de fadiga, reduzindo, assim, a concentração e a eficiência do indivíduo. A melhor solução não é somente usar protetores, mas minimizar a origem do ruído.

O ruído é medido através do nível de pressão do som, em decibéis (dB). Diversas escalas logarítmicas são utilizadas, dependendo da distribuição da frequência do ruído, sendo que a mais usual é a "A", ou dB(A), a qual é baseada no espectro das frequências ouvidas pelos humanos. Alguns exemplos típicos (médios) são:

- Sala quieta: 45 dB(A);
- Rua movimentada: 80 dB(A);
- Granalha abrasiva; desbaste manual: 80 a 115 dB(A);
- Corte Plasma; goivagem ao arco (com ar); decolagem de um avião a jato: 120 dB(A);

O limite da dor se encontra em torno de 135 dB(A), sendo que o perigo de surdez depende não somente do nível do ruído mas, também, do período de exposição. Portanto, esses dois fatores devem ser especificados, com os valores apresentados na **Tab. A2.4** geralmente aceitos.

Tabela A2.4 - Nível e Período de Exposição ao Ruído

Nível Médio de Ruído dB(A)	Tempo Máximo de Exposição Por Dia
90	8 horas
99	1 hora
105	15 minutos
115	ZERO

RADIAÇÃO

O arco elétrico gera radiações desde o ultra-violeta, através da luz visível, até o infra-vermelho. Não existe evidência de que o mesmo produza radiações ionizantes, mas o Feixe de Elétrons pode produzir Raios-X.

A radiação ultra-violeta queima a pele e causa danos aos olhos, além do que, ondas de curto comprimento como essas (130 a 175 nm) decompõem o oxigênio, formando ozônio. Portanto, além da proteção do corpo, o operador somente deve olhar

para o arco através do correto filtro colocado no elmo, sendo que na **Tab. A2.5** estão indicados aqueles mais adequados para cada situação, conforme a numeração adotada pela AWS.

Modernamente existem elmos com visor de cristal líquido (ou outro material), o qual é perfeitamente transparente quando não está sob o efeito das radiações do arco. Entretanto, tão logo esse inicie (geralmente 1/500 s), o visor atinge o nível de filtragem pré-fixada pelo operador. Esse sistema é mais um item que pode ser considerado para aumentar a produtividade, mas deve ser muito bem escolhido, já que a taxa com que a ação do filtro se torna efetiva precisa ser absolutamente assegurada.

EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO

As **Figs. A2.1 à A2.5** ilustram alguns dos vários equipamentos utilizados para a proteção do soldador, ou operador, na soldagem e técnicas conexas. Os aventais, luvas, perneiras, etc., geralmente são de couro, mas modernamente esse material está sendo substituído por sintéticos.

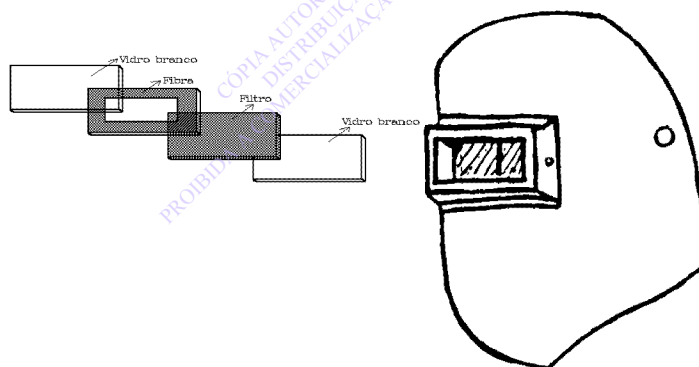


Figura A2.1 - Elmo com detalhe do Visor e Filtro para Proteção dos Olhos.

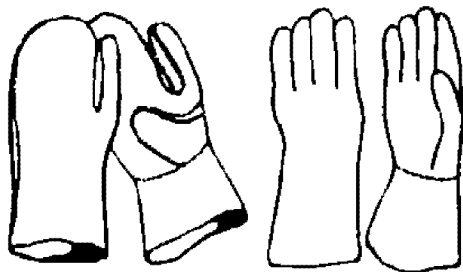


Figura A2.2 - Tipos de Luvas.

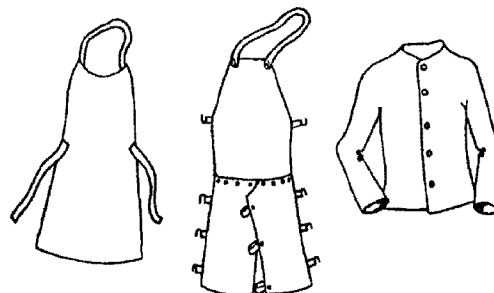


Figura A2.3 - Tipos de Aventais Protetores.

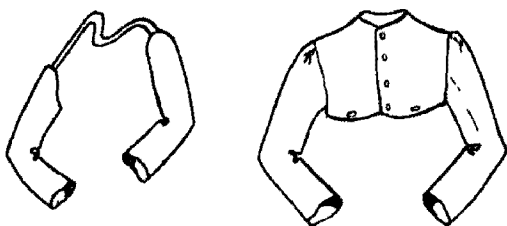


Figura A2.4 - Proteção para os Braços e/ou Tórax.

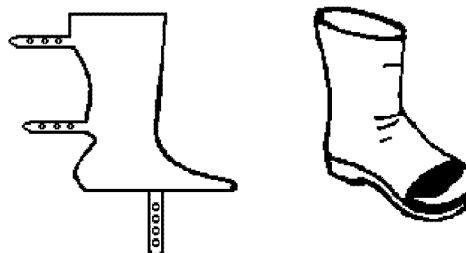


Figura A2.5 - Polaina e Bota.

Tabela A2.5 - Filtros Recomendados para as Operações de Soldagem e Técnicas Conexas (AWS)

Processo	Corrente (A)	Núm. Adm. (min.)	Núm. Sugerido	Processo	Corrente (A)	Núm. Adm. (min.)	Núm. Sugerido
Eletrodo Revestido	< 60	7	-	Eletrodo de Carbono (corte com ar)	< 500	10	12
	60 a 160	8	10		500 a 1000	11	14
	160 a 250	10	12	Brasagem	(chama)		3 ou 4
	250 a 550	11	14	Solda Branda	(chama)		2
MIG e Eletrodo Tubular	< 60	7	-	Pulverização Térmica	(chama)		2 a 4
	60 a 160	10	11				
	160 a 250	10	12				
	250 a 500	10	14				
TIG	< 50	8	10	Exotérmicos e Cerâmicos	(chama)		4 a 8
	50 a 150	8	12	Plasma e Arco	-	-	9 a 12
	150 a 500	10	14	Operações de Fusão	-	-	4 a 6
Plasma (solda)	< 20	6	6 a 8	ESPESSURA DA CHAPA (mm)			
	20 a 100	8	10				
	100 a 400	10	12				
	400 a 800	11	14				
Plasma (corte)	< 300	8	9	Solda Oxi-gás (aços)	< 3,2		4 ou 5
	300 a 400	9	12		3,2 a 12,7		5 ou 6
	400 a 800	10	14		> 12,7		6 a 8
Plasma (corte)	< 300	8	9	Corte Oxi-gás (aços)	< 25		3 ou 4
	300 a 400	9	12		25 a 100		4 ou 5
	400 a 800	10	14		> 150		5 ou 6

**A
N
E
X
O

03**

INTRODUÇÃO À UNIÃO DOS PLÁSTICOS E CERÂMICOS

SOLDAGEM DOS PLÁSTICOS	436
Introdução	436
Processos de Soldagem	436
UNIÃO DOS CERÂMICOS	439
Introdução	439
Processos de União	439

CÓPIA AUTORIZADA PELO AUTOR
DISTRIBUIÇÃO GRATUITA
PROIBIDA A COMERCIALIZAÇÃO EM QUALQUER FORMATO.

SOLDAGEM DOS PLÁSTICOS

INTRODUÇÃO

Até 1862 somente se dispunha dos grandes "polímeros" naturais, tais como madeira; bambu; gramíneas (papiro, papel); sêda; peles; lãs; linho; juta, além da borracha natural. Naquele ano tornou-se disponível o primeiro polímero sintético (nitrato de celulose). Ainda no século XIX obteve-se ebonite, desde a borracha vulcanizada, além de também ter sido desenvolvido a baquelite.

Estes polímeros e as centenas de outros tipos obtidos posteriormente, alteraram profundamente o modo de vida da humanidade e compõem um importantíssimo segmento industrial. Os mesmos são produtos orgânicos produzidos pelo homem, obtidos ou por modificação química de produtos naturais, ou por síntese de compostos complexos de moléculas simples (monômeros), derivados principalmente de produtos petroquímicos (por exemplo, o polietileno, formado por moléculas de etileno). Estes materiais apresentam grande massa molecular, geralmente formada por carbono, mas alguns são baseados principalmente no silício (silicones).

Os plásticos contém essencialmente um ou mais polímeros, são sólidos no estado final (de uso) e suas propriedades gerais podem ser significativamente alteradas, através da adição de estabilizantes; carga; pigmentos e plastificadores. Destacam-se as seguintes cargas, as quais modificam principalmente as propriedades mecânicas e físicas dos plásticos: carvão; arames metálicos; asbestos; algodão e fibra de vidro. Os materiais "compósitos", formados pela adição de fibras ao plástico, resultam com altas propriedades mecânicas e físicas, inclusive com possibilidade de controle do grau de anisotropia.

As aplicações destes materiais são muito grandes, destacando-se as indústrias automobilística, utensílios domésticos, aeroespacial e engenharia em geral.

Existem duas grandes categorias de plásticos, ou seja:

▪ Termoplásticos

Formados por grupos de moléculas, cuja força de união é relativamente fraca. Como consequência, pequenos aumentos de temperatura tornam os mesmos extremamente dúcteis, sendo possível repetir várias vezes esta operação. O maior interesse aqui recai sobre estes materiais, pois os mes-

mos podem ser soldados, ou extrudados.

▪ Plásticos Estabilizados

Obtidos desde reações químicas, tais como formaldeído de uréia, ou de de fenol; epoxi; poliéster e silicones. Estes plásticos, durante a produção, podem ser conformados em temperaturas de até cerca de 150 °C. Quando resfriados enrijecem e, se novamente aquecidos, sofrem degradação. Portanto, não serão aqui analisados.

Nas **Tab. A3.1** e **A3.2** estão ilustradas diversas propriedades físicas e mecânicas de alguns termoplásticos. Para facilitar a análise das mesmas, foram também listadas propriedades típica apresentadas pelo aço baixo carbono.

É interessante ser observado, ainda, que as propriedades físicas, ou mecânicas de certos plásticos, como ABS e polipropileno, não alcançam aquelas geralmente aceitas para a expressão "plásticos de engenharia" empregada industrialmente. A mesma refere-se a materiais que podem operar em ambientes cuja temperatura excede 100 °C e resiste à carregamento contínuo de, no mínimo, 13.780 kPa, ou módulo de flexão de 1.722,5 MPa. Entretanto, a estratégica distribuição de reforços permite que os plásticos nominados sejam utilizados com sucesso.

Uma questão extremamente importante deve ainda ser cuidadosamente considerada, antes que seja decidido o emprego desses materiais: os plásticos representam cerca de 5% de todo o lixo sólido produzido no mundo e, com a atual tecnologia, não são biodegradáveis (na sua imensa maioria). Portanto, apresentam grande perigo para o meio ambiente.

PROCESSOS DE SOLDAGEM

Os seguintes processos de união podem ser aplicados aos termoplásticos, destacando-se aqueles por soldagem:

□ Alta Frequência

A maioria das aplicações desse processo, são dirigidas para a selagem de finos filmes termoplásticos com alto fator de perda dielétrico, tais como PVC, ABS e acetato de celulose. Apesar de possuir vantagens, tais como rapidez e reprodutibilidade, o investimento de capital necessário é relativamente alto.

Os filmes são prensados entre eletrodos metá-

Tabela A3.1 - Propriedades Físicas de Alguns Termoplásticos

Material	Densidade	Intervalo de Fusão (°C)	Capacidade Térmica		Condutividade		Coeficiente de Exp. Linear (K ⁻¹ .10 ⁻⁶)
			Específica	[J/(kg.K.10 ³)]	Térmica	[W/(m.K)]	
ABS (1)	0,99-1,10	85	1,4-1,5		0,04-0,30		60-130
Nylon 11	1,04	185	2,42		0,23		150
Perspex	1,10-1,20	70-90	1,45		0,17-0,25		50-90
Polestireno	1,04-1,11	82-102	1,3-145		0,09-0,21		60-80
Polietileno LD (2)	0,01-0,93	80	2,3		0,13		120-140
Polietileno HD (3)	0,04-0,97	90-100	2,1-2,3		0,42-0,45		120
Polipropileno	0,9	100-120	1,9		0,09		120
PTFE (Teflon)	2,14-2,20	260-270	1,05		0,25		100
PVC (4)	1,16-1,35	56-85	0,8-2,5		0,16-0,27		50-60
Aço Baixo Carbono (5)	7,86	1400	0,12		45		11

Notas: (1) "Acrylonitrile Butadiene Styrene"; (2) LD = "Low Density" (baixa densidade); (3) HD = "High Density" (alta densidade); (4) "Polyvinyl Chloride"; (5) Somente para comparação.

Tabela A3.2 - Propriedades Mecânicas Típicas de Alguns Termoplásticos

Material	Módulo de Elasticidade (MN/m ²)	Resistência à Tração (MN/m ²)	Alongamento (%)
ABS (1)	1380-3400	17-58	10-140
Nylon 11	1250-1300	52-54	180-400
Perspex	2700-3500	55-75	2-3
Polestireno	2400-4200	35-62	1-3
Polietileno LD (2)	120-240	7-13	300-700
Polietileno HD (3)	550-1050	20-30	300-800
Polipropileno	900-1400	32-35	20-300
PTFE (Teflon)	350-620	15-35	200-400
PVC (flexível) (4)	3500-4800	10-25	200-450
PVC (rígido)	2000-2800	40	60
Aço Baixo Carbono (5)	210.000	420-510	22-24

Notas: (1) "Acrylonitrile Butadiene Styrene"; (2) LD = "Low Density" (baixa densidade); (3) HD = "High Density" (alta densidade); (4) "Polyvinyl Chloride"; (5) Somente para comparação.

licos, os quais se encontram conectados à uma fonte de potência que gera corrente alternada de alta frequência (cerca de 27 MHz), geralmente um transmissor de rádio isolado para não causar interferência.

❑ Ferramenta ("Ferro") Aquecida

Uma ferramenta (chata, ou tipo "ferro de soldar" empregado na Solda Branda) é aquecida (entre 180 e 230 °C) e posta em contato com as superfícies que se quer soldar, as quais são imediatamente pressionadas (levemente) uma contra a outra. A ferramenta é geralmente revestida com PTFE (Teflon), evitando assim aderência do material base

à mesma. As juntas produzidas podem apresentar alta qualidade, inclusive à prova de vazamentos.

❑ Fricção

Este processo utiliza o calor produzido pelo atrito entre duas superfícies em movimento relativo, similar ao descrito no Capítulo 13 (Volume II). O mesmo é simples e capaz de realizar soldas de alta qualidade. Os principais parâmetros envolvidos são os seguintes: (a) Velocidade rotacional (1 à 20 m/s); (b) Pressão durante a fricção (0,8 à 1,5 bar); (c) Pressão após a fricção, ou de "forjamento" (1 à 3 bar); (d) Tempo de soldagem (2 à 10 s); (e) Comprimento perdido (variável).

□ Gás Aquecido

Existem certas similaridades entre este processo e a soldagem Oxigás. Neste caso, um gás aquecido flui desde o bico de uma "tocha", fundindo parcialmente o material de adição na forma de vareta (mesmo tipo de material daquele que se esta soldando) sobre uma junta com chanfro. Os gases são aquecidos entre 200 e 300 °C, com vazão de 15 à 60 l/min, geralmente sendo empregados ar comprimido; nitrogênio (para os plásticos sensíveis ao oxigênio); hidrogênio; oxigênio e anidrido carbônico. Entre os termoplásticos usualmente soldados por este processo, encontram-se PVC; polietileno; nylons e acrílicos (perspex, plexiglas).

Duas principais técnicas são empregadas para a aplicação desse processo. Aquela denominada "soldagem de baixa velocidade" ocorre com o soldador realizando a alimentação do consumível manualmente (como no Oxigás, segurando com uma mão a vareta e com a outra a tocha) e pressionando a vareta (a qual funde parcialmente na superfície, mas não no seu interior). O ângulo da junta geralmente é de 70°, com a vareta ortogonal à superfície da peça no caso de PVC e à 45° com a solda realizada para os termoplásticos mais dúcteis, tais como polietileno e polipropileno. Em ambos os casos, a soldagem deve ser realizada "puxando" a tocha, com a mesma completando um ciclo de oscilação (circular) entre o material base e o de adição em intervalos de 1 s, numa velocidade de soldagem entre 2,5 e 3,3 mm/s.

Por sua vez, a técnica de "soldagem de alta velocidade" utiliza uma tocha especialmente projetada, a qual possui junto ao bico um pequeno tubo aquecido pelo gás que sai no furo principal, através do qual a vareta é, em geral, manualmente introduzida. Com isto, o material de adição sofre pré-aquecimento e funda mais rapidamente. O ângulo da junta deve ser cerca de 80° e no início da operação o ângulo da tocha em relação à superfície da peça é mantido em 90°. Observe-se que a vareta somente deve ser introduzida no tubo, uma vez tendo sido iniciada a soldagem. Tão logo sejam alcançadas as condições necessárias, é iniciado o deslocamento ("puxando" a tocha) e o ângulo da tocha alterado para cerca de 45°, sendo o mesmo um dos principais fatores na determinação da velocidade de soldagem, a qual em média é de 16 mm/s.

Deve ser considerado que existem importantes diferenças deste processo com relação ao Oxigás. Os termoplásticos não apresentam temperatura de fusão tão bem definida quanto os metais e possuem relativamente pequena condutividade tér-

mica sendo, portanto, difícil aquecê-los uniformemente. Desta forma, o soldador pode não notar quando a vareta alcançou a temperatura desejada e devem ser realizadas experiências prévias cuidadosas antes da realização da soldagem final.

□ Implante

Um inserto de metal (implante) é posicionado entre as partes que serão soldadas. A temperatura do implante é elevada (por indução ou resistência elétrica), as superfícies em contato com o mesmo fundem e formam a junta. No aquecimento por indução, altas frequências (2 à 30 MHz) são utilizadas para induzir corrente parasitas. No lugar da fita de metal emprega-se, também, diminutas (<1 µm) partículas ferromagnéticas distribuídas numa matriz de termoplástico, com o conjunto posicionado ao longo da junta como pasta ou teipe. No aquecimento resistivo, correntes tão altas quanto 150 A podem ser aplicadas. As soldas são satisfatoriamente realizadas sobre grandes componentes, demorando menos do que 20 s para serem concluídas. Note-se que o implante permanece na junta soldada, o que reduz suas propriedades mecânicas.

□ Ultra-Som

Este processo foi sintetizado no Capítulo 1, com a **Fig. 1.6** (página 11) ilustrando seus princípios de operação.

As peças que serão soldadas são submetidas à vibração ultra-sônica alternada de alta frequência (20 à 40 kHz), aplicada ortogonalmente às superfícies em contato, resultando num componente longitudinal, o qual produz aquecimento localizado.

Um dos critérios adotados para a análise da soldabilidade do material, é sua habilidade em transmitir vibrações de alta frequência. Um material flexível provoca maiores perdas na transmissão do que um rígido e, conseqüentemente, é mais difícil de ser soldado.

A operação de soldagem geralmente ocorre num curto intervalo de tempo (0,5 à 1,5 s), mas o ferramental é tipicamente caro para grandes taxas de produção e a potência gerada não é suficientemente grande para unir superfícies relativamente grandes, sendo necessário o emprego de cabeçotes múltiplos.

□ Vibração

Oscilando-se linearmente uma superfície em relação a outra, é gerada suficiente energia para aquecer as partes e realizar a solda, tal como no processo por fricção. A frequência empregada tan-

to pode ser baixa (100 Hz), em amplitudes de 2 à 4 mm, quanto alta (240 Hz) e amplitudes de 0,7 à 1,8 mm. Quando os materiais das superfícies a serem soldadas fundem, os mesmos são alinhados e resfriam sob pressão de 1 à 3 bar, com toda a operação sendo completada entre 1 e 5 s.

As principais características deste processo são as seguintes: (a) É conveniente para grandes e complexas juntas lineares; (b) É recomendável para altas taxas de produção; (c) Exige ferramental relativamente simples; (d) A maioria dos termoplásticos podem utilizá-lo.

UNIÃO DOS CERÂMICOS

INTRODUÇÃO

Os materiais cerâmicos apresentam grande interesse, desde na produção de ferramentas de corte e pás de turbinas, até como componentes nas indústrias automotiva e aeroespacial.

Quando comparados com os metais, os cerâmicos apresentam as seguintes principais características gerais: (a) Maior dureza; (b) Maior resistência mecânica (retendo-a em altas temperaturas); (c) Maior estabilidade dimensional; (d) Maior módulo de elasticidade; (e) Melhor resistência à corrosão; (f) Boa para excelente resistência ao desgaste; (g) Menor coeficiente de expansão térmica; (h) Menor densidade.

Os principais "cerâmicos de engenharia" são baseados na combinação simples de elementos tais como boro (B); carbono (C); nitrogênio (N); oxigênio (O); alumínio (Al); silício (Si) e zircônio (Zr). Estes não são materiais ditos "estratégicos" pois, praticamente, nenhum país pode controlar o suprimentos destas matérias primas. Apesar das várias opções existentes, atualmente os mais importantes materiais deste grupo são o nitreto de silício (Si_3N_4); o carbetto de silício (SiC) e a zircônia (ZrO_2).

O nitreto de silício é disponível em várias formas, ou seja, sinterizado; aglomerado por reação; prensado a quente e prensado a quente isostaticamente (PQI). Estas duas últimas formas são as mais usuais; ambas resultam quase completamente densas e, conseqüentemente, apresentam as melhores combinações de propriedades físicas e mecânicas. A maior densidade é obtida através de pequenas adições de compostos sinterizantes, tais como Al_2O_3 ; MgO ; Y_2O_3 e Nd_2O_3 . Aquecidos, estes óxidos formam um líquido nos contornos dos grãos de nitreto de silício. As propriedades mecânicas deste cerâmico em alta temperatura, são função do fato deste líquido na solidificação resultar, ou numa fase intergranular amorfa (a qual perde a resistência em torno de 1000 °C), ou cristalina (a qual resiste até cerca de 1400 °C). Isto depende essen-

cialmente dos aditivos empregados.

Outro tipo de nitreto de silício geralmente utilizado, contém nitreto de titânio, o que torna o cerâmico condutor de eletricidade. Dessa forma, o material é usinável por eletroerosão, sendo esta uma vantagem competitiva do mesmo.

Por sua vez, o carbetto de silício, quando comparado com o nitreto de silício, apresenta: (a) Maior resistência à fluência; (b) Maior resistência à oxidação; (c) Menor tenacidade; (d) Menor resistência à choques térmicos. Para alcançar completa densidade, adiciona-se ao SiC elementos tais como B, C, ou Al, os quais auxiliam a sinterização. Os mesmos são absorvidos pela matriz e a sinterização ocorre na fase sólida. O SiC também pode ser obtido através de aglomeração por reação, com SiC em pó, C e Si reagindo durante o tratamento térmico, resultando SiC maciço, o qual é completamente denso, mas possui cerca de 15% de Si livre. Este cerâmico apresenta grande queda de resistência mecânica em torno de 1400 °C, devido à fusão do Si livre.

A zircônia se apresenta, no mínimo, nas fases polimórficas monoclinico, tetragonal e cúbico (é possível que exista uma fase adicional sob extremas pressões e temperaturas). A característica da ZrO_2 em aumentar entre 4 e 5% de volume, quando ocorre a transformação da fase tetragonal para monoclinico, tornou importante o emprego deste material em aplicações que requerem alta resistência e tenacidade em temperaturas relativamente baixas (maiores do que os outros cerâmicos em até cerca de 300 °C).

PROCESSOS DE UNIÃO

Dois métodos extensivamente empregados são aqueles por fricção e por ultra-som, descritos em outras partes deste livro.

A união também pode ser realizada por ligação química, nas fases sólida (difusão, ou reação química através da interface), ou líquida. Neste caso, a interface formada deve acomodar altera-

ções tais como desencontro da rede cristalina entre um cerâmico e um metal; ligações de diferentes tipos, ou seja, iônica/covalente no cerâmico e metálica; grande diferença entre os coeficientes de expansão térmica dos materiais envolvidos (o que pode resultar em trincas nos cerâmico).

A direta união entre materiais dissimilares somente pode ser realizada, quando os coeficientes de expansão térmica dos mesmos forem similares. Caso contrário, deve-se utilizar diversas camadas ("sanduíche") intermediárias finas, com gradual alteração desta propriedade física em ambos os sentidos.

Existem situações em que metais podem ser ligados diretamente a cerâmicos. Um exemplo é o do cobre com alumina (Al_2O_3), no qual estas matérias são aquecidas entre 1060 e 1080 °C mantendo contato, numa atmosfera levemente oxidante. O eutético Cu-CuO formado na superfície do cobre reage com a alumina e a união é concretizada.

A Brasagem é outro processo de união muito empregado, sendo que detalhes dos métodos dis-

poníveis podem ser encontrados no **Capítulo 17**. Nesse caso, um problema que pode ocorrer é dos cerâmicos não serem, em geral, molhados pelas ligas metálicas fundidas. Uma solução é metalizar a superfície do material através de pulverização térmica (**Capítulo 18**), sendo as ligas de molibdênio e manganês geralmente utilizadas para esta finalidade. Alternativamente, o metal de adição pode ser "ativado" e, assim, molhar tanto a superfície do metal base, quanto do cerâmico. Típicas ligas para esta situação são baseadas em cobre, ouro e prata, com pequenas adições de titânio, ou zircônio. Por exemplo, a adição de 1,25% de Ti ao eutético Ag-Cu promove satisfatoriamente o molhamento nos cerâmicos, sendo esta união apropriada para uso em relativamente baixas temperaturas (até cerca de 500 °C). O que ocorre, é a redução da temperatura do eutético, com o Ti difundindo e reagindo com o cerâmico, resultando nitreto de titânio e silicetos. Numa região mais afastada da interface, continua existindo a liga Au-Cu. Para maiores temperaturas, as ligas Ni/Cr e Ti devem satisfazer a maioria das situações.

REFERÊNCIAS

E

BIBLIOGRAFIA

1. Acosta, V.H.V. e Machado, I.G. Estudo Preliminar sobre a Utilização de Fontes Pulsadas Utilizando Arames Tubulares. Anais do XXIº Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem (ENTS), da Associação Brasileira de Soldagem (ABS), Vol.2 pp. 835-849. Caxias do Sul (RS), Jun/1995.
2. Advanced Joining Technologies. Ed. T. H. North. Chapman and Hall, 1990.
3. Air Contaminants - Permissible Exposure Limits (Title 29 Code of Federal Regulations Part 1910.1000). US Department of Health and Human Services, Occupational Safety and Health Administration, OSHA Publication 3112, Washington, 1989.
4. Aldenhoff, B.J. et al. Constante potential power sources for multiple operation gas metal arc welding. *Welding Journal* **53**(7): 425-429, Jul. 1974.
5. Allum, C.J. MIG Welding - Time for a Reassessment. *Metal Construction* **15**(6): 347-353, Jun 1983.
6. Allum, C.J. and Quintino, L.. Control of Fusion Characteristics in Pulsed Current MIG Welding - Part 1. *Metal Construction* **17**(4): 242R-245R, Apr 1985.
7. Allum, C.J. and Quintino, L.. Control of Fusion Characteristics in Pulsed Current MIG Welding - Part 2. *Metal Construction* **17**(5): 314-317R, May 1985.
8. Allum, C.J. Metal transfer in arc welding as a varicose instability: Part 1 - Varicose instability in a current-carrying liquid cylinder with surface charge. *Journal of Physics D: Applied Physics* **18**: 1431-1446, 1985.
9. Allum, C.J. Idem: Part 2 - Development of model for arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics* **18**: 1447-1468, 1985.
10. American Society for Mechanical Engineers. ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section IX, Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators. New York, N.Y.
11. Amin, M.. Synergic Pulse MIG Welding. *Metal Construction* **13**(6): 349-353, Jun 1981.
12. Amin, M.. Pulse Current Parameters for Arc Stability and Controlled Metal Transfer in Arc Welding. *Metal Construction* **15**(5): 272-278, May 1983.
13. Amin, M.. Microcomputer control of Synergic Pulsed MIG Welding. *Metal Construction* **15**(6): 216-221, Apr 1986.
14. Ando, K. e Nishikawa, J. Studies on anode and cathode energy of TIG arc. Doc. IIW 212-158-68.
15. Anônimo. Classification of Metal Transfer. Doc. IIW XII-636-76.
16. Anônimo. Basic Welding Data nº 10: Safety in Welding and Cutting. *Welding & Metal Fabrication* **57**(9): 462-464, Nov 1989.
17. ANSI/AWS F1.4-87. Methods for analysis of airborne particulates generated by welding and allied processes. American Welding Society, Miami, FL, 1987.
18. ANSI/AWS Z49.1-88. Safety in Welding and Cutting. American Welding Society, Miami, FL, 1988.
19. ANSI/AWS A5.8-89. Specification for Filler Metals for Brazing. American Welding Society, Miami, FL, 1989.
20. Arata, Y. Plasma, Electron and Laser Beam Technology. ASM International, Materials Park, 1986.
21. Atomic Energy Levels Data Center. NBS, Washington, EUA.
22. A.V. Feigenbaum. Total Quality Control. McGraw-Hill Book Company, 1961.
23. AWS A2.4. Brazing Manual. American Welding Society, Inc., Miami, FL, 1975.
24. Brazing Manual. American Welding Society, Inc., Miami, FL, 1976.
25. Bittencourt, E. e Machado, I.G. Introdução ao Estudo de Fluxos para Arco Submerso e Influência da Composição Química sobre Algumas Propriedades do Metal de Solda. Anais do XIIº ENTS da ABS, pp.93-114. Campos do Jordão (SP), Out/1986.
26. Bredzs, N. e Tennenhouse, C.C. Metal-metal oxide-hydrogen atmosphere chart for brazing or bright metal processing. *Welding Journal* **49**(5): 189s-193s, May 1970.
27. Brooker, H.R. e Beatson, E.V. Industrial Brazing. Newnes-Butterworths, 1975.
28. Brosilow, R. The new GMAW power supplies. *Welding Design and Fabrication*. **55**(6): 22-28, Jun. 1987.
29. Cambel, A.B. Plasma physics and magneto-fluidmechanics. Ed. McGraw-Hill, 1963.
30. Canto, M.A.A. e Machado, I.G. Influência de Alguns Gases de Proteção utilizados no Processo MIG/MAG sobre a Tenacidade do Metal de Solda. Anais do XVIº ENTS da ABS, pp. 201-220. Caxambú (MG), Dez/1990.
31. Cary, H.B. Modern Welding Technology. Prentice Hall, New Jersey, 1989.
32. Cassina, J.C. e Machado, I.G. Low-Stress Abrasion Resistance of Cobalt-Based Surfacing Deposits Welded with Different Processes. *Welding Journal* **71**(4): 133s-137s, Apr 1992.
33. Cassina, J.C., Gonzalez, A.R. e Machado, I.G. TIG Convencional e Pulsado: Efeitos da Corrente e Velocidade da Soldagem sobre a Geometria do Cordão de Solda em Aço AISI 304. Anais do XXº ENTS da ABS, pp. 531-545. Contagem (MG), Ago/1994.

34. Castner, H.R. Gas Metal Arc Welding Fume Generation Using Pulsed Current. *Welding Journal* 74(2): 59s-68s, Jan 1995.
35. Chapman, B. *Glow Discharge Processes*. John Wiley and Sons, N.Y., 1980.
36. Chew, B. Moisture loss and gain by some basic flux covered electrodes. *Welding Journal* 55(5): 127s-134s, May 1976.
37. Cobine, J.D. *Gaseous Conductors*. Dover Publications, Inc. New York, 1958.
38. Cornu, J. *Advanced Welding Systems. Vol.1-Fundamentals of Fusion Welding Technology*. IFS (Publications) Ltd. e Springer-Verlag, 1988.
39. Cornu, J. *Advanced Welding Systems. Vol.2-Consumable Electrode Processes*. IFS (publications) Ltd. e Springer-Verlag, 1988.
40. Cornu, J. *Advanced Welding Systems. Vol.3-TIG and Related Processes*. IFS (Publications) Ltd. e Springer-Verlag, Bedford, U.K., 1988.
41. Correy, T.B. et al. Arc starting in gas tungsten arc welding, radio frequency free. *Welding Journal* 65(2): 33-41, Feb 1986.
42. Cryogenic Data Center. NBS, IBS, Colorado, EUA.
43. Davies, A.C. *The Science and Practice of Welding*. Cambridge University Press, 1979.
44. De Almeida, D.S. e Machado, I.G. Soldagem Subaquática Molhada com o Processo MIG. *Anais do XXIº ENTS da ABS, Vo.1 pp. 373-387*. Caxias do Sul (RS), Jun/1995.
45. De Castro, F.A.R. e Machado, I.G. Soldagem em Chanfro Estreito ("Narrow Gap") por Arco Submerso. *Anais do XVº ENTS da ABS, pp. 603-617*. São Paulo (SP), Nov/1989.
46. DeLong, W.T. OSHA regulatory proposals and philosophies pertaining to welding fumes. *Welding Journal* 57(7): 15-23, Jul 1978.
47. De Macedo, M.L.K. e Machado, I.G. Desenvolvimento de Eletrodo Revestido para Depositar Metal de Solda ao Cromo-Molibdênio com Alta Tenacidade na Condição Como Soldado. *Anais do 8º Simpósio Brasileiro sobre Tubulações e Vasos de Pressão e 2º Simpósio Latino Americano sobre Tubulações e Vasos de Pressão, pp. 643-652*. Gramado (RS), Set/1994.
48. Dillenbeck, V.R. e Castagno, L. The effects of various shielding gases and associated mixtures in GMA welding of mild steel. *Welding Journal* 66(9): 45-49, Sep 1987.
49. Donnelly, R.G. e Slaughter, G.M. Brazing of graphite. *Welding Journal* 41(5): 461-469, May 1962.
50. *Electric arc welding power sources, EW1-1988*. National Electrical Manufacturers Association, Washington, 1988.
51. *Electric Slag Welding*. Ed. B. Paton, Foreign Languages Publishing House, Moscou.
52. Elisstratov, A.P. et al. Transfer of electrode metal during welding in shielding mixtures. *Avt Svarka, 12: 61-62*, 1975
53. Esibyan, E.M. *Plasma-Arc Equipment*. MIR Publishers, Moscou, 1973.
54. Feigenbaum, A.V. *Total Quality Control*. McGraw-Hill Book Company, 1961.
55. Fernie, J.A. Joining ceramic materials. *Welding & Metal Fabrication* 58(6): 320-325, Jul 1990.
56. Fernie, J.A. et al. Progress in joining advanced materials. *Welding & Metal Fabrication* 59(4): 179-184, May 1991.
57. Fisher, O.J. Welding health standards and regulations. *Welding Journal* 63(9): 21-24, Sep 1984.
58. Frederick, J.E. et al. Solid state remote controlled welding. *Welding Journal*, 57(8): 32-39, Aug 1978.
59. *Fumes and Gases in the Welding Environment*. American Welding Society, Miami, FL, 1979.
60. Gasawara, T.O. et al. A power source for gas shielded arc welding with new current waveforms. *Welding Journal* 66(3): 57-63, Mar 1987.
61. Glickstein, S.S. *Basic Studies of the Arc Welding Process. Trends in Welding Research in The United States*. ASM, Louisiana, Nov 1981.
62. Gonzalez, A.R., Cassina, J.C. e Machado, I.G. Técnicas Fatoriais na Avaliação da Influência dos Parâmetros do Pulso sobre a Geometria do Cordão em Soldagem por Processo TIG com Corrente Pulsada. *Anais do XXIº ENTS da ABS, Vo.2 pp. 851-866*. Caxias do Sul (RS), Jun/1995.
63. Gray, C. N. et al. The prediction of fume compositions in stainless steel metal inert gas welding. *Weld Pool Chemistry and Metallurgy*. Londres, Abr 1980.
64. Greene, W. J. An analysis of transfer in Gas-Shielded Welding Arcs. *AIEE Trans. Part II: Applications and Industry*. 79: 194-203, 1960.
65. Guile, A.E. Arc-Electrode phenomena. *Proc. IEE. IEE Reviews*, 118(9R): 1131, 1971.
66. Guile, A.E. Processes at arc cathode roots on nonrefractory metals having films of their own oxide. *Int. Conf. Proc. on Arc Physics and Weld Pool Behaviour*. The Welding Institute, Londres, May 1979.
67. Gumbleton, H. Hot gas welding of thermoplastics - an introduction. *Joining & Materials* 2(5): 215-218. May 1989.

68. Hamilton, D.J. and Guile, A. E. Ionization in the cathode fall region of moving arcs. *J. Phys. D.* 1: 335, 1968.
69. Halmoy, E.. Wire Melting Rate, Droplet Temperature, and Effective Anode Melting Potential. In *Proc. Conf. on Arc Physics and Weld Pool Behaviour*. The Welding Institute, London, May 1979.
70. Heile, R.F. and Hill, D.C. Particulate fume generation in arc welding processes. *Welding Journal* 54(7): 201s-10s, Jul 1975.
71. Hewett, P. The Particle Size Distribution, Density, and Specific Surface Area of Welding Fumes from SMAW and GMAW Mild and Stainless Steel Consumables. IIW Doc. VIII-I 688-93.
72. Hilton, D.E. e Norrish, J. Shielding gases for arc welding. *Welding and Metal Fabrication* 56(3): 189-196, May-Jun 1988.
73. Hilton, D.E. and Plumridge, P.N. Particulate fume generation during GMAW and GTAW. *Welding & Metal Fabrication* 59(10): 555-560, Dec 1991.
74. Houldcroft, P.T. *Welding Process Technology*. Cambridge University Press, 1979.
75. Hoult, A.P. Cutting and Welding With High Power Solid State Lasers. *Proc. of Int. Conf. on Advances in Joining and Cutting Processes*, Harrogate, UK, Oct/Nov, 1989.
76. International Institute of Welding Doc. XII-535-77. Classification des Divers Modes de Transfer du Metal en Soudage a L'Arc.
77. Irving, B. Demand for Plastic Parts Builds in the Welding Industry. *Welding Journal* 72(2): 31-36, Feb 1993.
78. Ishizaki, K. Solidification of the molten pool and bead formation. *Int. Conf. Proc. on Arc Physics and Weld Pool Behaviour*. The Welding Institute, Londres, 1979.
79. ISO 2401. Covered electrodes-Determination of the efficiency, metal recovery and deposition coefficient.
80. Jackson, C.E. The Science of Arc Welding - Part I. *Welding Journal* 39(4): 129s-140s, Apr 1960.
81. Ibidem, Part II. 39(5): 177s-190s, May 1960.
82. Ibidem, Part III. 39(6): 225s-230s, Jun 1960.
83. Jackson, C.E. Fluxes and Slags in Welding. *Welding Research Council Bulletin* 190, N.Y. 1973.
84. Kim, Y-S. and Eagar, T.W. Analysis os Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal* 72(6): 269s-278s, Jun 1993.
85. Kimura, S. et al. Narrow-gap gas metal arc welding process in flat position. *Welding Journal* 58(7): 44-52, Jul 1979.
86. Kimura, S. et al. Investigations on chromium in stainless steel welding fumes. *Welding Journal* 58(7): 195s-204s, Jul 1979.
87. Lancaster, J.F. Metal transfer in fusion welding. *Int. Conf. Proc. Arc Physics and Weld Pool Behaviour*. The Welding Institute, May 1979.
88. Lashko, N. e Lashko, S. *Brazing and Soldering of Metals*. MIR Publishers, Moscou, 1979.
89. Lesnewich, A., Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc Welding. Part I: Control of Electrode Melting Rate. *Welding Journal*, 37(8): 343s-353s, Aug 1958.
90. Lesnewich, A., Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc Welding. Part II: Control of Metal Transfer. *Welding Journal* 37(9): 418s-425s. Sep 1958.
91. Lesnewich, A. MIG welding with pulsed power. *Welding Research Council Bulletin* 170, N.Y., Feb 1972.
92. Liu, S. and Siewert, T.A. Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding: Droplet Rate. *Welding Journal* 68(2): 52s-582, Feb 1989.
93. Machado, I.G. *Sistemas de Especificação dos Consumíveis para Soldagem e Brasagem*. Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem (FBTS), Rio de Janeiro, 1993.
94. Machado, I.G. A Economia da Soldagem. *Anais do XXI^o ENTS da ABS*, Vol.2 pp. 999-1013. Caxias do Sul (RS), Jun/1995.
95. Malin, V.Y. The state-of-the-art of narrow gap welding. Part I. *Welding Journal* 62(4): 22-30, Apr 1983.
96. Malin, V.Y. ibidem. Part II, 62(6): 37-46 Jun 1983.
97. Malinowski-Brodnicka, M. et al. Effect of electromagnetic stirring on GTA welds in austenitic stainless steel. *Welding Journal* 69(2): 525-531, Feb 1990.
98. Manz, A.F. Inductance vs. slope for control for gas metal arc power. *Welding Journal* 48(9): 707-712, Sep 1969.
99. Manz, A.F. *Welding Power Handbook*. American Welding Society, 1973.
100. Maruyama, T., Sato, M. e Hida, Y. Waveform control in gas shielded arc welding. *Welding International* 4(9): 677-683, 1990.
101. Matsuda, F., Ushio, M. and Tanaka, Y.. Metal Transfer Characteristics in Pulsed GMA Welding. *Transactions of Japan Welding Research Institute* 12(1): 9-17, 1983.

102. Metals Handbook, 9ª Ed., Vol.6 - Welding and Brazing. American Society for Metals, Metals Park, 1983.
103. Metcalfe, J.C. and Quigley, M.B. Heat Transfer in Plasma-Arc Welding. *Welding Journal* 54(3): 99s-103s, Mar 1975.
104. Metcalfe, J.C. e Quigley, M.C.B. Arc and pool instability in GTA welding. *Welding Journal* 56(5): 133s-139s, May 1977.
105. Metzbowler, E.A. et al. Laser Beam Welding of HSLA Steels. Proc. of Conf. Weldability of Materials. ASM International, Detroit, Oct.1990.
106. Mondain-Monval. The Physical properties of fluids at elevated temperatures. IIW Doc. 212-264-73.
107. Nadkarni, S.V. Modern Arc Welding Technology. Oxford & IBH Publishing Co. PVT. LTD., 1988.
108. Naylor, K. A. and Guile, A. E. The effective drag width of short moving arcs in argon. *J. Appl. Phys.*, 18:1295, 1967.
109. Needham, J.C. Review of new designs of power sources for arc welding processes. IIW Doc. XII-F-217-80.
110. New Lessons in Arc Welding. The Lincoln Electric Company, 1975.
111. Nishiguchi, K. e Matsunawa, A. Gas-metal-arc welding in high pressure atmospheres. IIW Doc. 212-371-76.
112. Nomura, H. et al. Magnetic force in multi-electrode submerged-arc welding. Int. Conf Proc. on Arc Physics and Weld Pool Behaviour. The Welding Institute, Londres, May 1979.
113. Nunes, A.C. Arc Welding Origins. *Welding Journal* 55(7): 566-572, Jul 1976.
114. Omar, A.A. e Lundin, C.D. Pulsed Plasma-Pulsed GTA Arc: A Study of the Process Variables. *Welding Journal* 58(4): 97s-105s, Apr 1979.
115. Patente da Arcos (British Patent No 828 933, July 12th 1956)
116. Pattee, H.E. Joining ceramics to metals and other materials. *Welding Research Council Bulletin* 178. WRC, New York, 1972.
117. Pokhodnya, I.K. et al. Conf. Proc. Arc Physics and Weld Pool Behaviour. The Welding Institute, May 1979.
118. Postinger, C.N. e Machado. I.G. Influência da Geometria do Bocal sobre o Fluxo do Gás de Proteção na Soldagem MIG/MAG. Anais do XXI^o ENTS da ABS, Vol.2 pp. 543-548. Caxias do Sul (RS), Jun/1995.
119. Quality Control Handbook. Ed. J. M. Juran. McGraw-Hill Book Company, 1974 (1ª Ed. 1951).
120. Reding, L. Controlling Welding Fume: A Design Approach. *Welding Journal* 71(9): 61-63, Sep 1992.
121. Rekus, J.F. Structural steel hot work: A serious lead hazard in construction. *Welding Journal* 67(9): 25-32, Sep 1988.
122. Saede, H.R. and Unkel, W. Arc and weld pool behavior for pulsed current GTAW. *Welding Journal* 67(11): 247s-253s, Nov 1988.
123. Salter, G. et al. Welding and cutting safely. *Joining & Materials* 2(3): 112-24, Mar 1988.
124. Savage, W.F. et al. A Study o Weld Interface Phenomena in a Low Alloy Steel. *Welding Journal* 55(9): 260s-268s, Sep 1976.
125. Schiedermayer, M. The inverter power source. *Welding Design and Fabrication*, 30-33, Jun 1987.
126. Schiller, S., Heisig, U. e Panzer, S. Electron Beam Technology. John Wiley & Sons, 1981.
127. Schwartz, M.M. Laser welding and cutting. *Welding Research Council Bulletin* 167, WRC, New York, 1971.
128. Schwartz, M.M. Modern Metal Joining Techniques. Wiley-Interscience, 1969.
129. Simpson, P.J. et al. Reducing ozone and ultraviolet emissions from GTA welding. *Welding & Metal Fabrication* 61(3): 141-44, Apr 1993.
130. Somerville, J.M. The Electric Arc. Methuen, 1959.
131. Smith, A.A. CO₂ welding of steels. The Welding Institute, Cambridge, UK.
132. Sparagen, W. e Lengyel, B.A. Physics of the Arc and the transfer of metal in arc welding. *Welding Journal* 22(1): 2s-42s, Jan 1943.
133. Stout, R.D. e Doty, W.D. Weldability of Steels. Welding Research Council, N.Y. 1971.
134. Taylor, N.S. e Watson, M.N. Welding techniques for plastics and composites. *Joining & Materials* 1(2): 70-76, Aug 1988.
135. The Procedure Handbook of Arc Welding. The Lincoln Electric Company, Ohio, 1973.
136. Thermal Spraying-Practice, Theory, and Application. American Welding Society, 1985.
137. Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices. The American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati, OH.
138. Tuliani, S.S. et al. Notch Toughness of Commercial Submerged-Arc Welding. *Welding and Metal Fabrication* 37(8):327-339, 1969.
139. Ushio, M. and Matsuda, F. Study on gas tungsten arc electrodes: comparative study on characteristics of tungsten-oxide cathode. IIW Doc. 212-648-86.

140. Vieira, M. do C.B. e Machado, I.G. Eletrodos Revestidos: Grau de Higroscopia do Revestimento e Hidrogênio no Metal de Solda. Anais do XIV^o ENTS da ABS, pp. 745-754. Gramado (RS), Nov/1988.
141. Vill, V. I. Friction Welding of Metals. Traduzido do Russo para a AWS pela Rheinhold Pub. Corp., N.Y., 1962.
142. Vinzents, P. et al. Cancer risk and thoriated welding electrodes. Occupational Hygiene 1(1): 27-33, 1994.
143. Voigt, R.C. e Loper, C.R. Jr. Tungsten contamination during gas tungsten arc welding. Welding Journal 59(4): 99s-103s, Apr 1980.
144. Welding Handbook, 4^a Ed., American Welding Society, Miami, FL.
145. Welding Handbook, 8^a Ed., Vol.2 - Welding Processes. American Welding Society, Miami, 1991.
146. Welding Kaiser Aluminum. Kaiser Aluminum & Chemical Sales, Inc., 1978.
147. White, P. Vibration welding of thermoplastics. Joining & Materials 1(6): 277-279, Dec 1988.
148. West, E.G. Metals and/or plastics?. Metal Construction 19(9): 539-544, Sep 1987.
149. Woodruff, D.P. The solid-liquid interface. Cambridge University Press, 1973.
150. Yamamoto, H. Advancements in State-of-the Art Arc Welding Power Supplies through Inverterization (Interim Report). IIW Doc. XII-1345-93.
151. Yamamoto, H. Recent Advances in Inverter Controlled, Gas Shielded Arc Welding Power Supplies and their Applications in Japan. IIW Doc. XII-1148-89.
152. Yamamoto, H et al. Beneficial effects of low-frequency pulsed MIG welding on grain refinement of weld metal and improvement of solidification cracking susceptibility of aluminium alloys. Welding International 7(6): 456-461, 1993.
153. Yamamoto, H. et al. Study of low-frequency pulsed MIG welding. Welding International 7(1): 21-26, 1993.
154. Yamamoto, H., Nishida, Y. e Ueguri, S. Trends and Problems of Arc Welding Power Sources in Japan. IIW Doc. XII-960-86.
155. Zens, D.E. Protection in welding environment: Choosing and using the right respirator. Welding Journal 65(9): 52-56, Sep 1986.
156. Zorber, A. Study of the kinetics of chromium and nickel in biological materials during a week of arc welding (MMA, MIG, TIG) using filler metals containing chromium and nickel. Welding in the World 25(11/12): 246, Dec 1987.

CÓPIA AUTORIZADA PELA
DISTRIBUIÇÃO GRATUITA
PROIBIDA A COMERCIALIZAÇÃO EM QUALQUER FORMA

QUESTÕES

CÓPIA AUTORIZADA PELO AUTOR
DISTRIBUIÇÃO GRATUITA
PROIBIDA A COMERCIALIZAÇÃO EM QUALQUER FORMATO

CAPÍTULO 01: INTRODUÇÃO À UNIÃO DOS MATERIAIS

1. Caracterize os três principais grupos de processos que tratam da união dos materiais.
2. Quais são os dois principais problemas que impedem a união dos materiais ser realizada “espontaneamente” na atmosfera terrestre?
3. Cite quatro métodos para dissipar filmes não-metálicos, os quais se formam nas superfícies das peças que se pretende unir.
4. Duas soldas foram realizadas com o mesmo processo ao arco elétrico e idêntico consumível, sobre duas juntas similares. Entretanto, a soldagem da junta “J1” foi praticada com o dobro da velocidade e corrente três vezes maior do que a da junta “J2” (e tensão quase idêntica). Demonstre qual das juntas foi soldada com maior energia de soldagem.
5. Descreva três processos nos quais a soldagem é realizada: (a) Em fase sólida; (b) Por energia termoquímica; (c) Por resistência elétrica; (d) Por energia radiante; (e) Por arco elétrico.
6. Descreva quatro processos de corte térmico para os metais e suas ligas.
7. O que é pulverização térmica?
8. Desenhe os cinco tipos básicos de juntas empregadas na união dos materiais.
9. Numa junta soldada, esclareça o que são “passes” (ou “cordões”) e “camadas”, indicando os passes de raiz; enchimento e cobertura.
10. Mostre três tipos de “chanfros” numa junta a topo, indicando a “abertura de raiz”; a “altura do nariz”; o “ângulo do chanfro”; o “ângulo do bisel” e a “face do bisel” e cite os principais fatores envolvidos na seleção do tipo de junta.
11. Sobre juntas a topo e em ângulo soldadas com penetração parcial, indique a “garganta”; a “perna” e o “tamanho” da solda.
12. Uma junta soldada composta por dois metais base diferentes é simétrica, com diluição de 30%. O metal base “A” possui 15% Ni e 20% Cr, enquanto o “B” 20% Ni e 20% Cr. O arame utilizado no processo MIG contém 30% Ni e 15% Cr. Sabendo que o rendimento (do metal transferido desde o consumível) para o Cr é 70% e o do Ni é 100%, estime a proporção final destes dois elementos no metal de solda.
13. Empregando um processo em que ocorre fusão tanto do metal base, quanto do metal de adição, indique quais são as zonas em que se divide a junta soldada.
14. Descreva as posições de soldagem padronizadas pela AWS e ASME.
15. O que é: (a) Pré-aquecimento; (b) Temperatura de inter-passe; (c) Pós-aquecimento.

CAPÍTULO 02: INTRODUÇÃO À FÍSICA DA SOLDAGEM

16. Caracterize o arco elétrico na soldagem, inclusive descrevendo as regiões do mesmo e explicando quais são as causas das quedas de potencial anódica e catódica.
17. O eletrodo, como cátodo, pode ser termoiônico ou não. Explique.
18. Como se mantém o arco elétrico nos processos que utilizam um eletrodo termoiônico? Exemplifique.
19. Porque não é usual, à luz da física do arco, se utilizar CCEN em MIG sobre aços?
20. O que é “jato de plasma” e qual sua relação com a rigidez do arco?
21. Descreva as causas da deflexão (“sopro”) magnética e sugira dois meios para evitá-la.
22. Qual o parâmetro na soldagem, que é diretamente proporcional ao comprimento do arco elétrico?
23. Descreva como varia a temperatura do arco elétrico, em função da posição no mesmo (considerando CCEN).
24. Qual o efeito da pressão ambiente sobre o arco elétrico na soldagem?
25. Porque o arco elétrico produzido com hélio é “mais quente” do que quando se emprega argônio?
26. Porque os gases moleculares são energeticamente mais rentáveis?
27. O fluxo do gás de proteção (em processos de soldagem tais como TIG ou MIG/MAG) pode ser turbulento, ou laminar. Quais são os principais fatores que determinam o tipo do seu deslocamento? O que é o “Número de Reynolds” e qual sua relação com o deslocamento turbulento?
28. Quais são os principais métodos para se iniciar o arco elétrico na soldagem?
29. O que é re-ignição do arco, como a mesma pode influenciar a soldagem e como é possível reduzir seu efeito nocivo num processo em que o eletrodo não é consumível?
30. Descreva o fenômeno de “molhamento”, empregando o modelo de uma gota sésil sobre uma superfície sólida, considerando as tensões superficiais e ângulos de intersecção entre as fases envolvidas.
31. Descreva as duas principais teorias e as quatro hipóteses mais aceitas atualmente, as quais tratam da transferência do

metal desde o eletrodo para a peça, na soldagem ao arco elétrico.

32. Na soldagem ao arco elétrico, descreva: (a) Quatro modos possíveis de transferência do metal desde o eletrodo para a peça e em que processos os mesmos podem ocorrer; (b) As principais condições (de soldagem) que atuam sobre estes modos de transferência.

33. Na soldagem ao arco elétrico, deduza a equação que fornece a massa total (metal base mais metal de adição) fundida por unidade de tempo e de corrente.

CAPÍTULO 03: FONTES DE POTÊNCIA PARA A SOLDAGEM AO ARCO ELÉTRICO

34. Descreva, com o auxílio de gráficos, fontes de potência com curvas características tipo “tombante” (corrente constante) e “plana” (tensão constante). Caracterize suas diferenças e aplicações (processos, etc.).

35. Sobre uma curva característica da fonte de potência do tipo “tombante”, indique: (a) “Ponto de operação”; (b) “Tensão de circuito aberto”; (c) “Corrente de curto-circuito”.

36. Como pode ser alterada a declividade da curva característica de uma fonte de potência do tipo tombante e qual o interesse que isto apresenta para a soldagem manual (principalmente com eletrodo revestido)?

37. A curva característica de uma fonte para soldagem é determinada pela equação $U = -0,14 \cdot I + 80$, onde $U(V)$ = tensão e $I(A)$ = corrente. Indique dois processos em que a mesma pode ser empregada e diga porque (intervalo de 0 à 500 A).

38. Descreva detalhadamente o fenômeno de “auto-ajustagem” do arco elétrico na soldagem e explique o que é um sistema “tensão-sensitivo”.

39. Quais são as principais características da soldagem por corrente pulsada. Mencione as suas vantagens, quando comparada com o procedimento “convencional”.

40. Explique como é compensada a flutuação do comprimento do arco na soldagem com corrente pulsada e eletrodo consumível, quando a curva característica da fonte é: (a) Plana; (b) Tombante.

41. Na soldagem com corrente pulsada, descreva como é obtida a condição ótima de transferência do metal desde o eletrodo para a peça, em função da corrente de pico e do tempo nesta corrente.

42. O que é “Ciclo de Trabalho” de uma fonte de potência para soldagem. Caso a mesma seja especificada pelo fabricante com um Ciclo de Trabalho de 50 % à 300 A, qual a corrente máxima que pode ser utilizada à um Ciclo de Trabalho de 72%?

43. Descreva sumariamente os principais tipos de fontes de potência e diga quais as principais vantagens daquelas transistorizadas sobre as convencionais.

44. Descreva um sistema inversor para soldagem ao arco elétrico e diga quais são suas vantagens sobre aquele convencional.

45. Na soldagem ao arco elétrico, cite três fatores a considerar (descartando preferência pessoal), quanto à escolha entre CC e CA.

46. O que é fator de potência? Como o mesmo pode ser corrigido?

47. Calcule a tensão disponível para a soldagem, se a mesma ocorre a 40 m da fonte de potência, a seção transversal do cabo (cobre) é de 50 mm² e é de 300 A a intensidade da corrente conduzida.

CAPÍTULO 04: SOLDAGEM A ARCO COM ELETRODO REVESTIDO

48. Qual o tipo da curva característica que deve ser fornecido pela fonte de potência e porque?

49. Como varia a penetração e a taxa de deposição, em função da polaridade do eletrodo (CA, CCEN e CCEP)?

50. Qual o efeito sobre o metal de solda, do “balanço” excessivo do consumível (durante a soldagem)?

51. Cite dez funções que os revestimentos devem satisfazer, tanto sob o ponto de vista operacional, quanto para possibilitar sua produção.

52. Apresente três tipos de revestimentos, exemplificando duas características de cada um.

53. Discrimine 4 efeitos sobre as características operacionais do consumível e do metal de solda, provocados pelo progressivo aumento do teor do pó de ferro no revestimento.

54. Quais são as informações fornecidas pelo sistema de classificação AWS dos consumíveis para aços ao carbono?

55. Apesar de depositar um alto nível de hidrogênio no metal de solda e possuir taxa de deposição relativamente baixa, o consumível do tipo celulósico ainda é bastante empregado, principalmente na soldagem de tubulações de aço. Porque?

56. Na classificação AWS para aços baixa liga, qual o significado dos sufixos?

57. Exemplifique a classificação AWS de consumíveis para aços inoxidáveis e indique o significado dos sufixos.

58. O que "Número de Ferrita"?
59. Sobre qual local do consumível é medida sua bitola (diâmetro)?
60. Como é realizada a análise química dos eletrodos revestidos e qual o que é exceção no procedimento usual?
61. Em que temperatura, por quanto tempo e porque os consumíveis rutilicos e básicos devem ser ressecados.
62. Porque o consumível do tipo celulósico não deve ser ressecado?
63. Descreva a soldagem por: (a) Gravidade; (b) Contato.
64. Defina e mencione a importância para a economia da soldagem: (a) Relação volumétrica do revestimento; (b) Rendimento de deposição; (c) Taxa de deposição; (d) Comprimento do cordão de solda; (e) Posição de soldagem; (f) Corrente (intensidade/polaridade).
65. Considerando a sistematização proposta pela ASME, descreva as quatro categorias ("f-number") de eletrodos revestidos apresentadas pela mesma.
66. O que são: (a) Variáveis pré-selecionadas; (b) Variáveis ajustáveis primárias; (c) Variáveis ajustáveis secundárias.
67. Descreva, para juntas a topo e em ângulo: (a) Ângulo de trabalho; (b) Ângulo de deslocamento.
68. Desenhe três tipos de "tecimentos" e diga em que situações os mesmos são geralmente aplicados.
69. Estabeleça procedimentos de soldagem (com várias opções, se for possível) para o seguinte caso: (a) Material base: chapas de aço baixo carbono, com 13 mm de espessura; (b) Posição de soldagem: plana; (c) Tipo de junta: a topo; (d) Realização da soldagem: manual e por gravidade.
70. Avalie detalhadamente o custo para realizar a soldagem, cujo procedimento foi estabelecido na questão anterior (use as informações disponíveis no **Capítulo 20**).

CAPÍTULO 05: SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO

71. Qual o tipo da curva característica que deve ser fornecido pela fonte de potência e porque?
72. Desenhe uma seção longitudinal da poça de fusão, indicando suas regiões.
73. Como varia a penetração e a taxa de deposição, em função da polaridade do eletrodo (CA, CCEN e CCEP)?
74. Caracterize os fluxos fundidos, aglomerados e sinterizados.
75. O que é "Número de Neutralidade de Wall (N)" ?
76. Caracterize os fluxos neutros, ativos e ligados?
77. O que é "Índice de Basicidade (IB)" e qual sua importância para as propriedades mecânicas do metal de solda?
78. O que são fluxos ácidos e básicos, e qual deles é geralmente mais conveniente, em termos de tenacidade do metal de solda?
79. Quais são as informações fornecidas pelo sistema de classificação AWS dos consumíveis (fluxo e arame) para aços ao carbono?
80. Quais são as variáveis pré-selecionadas e as variáveis ajustáveis?
81. Descreva os (principais) efeitos dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda?
82. Como a tensão influencia o consumo de fluxo?
83. Qual a importância da granulometria do fluxo?
84. Descreva a técnica do chanfro estreito ("narrow-gap")?
85. Qual o efeito da distância bico de contato / peça, sobre a taxa de fusão do arame e penetração?
86. Descreva as técnicas para aumentar a taxa de deposição, as quais envolvem: (a) "Arame frio"; (b) "Arame quente"; (c) Arames em paralelo (fonte de potência única); (d) Arames em série (fonte de potência única); (e) Sistemas com arames alimentados independentemente e fontes múltiplas.
87. Cite dois modos possíveis de aumentar a taxa de deposição, sem alterar os parâmetros de soldagem e sem adquirir um novo equipamento e/ou acessório.
88. Descreva as possíveis vantagens econômicas de se utilizar este processo.
89. Estabeleça procedimentos de soldagem (com várias opções, se for possível) para o seguinte caso: (a) Material base: chapas de aço baixo carbono, com 13 mm de espessura; (b) Posição de soldagem: plana; (c) Tipo de junta: a topo; (d) Realização da soldagem: automática.
90. Avalie detalhadamente o custo para realizar a soldagem, cujo procedimento foi estabelecido na questão anterior (use as informações disponíveis no **Capítulo 20**).

CAPÍTULO 06: SOLDAGEM A ARCO COM ELETRODO TUBULAR

91. Qual o tipo da curva característica que deve ser fornecido pela fonte de potência (e porque), nos casos da soldagem ser realizada de forma: (a) Semi-automática; (b) Automática.

92. Caracterize os tipos auto-protégido e com proteção por gás. Qual a diferença na extensão do eletrodo após o bico de contato entre estes dois tipos?

93. Quais os efeitos (sobre a formulação do fluxo e metal de solda) do emprego de CO₂ como gás de proteção?

94. Quais são as informações fornecidas pelo sistema de classificação AWS dos consumíveis para aços ao carbono?

95. Qual o mais importante parâmetro de soldagem sobre o modo de transferência do metal desde o eletrodo para a peça?

96. Que efeito é exercido pela aumento da extensão do eletrodo após o bico de contato sobre a corrente de soldagem?

97. Cite dois modos possíveis de aumentar a taxa de deposição, sem alterar os parâmetros de soldagem e sem adquirir um novo equipamento e/ou acessório.

98. Descreva as possíveis vantagens econômicas ao se utilizar este processo.

99. Estabeleça procedimentos de soldagem (com várias opções, se for possível) para o seguinte caso: (a) Material base: chapas de aço baixo carbono, com 13 mm de espessura; (b) Posição de soldagem: plana; (c) Tipo de junta: a topo; (d) Realização da soldagem: semi-automática e automática.

100. Avalie detalhadamente o custo para realizar a soldagem, cujo procedimento foi estabelecido na questão anterior (use as informações disponíveis no **Capítulo 20**).

CAPÍTULO 07: SOLDAGEM A ARCO COM PROTEÇÃO POR GÁS E ELETRODO NÃO CONSUMÍVEL ("TIG")

101. Qual o tipo da curva característica que deve ser fornecido pela fonte de potência (e porque), nos casos da soldagem ser realizada de forma: (a) Manual; (b) Automática.

102. Como ocorre a distribuição de calor eletrodo/peça e de que forma varia a penetração (para mesmos parâmetros), conforme é alterada a polaridade (CCEP, CCEN e CA)?

103. Na soldagem do alumínio, qual o tipo de corrente mais recomendada e porque?

104. Na soldagem de uma muito fina chapa de aço ao carbono, com relação ao eletrodo, diga qual a polaridade mais conveniente do mesmo, como deve ser afinada sua ponta e porque?

105. Caracterize (inclusive com as aplicações recomendadas) os eletrodos classificados pela Norma AWS.

106. Quais são as principais diferenças entre o emprego de argônio e hélio como gases de proteção?

107. A determinação da ótima vazão para o gás de proteção depende de quatro fatores principais. Quais são eles?

108. Descreva as duas principais técnicas atualmente disponíveis para se iniciar o arco.

109. Aponte dois métodos para aumentar a taxa de deposição.

110. Indique as vantagens de se empregar o modo com corrente pulsada.

111. Estabeleça procedimentos de soldagem (com várias opções, se for possível) para o seguinte caso: (a) Material base: chapas de aço baixo carbono, com 6 mm de espessura; (b) Posição de soldagem: plana; (c) Tipo de junta: a topo; (d) Realização da soldagem: manual e automática (com "arame frio" e "arame quente").

112. Avalie detalhadamente o custo para realizar a soldagem, cujo procedimento foi estabelecido na questão anterior (use as informações disponíveis no **Capítulo 20**).

CAPÍTULO 08: SOLDAGEM A ARCO COM PROTEÇÃO POR GÁS E ELETRODO CONSUMÍVEL ("MIG/MAG")

113. Qual o tipo da curva característica que deve ser fornecido pela fonte de potência (e porque), nos casos da soldagem ser realizada de forma: (a) Semi-automática; (b) Automática.

114. Qual a diferença fundamental entre "MIG" e "MAG"?

115. Explique detalhadamente e utilizando gráficos, o fenômeno de "auto-ajustagem" do arco e o sistema "tensão-sensitivo".

116. Descreva três sistemas de alimentação do arame.

117. Cite duas importantes razões porque arames de pequeno diâmetro devem ser utilizados, quando é empregada fonte com curva característica "tensão constante".

118. Descreva detalhadamente os modos de transferência do metal desde o eletrodo para a peça, denominados "curto-circuito"; "globular"; "gotas repelidas e projetadas" e "aerosol".
119. Para a soldagem em "aerosol, há um importante detalhe a ser observado, quanto à posição relativa do bocal e do bico de contato. Explique.
120. Qual o efeito do aumento da "indutância", quando se está soldando no modo de transferência em curto-circuito?
121. Descreva um sistema de onda com corrente pulsada e diga de quais parâmetros principais depende a velocidade de alimentação.
122. Quais as possíveis vantagens de se empregar corrente pulsada?
123. Descreva os estágios na formação da gota, no modo de transferência axial por corrente pulsada e como deve ser preferencialmente realizada a transferência da mesma.
124. Na soldagem de um aço ao carbono, é realizado no gás de proteção progressivo aumento do dióxido de carbono (no argônio). Qual o efeito dessa ação sobre: (a) Modos de transferência do metal desde o eletrodo para a peça?; (b) Tenacidade do metal de solda (e porque)?; (c) Penetração?.
125. Com arame de aço ao carbono não se emprega argônio (puro) como gás protetor. Porque?
126. Empregando-se CO_2 puro como gás de proteção, explique quando ocorrerá "carburização" e "descarburização" (ga-seificação) do metal de solda.
127. Qual o efeito do potencial de oxidação (PO) sobre a composição química do metal de solda (e porque)?
128. Quais são as informações fornecidas pelo sistema de classificação AWS dos consumíveis para aços ao carbono?
129. Sabendo que o diâmetro do arame é "D" (mm); sua massa específica é "m" (g/cm^3); a velocidade de alimentação do arame é "W" (m/min) e a vazão do gás é "Z" (l/min), demonstre (equacionando o problema) a relação existente entre a Taxa de Fusão (kg/h) e o Consumo Específico de Gás, ou seja, litros de gás por quilo do metal de solda depositado. Qual a importante conclusão, de ordem econômica, que a análise dessa equação permite?
130. O que são: (a) Variáveis fixas; (b) Variáveis ajustáveis primárias; (c) Variáveis ajustáveis secundárias.
131. É possível alterar a penetração sem variar os parâmetros (através do sentido de soldagem). Explique.
132. Sendo percebido que um cordão de solda está com falta de penetração e excessivamente largo, o que pode ser alterado no ato?
133. Estabeleça procedimentos de soldagem (com várias opções, se for possível) para o seguinte caso: (a) Material base: chapas de aço baixo carbono, com 13 mm de espessura; (b) Posição de soldagem: plana; (c) Tipo de junta: a topo; (d) Realização da soldagem: semi-automática e automática.
134. Avalie detalhadamente o custo para realizar a soldagem, cujo procedimento foi estabelecido na questão anterior (use as informações disponíveis no **Capítulo 20**).

CAPÍTULO 9: SOLDAGEM A ARCO PLASMA

135. Qual o tipo da curva característica que deve ser fornecido pela fonte de potência (e porque), nos casos da soldagem ser realizada de forma: (a) Manual; (b) Automática.
136. O que é plasma com arco "transferido" e "não transferido"?
137. No método plasma com arco transferido existem cinco quedas de potencial. Quais são elas?
138. Esquematize a tocha empregada no método com arco transferido, indicando os gases de proteção "de orifício" e de "proteção (ou de foco)".
139. Porque a temperatura do arco elétrico neste processo é a maior entre todos?
140. Descreva o modo "keyhole" de soldagem e apresente as vantagens do seu emprego.
141. Relacione as variáveis primárias e secundárias de controle, descrevendo seus efeitos sobre o cordão de solda.
142. De quais fatores depende a tensão de soldagem?
143. Compare técnica e economicamente este processo com o TIG (**Capítulo 7**).

CAPÍTULO 10: SOLDAGEM POR ELETROESCÓRIA E ELETROGÁS

144. Para cada um destes processos, descreva a curva característica que deve ser fornecida pela fonte de potência (e porque).
145. Descreva detalhadamente a soldagem por Eletroescória e por Eletrogás. Quais os principais fatores que determinam o emprego de um ou outro processo?

146. Porque considera-se a Eletroescória um processo de soldagem "por resistência elétrica"?
147. Quais são as informações fornecidas pelo sistema de classificação AWS dos consumíveis para aços ao carbono (ambos os processos)?
148. Quais são as principais funções do fluxo na Eletroescória e que condições o mesmo deve satisfazer?
149. Na Eletroescória, descreva detalhadamente as variáveis de procedimento, principalmente o efeito da tensão e da corrente sobre a geometria da poça de fusão.
150. Na Eletroescória, o que é "fator de forma" e como a combinação do seu valor com o conteúdo de carbono (na soldagem dos aços ao carbono) pode provocar trinca de solidificação no metal de solda?
151. Quais são as principais descontinuidades que a junta soldada pode apresentar (ambos os processos)?

CAPÍTULO 11: SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA

152. Como é gerada a energia para a fusão (descreva a equação e suas variáveis)?
153. Qual a importância da densidade da corrente aplicada?
154. Quais são as principais origens da variação na qualidade e geometria da solda?
155. Descreva uma operação completa de soldagem, detalhando todas as fases importantes.
156. Porque as etapas da soldagem são medidas em "ciclos"?
157. Sabendo que uma etapa de soldagem foi realizada em 12 ciclos (frequência da rede 60 Hz), qual foi o tempo despendido na sua execução?
158. Qual a vantagem de se utilizar contadores síncronos?
159. Quais são as três mais importantes características que os eletrodos devem possuir?
160. O que é Ciclo de Trabalho de uma fonte de potência?
161. Descreva detalhadamente a soldagem por Ponto.
162. Na soldagem por Ponto, indique o que são conexões: (a) Direta e Indireta; (b) Série e Paralelo.
163. Na soldagem por Ponto, para manter o diâmetro da solda proximadamente igual àquele da face do eletrodo, qual a relação que deve existir entre a espessura da chapa e esta última variável?
164. Sendo soldadas por Ponto duas chapas de igual espessura (4 mm), estabeleça: (a) O espaçamento entre os pontos; (b) A largura de sobreposição das chapas; (c) A distância do ponto à borda da chapa.
165. Descreva detalhadamente a soldagem por Projeção e indique quando seu emprego é mais conveniente.
166. Descreva detalhadamente a soldagem por Costura e indique quando seu emprego é mais conveniente.

CAPÍTULO 12: SOLDAGEM POR CENTELHAMENTO

167. Descreva uma operação completa de soldagem, detalhando todas as fases importantes.
168. Em que casos este processo pode ser empregado com vantagens sobre outros? Sobre que materiais o mesmo pode ser utilizado?
169. Quais são as informações básicas que a aparência do recalque pode fornecer?
170. Mostre dois métodos para ajustar a distribuição de calor entre partes que serão soldadas.

CAPÍTULO 13: SOLDAGEM POR FRICÇÃO

171. Descreva uma operação completa de soldagem convencional e por inércia, detalhando todas as fases importantes.
172. Em que casos este processo pode ser empregado com vantagens sobre outros? Sobre que materiais o mesmo pode ser utilizado?
173. Na soldagem por inércia, explique detalhadamente os efeitos sobre a solda da: (a) Velocidade periférica da peça; (b) Pressão axial; (c) Energia do volante.
174. Como ocorre o método linear?

CAPÍTULO 14: SOLDAGEM POR LASER

175. Mostre os principais aspectos do LASER a rubi e enuncie as mais importantes características que um feixe desta energia (em geral) possui.
176. Como é obtida a "inversão da população"?
177. Em que casos este processo pode ser empregado com vantagens sobre outros? Sobre que materiais o mesmo pode ser utilizado?
178. Cite as principais características dos LASERs tipos sólido; gás e EXCIMER.
179. Como pode ser formado um plasma sobre a superfície da solda?
180. A distribuição radial de energia do feixe depende do Modo Transversal Eletromagnético ("TEM"). Explique.
181. Quais são as principais dificuldades do emprego deste processo na soldagem?
182. Cite três outros empregos para o LASER (além da soldagem e corte), considerando a densidade de potência e tempo de interação do feixe.
183. Mantidos os outros fatores constantes, qual o efeito sobre a penetração da solda, do aumento da: (a) Potência do feixe; (b) Velocidade de soldagem.

CAPÍTULO 15: SOLDAGEM POR FEIXE DE ELÉTRONS

184. Em que casos este processo pode ser empregado com vantagens sobre outros? Sobre que materiais o mesmo pode ser utilizado?
185. Descreva os principais aspectos para a produção do feixe.
186. Quais são as radiações produzidas pelo choque dos elétrons contra a peça? Como consequência, quais as principais precauções de segurança que devem ser tomadas?
187. Cite três outros empregos para o Feixe de Elétrons (além da soldagem), considerando a densidade de potência e a potência do feixe.
188. Descreva os dois modelos que procuram explicar a formação da solda.
189. Mantidos os outros fatores constantes, qual o efeito sobre a penetração da solda, do aumento da: (a) Tensão de aceleração dos elétrons; (b) Corrente do feixe; (c) Potência do feixe; (d) Velocidade de soldagem.
190. Quais são as características do emprego deste processo em: (a) Alto vácuo; (b) Médio vácuo; (c) Pressão atmosférica.

CAPÍTULO 16: SOLDAGEM POR OXIGÁS

191. Em que casos este processo pode ser empregado com vantagens sobre outros? Sobre que materiais o mesmo pode ser utilizado?
192. Explique: (a) Razão de combustão; (b) Calor de combustão; (c) Velocidade de combustão; (d) Intensidade de combustão.
193. Para uma dada mistura oxicom bustível, de quais fatores depende a temperatura da chama?
194. Descreva a produção e as principais características de armazenamento dos gases oxigênio e acetileno.
195. Qual é a equação da reação química da combustão completa do oxigênio com acetileno?
196. Quais são as regiões de uma chama oxiacetilênica?
197. Na soldagem oxiacetilênica, descreva a aparência; as características e as aplicações das chamas resultantes, quando se altera a razão entre as vazões de oxigênio e acetileno.
198. Quais são as principais precauções que devem ser tomadas, quando se utiliza o acetileno em cilindros (e porque)?
199. Como funciona um gerador de acetileno e que medidas de segurança devem ser tomadas para sua operação?
200. Descreva as instalações completas para soldagem oxiacetilênica, inclusive com os equipamentos de segurança necessários.
201. Para a soldagem oxiacetilênica, quais são os principais tipos de maçaricos empregados?
202. Descreva e indique (quando for o caso) as principais aplicações da soldagem oxiacetilênica: (a) À esquerda; (b) À direita; (c) Com grande penetração; (d) Na vertical; (e) Sobrecabeça.
203. Uma solda está sendo realizada com o processo oxiacetilênico, numa velocidade de 5 mm/s e com vazão do acetileno de 1000 l/h. Qual é a energia de soldagem gerada? (use as informações disponíveis no **Capítulo 2**)

204. Com relação às propriedades mecânico/metalúrgicas da junta soldada, quais são os principais aspectos negativos que este processo de soldagem apresenta?

205. Este processo de soldagem pode ser conveniente para certas aplicações. Quais são elas e porque?

CAPÍTULO 17: BRASAGEM

206. Sobre um diagrama de equilíbrio binário genérico, indique: (a) Linha do "liquidus"; (b) Linha do "solidus"; (c) Intervalo de solidificação; (d) Ponto eutético.

207. Cite as principais etapas numa operação de Brasagem.

208. Discorra sobre a importância para este processo: (a) Molhamento; (b) Capilaridade.

209. Cite: (a) Três modos nos quais o material base e os consumíveis podem interagir; (b) Os principais fatores que determinam a taxa destas interações; (c) Os principais procedimentos que minimizam a ocorrência das interações.

210. O que é "tamanho da folga" e qual sua importância para a qualidade e propriedades mecânicas da junta?

211. Quais as principais funções e características que um fluxo para este processo deve possuir?

212. Descreva os tipos de atmosferas protetoras mais usuais.

213. O que é "ponto de orvalho" e qual a sua importância?

214. Descreva em detalhes os principais métodos de Brasagem que existem.

215. Quais são as formas com que os consumíveis são fornecidos?

216. Numa junta sobreposta, calcule o comprimento de sobreposição, sendo: (a) Fator de segurança 1,5; (b) Resistência à tração do membro mais fino 200 MPa; (c) Espessura do membro mais fino 5 mm; (d) Resistência ao cisalhamento do metal de adição 100 MPa.

217. A concentração de tensões numa junta é causada principalmente por sua geometria e pelo desenvolvimento de tensões térmicas. Discorra sobre este assunto.

218. Em que casos este processo pode ser empregado com vantagens sobre outros? Sobre que materiais o mesmo pode ser utilizado?

CAPÍTULO 18: PULVERIZAÇÃO TÉRMICA

219. Quais são as principais finalidades dos revestimentos e que vantagens este método apresenta sobre outros?

220. Descreva o processo de maneira geral, apresentando as principais etapas envolvidas.

221. Discorra sobre as principais variáveis (em geral), as quais determinam a qualidade do revestimento.

222. Caracterize detalhadamente os métodos existentes para realizar revestimentos protetores, inclusive com os consumíveis disponíveis..

223. Descreva os mais importantes aspectos da preparação do substrato?

CAPÍTULO 19: PROCESSOS DE CORTE TÉRMICO

224. Porque estes métodos são empregados e quais as principais vantagens dos mesmos sobre outros?

225. Caracterize detalhadamente: (a) Deformação; (b) Arraste; (c) Largura do rasgo; (d) Arredondamento da borda superior; (e) Paralelismo da superfície; (f) Rugosidade da superfície.

226. Cite as três condições básicas para que o Oxicorte possa ser executado.

227. Descreva detalhadamente como é realizado o Oxicorte de uma peça de aço ao carbono (definindo, inclusive, "temperatura de ignição") e o que impede este processo de ser utilizado para metais ferrosos com alta porcentagem de elementos de liga?

228. Descreva os equipamentos e acessórios necessários para se realizar o Oxicorte, inclusive detalhando os tipos de bicos mais usuais.

229. Quais são os principais métodos auxiliares empregados no Oxicorte de materiais que geralmente não são possíveis de cortar com este método?

230. Descreva os principais itens de segurança que devem ser atendidos, quando se emprega acetileno no Oxicorte.

231. Qual o princípio básico que a seqüência do corte deve obedecer para minizar a deformação?
232. Descreva a técnica do super-aquecimento no Oxicorte mecanizado.
233. Descreva detalhadamente o processo de corte térmico por Plasma e os aspectos de segurança que devem ser atendidos.
234. No corte por Plasma, qual a vantagem do uso de gases moleculares com grande entalpia?
235. No corte por Plasma, como é possível aumentar a velocidade de corte?
236. No corte por Plasma, quais são os principais efeitos do aumento da intensidade da corrente?
237. Descreva detalhadamente o processo de corte térmico por LASER e os aspectos de segurança que devem ser atendidos.
238. Discorra sobre os mecanismos básicos de operação, para os diferentes tipos de LASER.
239. No corte por LASER, como pode ser reduzido o diâmetro do feixe?
240. Como é produzido o feixe no LASER tipo a gás CO_2 ?
241. Descreva detalhadamente o corte realizado ao arco elétrico com eletrodos carvão/grafita.
242. O que é goivagem e como esta operação é geralmente realizada com eletrodo de carvão/grafita?
243. Como é realizado o corte com: (a) Eletrodo revestido; (b) TIG; (c) Ao arco e tubo com oxigênio.
244. Quais são as opções disponíveis para se realizar o corte subaquático?

CAPÍTULO 20: A ECONOMIA DA SOLDAGEM

245. Discorra sobre a produtividade e apresente sugestões para mensurá-la.
246. Mostre (gráficamente) como a proporção das unidades defeituosas atua sobre os custos.
247. Como é composto: (a) Investimento de capital; (b) Custos da produção.
248. O que é e que métodos são empregados para o cálculo da depreciação?
249. Como a inflação pode influenciar o avanço tecnológico?
250. Descreva: (a) Gráficos de produção econômica; (b) Curva do aprendizado.
251. Caracterize os principais custos envolvidos nas diversas fases de uma operação de soldagem.
252. Conceitue: (a) Fator de operação; (b) Rendimento de deposição; (c) Eficiência do consumível; (d) Eficiência de deposição; (e) Taxa de deposição; (f) Rendimento do fluxo.
253. Discorra sobre os três principais itens que devem ser manipulados para se minimizar os custos da soldagem.
254. O que é "fator tecnológico" e qual a sua importância para a economia da soldagem?
255. Demonstre que o tempo total de soldagem por unidade de comprimento da junta é função do fator tecnológico.
256. Simule diferentes situações (de preferência empregando um simples programa de computador, ou planilha de cálculo) e observe a alteração do custo do trabalho (salário mais encargos sociais), conforme varia o fator tecnológico.
257. Para um mesmo tipo de trabalho a ser realizado, simule os custos resultantes (de preferência empregando um simples programa de computador, ou planilha de cálculo), quando se utiliza diferentes processos de soldagem. Compare as estimativas com situações reais.
258. Aprimore o sistema apresentado para cálculo dos custos da soldagem. Dê sugestões; critique construtivamente; participe do que ocorre ao seu redor.

ÍNDICE REMISSIVO

CÓPIA AUTORIZADA PELO AUTOR
DISTRIBUIÇÃO GRATUITA
PROIBIDA A COMERCIALIZAÇÃO EM QUALQUER FORMATO

- A**
- A**
- amplitude da onda 289
- ângulo do chanfro 385
- área da seção transversal 49
- a**
- declividade da curva característica 46
- difusividade térmica 305
- espessura da chapa, oxicorte 386
- A Economia da Soldagem** 409
- Aa**
- área da seção transversal do arame 238
- ABNT**
- NB 46-1985 423
- acetileno**
- compostos explosivos 320
- dissolvido 321
- equação da combustão 317
- impurezas 317
- misturas explosivas 320
- oxicorte 380
- oxigás 317, 320
- acetileno, geradores de 320
- ACGIH** 429
- aços austeníticos ao manganês 94
- aços ferramenta 94
- aços inoxidáveis, soldagem dos
- resistência elétrica 249
- aerossol** 4
- transferência do metal, modo de 199
- alma** 72
- eletrodo revestido 70
- alumina** 440
- alumínio, soldagem do
- resistência elétrica 249
- amplificador magnético** 54
- ângulo**
- da fase líquida 38
- de solidificação 38
- junta em 21
- ângulo de contato**
- brasagem 332
- ânodo** 25
- Ao**
- área da seção transversal do feixe 302
- aplicações**
- LASER, corte com 395
- plasma, corte com 390
- aplicações e materiais**
- pulverização térmica 369
- Arco Elétrico, Corte com** 397
- Eletrodo Carvão/Grafita 397
- goivagem 397
- Eletrodo Revestido 398
- oxigênio (tubo revestido) 398
- Subaquático 399
- exotérmico 399
- TIG 398
- arco elétrico na soldagem** 24
- abertura do 29
- aspectos dinâmicos 47
- campos magnéticos 27
- caracterização 24
- coluna do 25
- coluna do arco 25
- comprimento do 29, 46
- condutividade térmica 32
- condutividade térmica total 32
- deflexão magnética 27
- densidade de partículas 30
- densidade de potência 26
- dissociação e ionização 30
- distribuição de temperatura 32
- emissividade 26
- energia gerada 32
- entalpia 33
- força 26
- importância 24
- isotermas 32
- jato de plasma 26
- oscilograma 35
- perda de calor por condução 25
- perda de calor por convecção 26
- perda de calor por radiação 25
- potencial de ionização 30
- pressão, efeito da 29
- quase equilíbrio térmico 32
- queda de tensão anódica 25
- queda de tensão catódica 24
- re-ignição 35
- regiões 24
- relação corrente x tensão 29
- retificação inerente 36
- rigidez 26
- "sopro magnético" 27
- temperaturas do 24
- tensão máxima admissível 24
- viscosidade dinâmica 33
- arco não-transferido. Veja Plasma:**
- arco: não-transferido
- arco piloto. Veja Plasma:**
- arco piloto
- Arco Submerso**
- arames 138
- arames CA/CA/CA 148
- arames CC/CA/CA 148
- arames conectados em fontes múltiplas 147
- arames em paralelo, fonte única 146
- arames em série, fonte única 147
- arames frio e quente 146
- chanfro estreito 146
- chanfro estreito ("narrow gap") 145
- consumíveis, classificação AWS 141
- corrente, efeito da 143
- corrente, polaridade 138
- curva característica 137
- delta fechado, sistema 148
- equipamento 137
- estabilidade do arco 144
- extensão do eletrodod 143
- fitas, consumível tipo 149
- fluxo, altura e largura 144
- fluxos 138
- fluxos aglomerados 139
- fluxos ativos 140
- fluxos, composições 140
- fluxos fundidos 139
- fluxos, granulometria 142
- fluxos ligados 140
- fluxos neutros 139
- fluxos, seleção 141
- fluxos sinterizados 139
- índice de basicidade 140
- juntas, métodos de selagem da 144
- modo de transferência do metal 136
- número de Wall 139
- peça/cabeçote, posição relativa 149
- pó de ferro, adição de 145
- poça de fusão 136
- procedimentos de soldagem 151
- juntas de filete - tabelas 155
- Scott, configuração tipo 147
- tandem, soldagem em 147
- taxa de deposição 144, 146
- taxa de fusão 136
- técnicas operacionais 149
- tensão, efeito da 139
- tensão, efeito sobre 143
- tubos, soldagem de 150
- variáveis de procedimento 142
- ajustáveis 143
- pré-selecionadas 142
- velocidade de soldagem, efeito da 143
- arco transferido. Veja Plasma:**
- arco: transferido
- argônio**
- plasma, corte com 390
- arraste, linhas de**
- corte térmico, processos de 372
- As**
- área da seção transversal do metal de solda 238
- ASME**
- brasagem, posições de 354
- eletrodos revestidos 105
- ASME, categorias**
- eletrodo revestido
- alta taxa de deposição 106
- baixo hidrogênio 107
- grande penetração 106
- pequena penetração 106
- Aspectos Ambientais e de Segurança** 428
- auto-ajustagem do arco** 47
- MIG 194
- auto-protetido**
- eletrodo tubular 159
- avanço tecnológico** 408
- AWS, especificações**
- arco submerso 141
- eletrodo tubular 162
- eletrodos revestidos 76
- MIG
- arame 208

- TIG
eletrodos, tipos 174
- B**
- B
distância da borda da peça 258
baixo hidrogênio, consumível 80
Bernard, Arthur A. 4
Bernardos, Nikolai N. 3
Bethenod, J. 3
Bibliografia 442
bicos
 oxicorte 377
bisel 18
Bohr, N. 290
 teoria atômica 290
Brasagem 2, 330
 atmosfera protetoras 346
 capilaridade 330, 333
 cerâmicos 335, 440
 chama, por 348
 consumíveis, classificação AWS 339
 diagrama constitucional ou de equilíbrio 330
 efeitos sobre o metal base 335
 energia radiante, por 353
 expansão térmica
 coeficientes 360
 fenômenos gerais 331
 fluxos 344
 folga 333
 forno, em 352
 imersão, por 353
 indução, por 351
 interações metalúrgicas 334
 junta
 comprimento de sobreposição 357
 dimensionamento 355
 geometria 355
 limpeza 354
 projeto 354
 propriedades mecânicas 354
 resistência mecânica típica 358
 tamanho da folga 358
 tensões térmicas 356
 tipos 355
 variação da folga (efeito térmico) 359
 materiais, efeito sobre os 335
 mecanização 350
 metal de adição 337
 intervalo de operação 337
 intervalo de solidificação 337
 volume necessário 355
 métodos de 348
 molhamento 330, 331
 posições de 354
 pressão de vapor do metal de adição 336
 proteção, meios de 344
 resistência elétrica, por 351
- C**
- C
ciclo de trabalho 52, 252
comprimento da onda 289
consumo específico de gás 210, 415
espessura a ser cortada 385
- c
condutividade térmica relativa 248
velocidade da luz 301
cabo retorno da corrente. *Veja*
 cabo terra
cabo terra 27
cabos de conexão 66
 dimensionamento 67
 queda de tensão 66
calor de combustão
 oxigás 315
calor, distribuição de
 Plasma 221
camada, de solda 18
capilaridade
 brasagem 330, 333
carbeto de silício 439
carboneto (carbureto) de cálcio
 oxigás 317
carburização
 MIG 205
carga espacial envolvente
 negativa 25
 positiva 24
carvão/grafita, eletrodo
 arco elétrico, corte com 397
cátodo 24
 frio 25
 não-termoiônico 25
 queda de tensão 25
 termoiônico 24
cavidade ressonante 292
- Cc
 calor de combustão 316
- Cd
 depreciação total 407
- Centelhamento
 condições de soldagem 274
 dimensões das peças
 material perdido 273
 energia, distribuição da 273
 equipamento 271
 capacidade típica 271
 matrizes e eletrodos 271
 procedimentos de soldagem 275
 soldagem por 270
 soldagem, seqüência de 273
 técnicas, peças dissimilares 274
 variáveis de procedimento 272
- Cerâmicos 439
 brasagem 335
 processos de união dos 439
cerâmicos de engenharia 439
chama
 válvulas contra retrocesso da 322
- chama de soldagem
 acetilênica 319
 carburizante 319
 combustão secundária 318
 cone e dardo 318
 envelope 318
 neutra 319
 oxidante 319
 oxigás 317
 penacho 318
 redutora 319
 região redutora 318
 regiões da 318
 tipos 319
chama, temperatura da
 oxigás 315
chanfro estreito
 arco submerso 145, 146
 MIG 214
chanfros
 geometria e terminologia 18
 oxicorte 385
chapas empilhadas
 oxicorte 384
choque elétrico 432
- Ci
 custo inicial 407
ciclo de soldagem
 resistência elétrica 247
ciclo de trabalho 52
 resistência elétrica 252
ciclo térmico
 oxicorte 381
cilindros com gases
 gás contido, cálculo do 424
 identificação 423
 pintura 424
circuitos integrados 4
Classificação AWS
 brasagem, consumíveis
 BAg 339
 BAISi 342
 BAu 341
 BCo 344
 BCu 343
 BCuP 342
 BMg 344
 BNi 343
 BV... (vácuo) 344
 intervalo de solidificação 339
 intervalo para brasagem 339
 RBCuZn 343
 consumível
 brasagem 339
 eletroescória 232
 eletrogás 232
Classificação RWMA
 resistência elétrica
 eletrodos 251
coalescência 4
 cobalto, ligas à base de 95
 cobre e suas Ligas
 consumível indicado 92
 cobre e suas ligas 95
 cobre, soldagem do
 resistência elétrica 250
coeficientes de correção

- gases, vazão 423
 Coffin, Charles L. 3
 comprimento de sobreposição
 brasagem 357
 constante de tempo térmica 292
 constrição do arco elétrico 220
 consumíveis
 custos da soldagem 418
 consumo específico de gás 414
 MIG 210
 controle sinérgico
 sinergia 48
 Controles da Pressão e Vazão
 economizador de gás 425
 gases 422
 gases, vazão
 coeficientes de correção 423
 reguladores de pressão 422
 curva característica 422
 cordão (de solda) 18
 corrente crítica de transição
 MIG 199
 corrente de curto-circuito 44
 corrente pulsada 4, 48
 alteração da forma da onda 51
 aspectos físicos e matemáticos 49
 comprimento do arco 50
 curva característica plana 49
 curva característica tombante 49
 MIG 200
 estágios na formação da gota 200
 zona ótima de operação 201
 sinérgico, sistema 48
 TIG 182
 transferência, melhor condição de 50
 vantagens 48
 velocidade de alimentação 49
 corte, qualidade do
 oxicorte 386
 Corte Térmico, Processos de 372
 conceitos gerais e qualidade 372
 arraste, linhas de 373
 borda superior, arredondamento da 373
 deformação 373
 linhas de arraste (estrias) 372
 rasgo, largura do 373
 seqüência e sentido do corte 373
 superfície, paralelismo da 373
 superfície, rugosidade da 374
 LASER. *Veja* LASER, Corte com
 Oxicorte 374
 Plasma. *Veja* Plasma, Corte com
 COSHH 429
 Creeca, John D. 4
 Cronologia da União dos Materiais 2
 Crookes, W. 300
 Cs
 valor terminal 407
 Ct
 custo anual total 409
 curto-circuito
 transferência do metal, modo de 197
 curva característica do arco 44
 curva do aprendizado 409
 curvas características
 corrente constante ("tombante") 45
 declividade 47
 potência constante 45
 reguladores de pressão e vazão 422
 tensão constante ("plana") 46
 Custo da Soldagem
 equações para o cálculo 418
 custo do trabalho 418
 custo total 419
 custo total parcial 419
 Custos
 conceituação 404
 de contingências 406
 de distribuição 406
 de manufatura 406
 de produção 406
 diretos 405, 406
 do capital 405
 economia da soldagem 411
 estimativa, acuracidade da 405
 gerais 405, 406
 indiretos 405, 406
 operacionais 405
 outros 407
 custos
 Economia da Soldagem 402
 Custos da Soldagem 411
 cálculo 418
 massa do metal de solda a ser depositado 418
 certificação da qualidade 412
 consumíveis 418
 eficiência do consumível 412
 energia elétrica 418
 equações fundamentais 417
 equipamento 418
 estimativa 415
 exemplo 419
 fator de operação 412
 fator tecnológico 418
 geral 411
 manutenção do equipamento 418
 massa do metal de solda 413
 minimização 413
 estratégias para 415
 metal de solda depositado 414
 tempo total de soldagem 413
 operações prévias 412
 organização 412
 organização e controle 415
 overhead 418
 projeto da junta 411
 rendimento de deposição 412
 rendimento do fluxo 413
 reparos das soldas defeituosas 419
 seleção de pessoal 412
 soldagem, operação de 412
 soldagem, operações após a 412
 taxa de deposição 413
 tempo total 413
 total 419
 total parcial 419
 trabalho 418
 variáveis, relação das 415

D

D

- densidade de corrente máxima 246
 diâmetro da face do eletrodo 257
 Davy, Humphry 3
 De Meritens, Auguste 3
 De Richemont, Desbassyns 3
 defeitos
 custos, efeito sobre os economia da soldagem 403
 oxicorte 386
 deflexão magnética 27
 deformação
 corte térmico, processos de 373
 depósito, densidade do
 pulverização térmica 363
 depreciação 407
 métodos 408
 descarburização
 MIG 205
 descontinuidades
 Eletroescória & Eletrogás 241
 Devers, Philip K. 3
 diagrama
 Espy 82
 WRC-1988 82
 Difusão 4
 diluição 19
 DIN 2310
 Corte Térmico, Processos de 374
 LASER, Corte com 396
 Oxicorte 386
 Plasma, Corte com 392
 diodos 55
 dispositivos eletrônicos 56
 "chip" 58
 circuitos integrados 58
 semi-condutores/retificação 56
 tiristor 57
 transistor 58
 dissimilares, materiais
 variação da folga (efeito térmico) brasagem 359
 dissimilares, soldagem dos
 resistência elétrica 250
 Dohm, Klaus 4

- E**
- E
 campo elétrico 49
 energia de soldagem 283
 feixe de elétrons 306
- e
 carga do elétron 301
 espessura a ser soldada 234
 espessura da chapa 246
- Economia da Soldagem 402
 avanço tecnológico 408
 custos da soldagem 418
 depreciação 407
 fator tecnológico 418
 gráficos de produção econômica 408
 inflação 410
 noções gerais 404
 produtividade 402
 qualidade 402
- economizador de gás 425
- efeito
 Joule 25
 pinch 39
- eficiência de deposição 412
- eficiência de fusão 42. *Veja*
 Plasma: eficiência de fusão
- eficiência do consumível 412
- Einstein, A. 290
- elementos de liga, efeito dos
 oxicorte 381
- eletrodo composto 96
- Eletrodo Revestido 70
 acessórios 71
 aços ao carbono 76
 características operacionais 77
 condições para ressecagem 98
- aços baixa liga 81
 características operacionais 82
- aços inoxidáveis 81
 fase sigma, formação da 81
 ferrita delta 81
 número de ferrita 81
 número de ferrita, limites 87
 sufixos (AWS) 82
 trinca de solidificação 81
- alma de aço, composição química 72
- ângulo
 de deslocamento 108
 de trabalho 108
- ASME, categorias 105
- baixo hidrogênio 107
- "balanço" do consumível, efeito do 71
- circuito elétrico básico 70
- classificação AWS
 aços ao carbono 76
 aços baixa liga 81
 aços inoxidáveis 81
 classes, características 77
 Cobre e suas ligas 92
 E NiFe-CI 93
- E16-8-2 91
E209 88
E219 88
E2209 91
E240 88
E2553 92
E307 88
E308 89
E308H 89
E308L 89
E308Mo 89
E308MoL 89
E309 89
E309Cb 89
E309L 89
E309Mo 89
E310 89
E310Cb 89
E310H 89
E312 89
E316 90
E316 OH 90
E316L 90
E317 90
E317L 90
E318 90
E320 90
E320LR 90
E330 90
E330H 90
E347 90
E349 91
E383 91
E385 91
E410 91
E410NiMo 91
E430 91
E502 91
E505 91
E6010 e E6011 77
E6012 78
E6013 78
E6019 79
E6020 79
E6022 79
E6027 e E7027 79
E630 91
E7014 80
E7015 80
E7016 80
E7018 e E7048 80
E7024 80
E7028 80
E7Cr 91
ECI 92
ECoCr 95
ECu 92
ECuAl-A2 92
ECuAl-B 92
ECuMnNiAl 92
ECuNi 92
ECuNiAl 92
ECuSi 92
ECuSn (A e C) 92
EFe5 94
EFeCr 94
EFeMn 94
- ENi 96
ENi-CI 93
ENi-CI-A 93
ENiCr 95
ENiCrFe-1 97
ENiCrFe-2 97
ENiCrFe-3 97
ENiCrFe-4 97
ENiCrMo 97
ENiCu 93, 96
ENiFe-CI-A 93
ENiFeMn-CI 93
ENiMo-1 97
ENiMo-3 97
ENiMo-7 97
 especificações militares 76
- ESt 93
EWC 96
 ferros fundidos 92
 formulações típicas dos revestimentos 78
 hidrogênio difusível 76
 intervalo de corrente 79
 maior tenacidade 76
 curva característica 70
 fabricação 73
 filtros de proteção 71
 grande penetração 78, 106
 gravidade e contato, soldagem por 99
 índice de basicidade 73
 manipulação ("tecimento") 109
 aplicações típicas 110
 pequena penetração 106
 pó de ferro 75
 polaridade 104
 preço e custo 102
 procedimentos de soldagem 111
 seqüência de deposição (filete) 113
 seqüência de deposição (topo) 112
 produtividade, indicadores de 102
 comprimento do cordão de solda 103
 corrente e penetração 103
 diâmetro do eletrodo 105
 posição de soldagem 103
 relação volumétrica do revestimento 102
 rendimento de deposição 102
 taxa de deposição 103
 ressecagem, recomendações para 98
 revestimento ácido 73
 básico 73
 básico/rutilico 75
 celulósico 75
 oxidante 75
 rutilico 75
 umidade do 98
 revestimento, tipos de 73
 revestimentos 72

- revestimentos protetores 93
 aço austenítico ao manganês 94
 aços ferramenta 94
 cobalto, ligas à base de 95
 cobre e suas ligas 95
 eletrodos compósitos 96
 ferro fundido austenítico (Cr) 94
 Ni-Cr-B, ligas de 95
 segurança 71
 seleção do 101
 soldagem com CA 104
 soldagem com CC 104
 tipo de corrente 71
 variáveis de procedimento 107
 ajustáveis primárias 107
 ajustáveis secundárias 108
 pré-selecionadas 107
- eletrodo revestido
 arco elétrico, corte com 398
- Eletrodo Tubular 158
 auto-protégido 159
 características operacionais 163
 consumíveis 160
 consumíveis, classificação AWS 162
 consumível, geometria do 160
 corrente pulsada 159
 curva característica 158
 eficiência de deposição 163
 equipamento 158
 extensão do eletrodo 166
 fluxos, auto-protégido 160
 fluxos, funções dos 160
 fluxos, proteção gasosa 161
 gás de proteção oxidante 161
 modos de transferência 159, 164
 parâmetros de soldagem, efeito dos 165
 procedimentos de soldagem 166
 reações químicas (CO₂) 161
 rolos de alimentação 159
 taxa de deposição 158, 163
 técnicas operacionais 164
 tipo de proteção 159
 variáveis de procedimento 164, 165
 vazão, gás de proteção 162
- Eletroescória 230
 abertura de raiz 238
 consumíveis 234
 consumíveis, classificação AWS 232
 convencional 233
 corrente de soldagem 237
 descontinuidades 241
 distribuição de calor 232
 eletrolise (fluxo) 235
 fator de forma 237
 fluxo 235
 fluxos, características dos 235
 fluxos, composições 236
 juntas para soldagem 231
- número de eletrodos 233
 operação 232
 oscilação do arame 234, 239
 procedimentos de soldagem 239
 rechupe, no metal de solda 230
 taxa de deposição 233
 técnica de soldagem 236
 tensão de soldagem 238
 trinca de solidificação 237
 tubo guia consumível 233
 variáveis do processo 236
 velocidade de soldagem 238
- Eletroescória & Eletrogás
 comparação 231
- Eletrogás 230, 240
 bocais, tipos de 240
 consumíveis, classificação AWS 232
 descontinuidades 241
 estabilidade do arco 240
 gás de proteção 240
 juntas para soldagem 231
 operação 240
- elétrons, energia térmica dos 25
 emissão fluorescente de energia 288
 emissividade, do arco elétrico 26
- En**
 esforço por unidade de produção 410
- energia de soldagem 41
 equação da 6
 feixe de elétrons 305
 fricção 283
 rendimento térmico 41
- energia elétrica
 custos da soldagem 418
- energia livre (de Gibbs) 37
 energia livre de superfície 37
 energia livre, de superfície
 brasagem 331
- energia livre, interfacial
 brasagem 331
- energia transferida
 Plasma 221
- equipamento
 custos da soldagem 418
- espaçamento entre os pontos
 resistência elétrica 257
- espectro eletromagnético 289
- espessura crítica da face
 eletrodo 256
- estado quântico 290
- estrias
 corte térmico, processos de 372
- eutético 330
- EXCIMER, LASER 394
- extensão do eletrodo
 MIG 209
- F**
- F**
 comprimento focal 303
 fator de segurança, Brasagem 357
 folga entre as superfícies 333
- frequência 351
 frequência do pulso 49
 ponto de fusão 248
 taxa de fusão 210
 taxa de fusão do arame 415
- f**
 fator de utilização da potência disponível 389
 frequência 290
 frequência de resposta da fonte 47
- Fa**
 curva característica do arco 44
 função trabalho anódica 49
 falta de fusão e penetração 241
 fases, equilíbrio de
 brasagem 332
 fator de compressibilidade gases 425
 fator de forma
 eletroescória 237
 fator de operação 412
 fator de potência 66
 fator tecnológico 418
 economia da soldagem 419
 efeito sobre o custo do trabalho 419
 fatores de operação diferentes métodos 416
 Feigenbaum, A. F. 402
- Feixe de Elétrons**
 alto vácuo 308
 ambiente 308
 ângulo de abertura do feixe 303
 densidade de potência 302
 dificuldades de operação 301
 elétrons, energia cinética dos 301
 elétrons, geração dos 303
 energia de soldagem 305
 equipamento e controle 307
 formação da solda 304
 keyhole, efeito 306
 materiais soldáveis 310
 médio vácuo 308
 MIG e TIG, comparação com 301
 oscilação do feixe 309
 penetração
 efeito da atmosfera 309
 efeito da velocidade de soldagem 309
 penetração (solda) 304
 potência, do feixe 302
 princípios 301
 procedimentos de soldagem 311
 soldagem por 300
 variantes do processo 309
- ferrita delta 81
 ferro fundido austenítico de alto cromo 94
 ferros fundidos
 consumível indicado 92
- Ff**
 curva característica da fonte 44
- filete, junta em 21

- filmes superficiais não-metálicos
dissipação de 5
- filtros recomendados (AWS) 434
- fluxômetro 422
- fluxos
ácido bórico, com
brasagem 345
- borax, com
brasagem 345
- brasagem 344
- fluoretos, com
brasagem 345
- fluoretos e cloretos, com
brasagem 345
- oxicorte 378
- oxigás 325
- fluxos, características dos
eletroescória 235
- fluxos, composições
eletroescória 236
- folga
brasagem 333
- tamanho da 358
- variação da (efeito térmico) 359
- fonte de potência
ciclo de trabalho 52
- classificação NEMA 52
- com moderna tecnologia 60
- controle transistorizado 60
- equilíbrio da rede 53
- ligação trifásica em delta 53
- máquina rotativa 51
- MIG com baixa frequência 63
- retificadores 55
- seleção, fatores gerais 64
- sistema inversor 60, 61
- transformador 52
- fonte de potência convencional
características e seleção 65
- curvas características 44
- fótons 290
- Fouche, E. 3, 314
- Fricção
características básicas 281
- convencional
linhas de fluxo 282
- inércia
energia de soldagem 283
- energia do volante 283
- linhas de escoamento 283
- parâmetros 282
- pressão axial 283
- velocidade periférica 283
- inércia x convencional, compa-
ração 284
- juntas, tipos de 284
- limitações, da soldagem por
280
- materiais, tipos 285
- método linear 284
- procedimentos de soldagem
284, 285
- soldagem por 280
- convencional 281
- inércia 282
- vantagens, da soldagem por
280
- Fulagar, HMS 3
- fumos e substâncias tóxicas 429
- G**
- G**
energia livre da fase 331
- fator geométrico 303
- Gage, Robert M. 4
- garganta, definição 20
- garganta, profundidade da
resistência elétrica 253
- gás
consumo específico 414
- gás de orifício
Plasma 223
- gás de proteção
misturas binárias, ou ternárias
206
- tenacidade do metal de solda
206
- gás natural
oxicorte 380
- oxigás 316
- gaseificação
MIG 205
- gases
controle da pressão e vazão
422
- LASER, corte com 394
- oxicorte 379
- plasma, corte com 389
- pressão e vazão 382
- gases combustíveis
características 316
- gases, toxicidade 428
- gerador
alternador 56
- bobina de campo 56
- campo rotativo 56
- geradores, de acetileno 320
- precauções no uso 321
- globular
transferência do metal, modo de
198
- goivagem
arco elétrico, corte com 397
- Goldschmidt, Hans 3
- Gordon, P. 288
- gota sésil
brasagem 332
- gráficos de produção econômica
408
- break-even point 408
- ponto de equilíbrio 408
- H**
- H**
altura de um líquido,
capilaridade 333
- h**
constante de Planck 290
- penetração feixe (de elétrons)
305
- hidrogênio. *Veja* trinca: induzida
pelo hidrogênio
- modelo para o átomo de 290
- oxicorte 380
- oxigás 316
- plasma, corte com 389
- hidrogênio difusível 99
- Hobart, Henry M. 3
- Holslag, C. J. 3
- Hopkins, Robert K. 4
- I**
- i**
corrente num dado instante 48
- 1ª Guerra Mundial 3
- Ib**
corrente base 49, 201
- Ic**
intensidade de combustão 316
- ignição, temperatura de
oxicorte 374
- IIW
níveis de hidrogênio 99
- Im**
corrente média 49, 201
- impedância 44, 252
- inclinação, tolerância de
oxicorte 386
- plasma, corte com 392
- inclusões 241
- índice de basicidade 73
- arco submerso 140
- indutância
MIG 198
- inflação 410
- inflamação, temperatura de 318
- innershield 4
- intensidade de combustão
oxigás 316
- inter-passe
temperatura de 21
- interações metalúrgicas
brasagem 334
- International Institute of Welding
nível de hidrogênio 99
- inversor, sistema 61
- investimento de capital
custos 404
- Io**
corrente de curto circuito 44
- Ip**
corrente de pico 49, 201
- corrente, no ponto de operação
46
- J**
- jdensidade de corrente 302
- jateamento, eficiência do
pulverização térmica 368
- jato de plasma 26
- Joule, efeito 25
- junta, Brasagem
comprimento de sobreposição
357
- projeto 354
- propriedades mecânicas 354
- tipos 355
- junta soldada

- camadas 18
cordão 18
garganta 20
inter-passe, temperatura de 21
passes 18
perna 20
pós-aquecimento 21
pré-aquecimento 21
tamanho 20
tipo
 ângulo (filete) 21
 topo 21
zonas 20
 fundida, não misturada 20
 fundida, parcialmente 20
 interface 20
 metal base inalterado 21
 metal de solda 20
 zona afetada pelo calor 20
- juntas
 definição 18
 tipos básicos 18
- juntas, soldagem
 por eletroescória 231
 por eletrogás 231
- Juran, J. M. 402
- K**
- K (1, 2...)
 constante para um dado material 49
- Kennedy, Harry E. 4
- keyhole. *Veja* LASER: modo de soldagem: furo controlado; Plasma: modo de soldagem: furo controlado
- Kjellberg, O. 3, 70
- Krieweth, Wolfgang 4
- L**
- L
 comprimento de sobreposição 357
 comprimento do arco 44
 distância entre os centros dos pontos 257
 indutância 48
- Landis, George G. 4
- Langmuir, I. 3, 220
- Langstroth, C. B. 3
- largura de sobreposição das chapas 258
- LASER 4
 aplicações 296
 componentes básicos 288
 densidade de potência 296
 dimensão característica 296
 equipamentos 292
 feixe de energia 294
 foco e densidade de potência 296
 furo controlado 295
 juntas, tolerância dimensional 298
 modo fundamental 295
 Nd:YAG 291
- penetração do feixe 298
plasma, formação de 294
princípios 289
procedimentos de soldagem 298
qualidade e polaridade 295
seleção da densidade de potência 297
soldagem por 288
tipo EXCIMER 294
tipo gás 293
 fluxo lento e axial 293
 fluxo rápido e axial 293
 fluxo transversal 293
tipo sólido 292
 contínuo 292
 pulsado 292
- LASER, Corte com 393. *Veja também* LASER
 aderência de material 396
 aplicações 395
 condições 396
 DIN 2310 396
 estado sólido, tipo 393
 EXCIMER 394
 gás, tipo 394
 gases empregados 394
 keyhole 393
 rasgo, largura do 396
 refletividade 394
 rugosidade da superfície 396
 variáveis do material 395
 variáveis do processo 395
- Lavoisier, experiência de oxicorte 374
- Le
 calor latente de ebulição 389
- Le Chatelier, H. 3, 314
- Lf
 calor latente de fusão 389
- linhas do "liquidus" e do "solidus" 2
- liquidus, linha do 330
- Ll
 lucro líquido 409
- Lyubavskii, K. V. 4
- M**
- M
 massa do volante 284
 permeabilidade magnética relativa 351
 taxa de fusão do arame 47
- maçaricos
 oxicorte 376
 oxigás 322
- MAG 194
- MAGCI
 MIG 214
- Maiman, T. H. 4, 288
- manutenção do equipamento
 custos da soldagem 418
- MAP
 oxicorte 380
 oxigás 316
- Marshall
 queimador do tipo, Brasagem 350
- MASER. *Veja* LASER
- massa de metal de solda fundido 41
- massa específica 416
- massa total fundida 42
- materiais e aplicações
 pulverização térmica 369
- matrizes e eletrodos
 centelhamento 271
- me
 massa do elétron 301
- MEL 429
 maximum exposure limits 429
- Meredith, Russel 4
- metais e seus compostos
 toxicidade, sintomas provocados 430
- metal de adição
 brasagem 337
- metal de solda
 seção transversal, cálculo 417
 seção transversal, equações 417
- metal de solda a ser depositado
 equação para estimativa 418
- metalização. *Veja* Pulverização Térmica
- microeletrônica 56
- Microplasma 226
- MIG 194
 arame, intervalo de corrente 211
 arame, seleção do 208
 arco curto 197
 arco, estabilidade do 208
 transferência de gotas 209
 auto-ajustagem do arco 194
 carburização 205
 chanfro-estreito 214
 classificação AWS
 aços ao carbono 208
 consumo específico de gás 210
 corrente crítica de transição 200
 corrente média 201
 corrente pulsada 200
 curva característica 194
 descarburização (gaseificação) 205
 eficiência de transferência 206
 eletrodo. *Veja* MIG: arame equipamento 194
 estágios na formação da gota 200
 extensão do eletrodo 209
 frequência de transferência das gotas 206
 gás de proteção 202
 classificação do IIW 203
 recomendações 204
 gás de proteção, vazão do 207
 gás inerte 202
 gás neutro 203
 gás oxidante 204
 gás redutor 204

- indutância 198
 MAGCI 214
 modos de transferência 197
 oscilação mecânica da tocha 214
 parâmetros de soldagem 211
 Plasma-MIG 214
 ponto 215
 potencial de carbono 205
 potencial de oxidação 205
 procedimentos de soldagem 215
 aços ao carbono e baixa liga 216
 aços inoxidáveis 217
 alumínio e suas ligas 217
 cobre e suas ligas 218
 reação de gaseificação 205
 relação entre I_p e t_p 201
 sistemas de alimentação 195
 taxa de deposição 209
 taxa de fusão 209
 tecimento 213
 transferência axial por corrente pulsada 200
 transferência globular 198
 transferência por aerossol 199
 transferência por curto-circuito 197
 transferência por gotas repelidas e projetadas 199
 variáveis de procedimento
 ajustáveis primárias 211
 ajustáveis secundárias 212
 velocidade de alimentação 209
 MIG pulsado de baixa frequência 63
 MIG/MAG de alto desempenho 62
 mina de ouro
 qualidade 402
 modernas fonte de potência
 evolução 60
 modernas fonte de potência
 características e seleção 65
 modernas fontes de potência
 desempenho 63
 modos de transferência 40. *Veja*
 transferência do metal, modo de
 Moissan, H. 3
 molhamento
 brasagem 330, 331
 monocristais 56, 57
 MPT 429
 Muller, A. 4
N
 N
 número de espiras 253
 número de unidades produzidas 409
 n
 número de eletrodos (eletroescória) 234
 narrow gap
 arco submerso. *Veja* chanfro estreito: arco submerso
 MIG. *Veja* chanfro estreito: MIG
 navio soldado
 primeiro 3
 NEMA 52
 NIOSH 429
 níquel, ligas de
 consumível indicado 96
 níquel, soldagem do
 resistência elétrica 250
 níquel-cromo-boro, ligas de 95
 nitreto de silício 439
 nitrogênio
 plasma, corte com 390
 Nobel, P.O. 3
 Novoshilov, N. M. 4
 Np
 número de espiras 53
 Ns
 número de espiras 53
 número de
 ferrita WRC 81
 Peclet 25
 Prandtl 26
 Reynolds 26, 33, 178
 Wall 139
 números quânticos 290
O
 OES 429
 occupational exposure standard 429
 Olszewski, Stanislaus 3
 onda eletromagnética 289
 orifício de constrição
 plasma 224
 oscilação do eletrodo 234
 eletroescória 233
 OSHA 429
 overhead
 custos da soldagem 418
 Oxicorte
 acetileno 380
 bicos 377
 chama de pré-aquecimento 379
 chanfros, corte de 385
 chapa ou arame de sacrifício 378
 chapas empilhadas 384
 ciclo térmico 381
 condições para aços ao carbono 383
 defeitos 387
 DIN 2310 386
 elementos de liga, efeito 381
 equipamento 375
 fatores metalúrgicos 380
 fluxo, adição de 378
 gás natural 380
 gases 379
 gases, pressão e vazão 382
 hidrogênio 380
 inclinação da tocha 384
 maçarico, oscilação do 378
 maçaricos 376
 MAP 380
 material base 381
 mecanizado 383
 métodos auxiliares 378
 operação, seqüência geral de 374
 oxigênio 379
 oxigênio de corte, pré-aquecimento 384
 oxigênio de corte, pureza 379
 oxigênio, "lança" de 378
 oxigênio, vazão 378
 pó metálico, adição de 378
 pré-aquecimento da peça 384
 princípios 374
 propano 380
 qualidade do corte 386
 paralelismo e tolerância de inclinação 386
 tolerância de rugosidade 386
 reações oxigênio/ferro 375
 supe-aquecimento, técnica do 383
 técnicas e aplicações 382
 temperatura de ignição 374
 tochas em seqüência, corte com 385
 velocidade de corte 382
 Oxigás
 calor de combustão 315
 chama, regiões 318
 chama, tipos 319
 equipamento e acessórios 319
 fluxos 325
 gases para a soldagem 314
 características 316
 precauções no uso 320
 geradores, de acetileno 320
 maçaricos 322
 maçaricos, tipos 322
 mangueiras, convenção de cor 322
 manômetros 321
 materiais - técnicas de soldagem 326
 pressão de trabalho 325
 procedimentos de soldagem 323
 razão de combustão 315
 soldagem, condições gerais de 325
 soldagem por 314
 taxa de propagação 315
 técnicas operacionais 323
 temperatura da chama 315
 vazão dos gases 325
 oxigênio
 oxicorte 379
 oxigás 316, 320
P
 P
 ponto de operação 44
 potência elétrica 252
 paralelismo
 oxicorte 386
 plasma, corte com 392
 parâmetros
 plasma, corte com 389, 391
 parâmetros de soldagem 20, 41

- MIG 211
- partículas, tamanho das
- pulverização térmica 363
- passes
- definição 18
- Patel, C. K. N. 291
- Patton, D. M. 4
- Pauleka, V. H. 4
- Pauli, W. 290
- PC
- potencial de carbono 205
- Peclet, número de 25
- PEL 429
- PEL - Permissible Exposure Limits 429
- penetração 103
- perna 20
- Picard, Ch. 3, 314
- pinch, efeito 39
- Plank, M. 290
- Plasma 220
- arco não-transferido 220
- arco piloto 222
- arco transferido 220
- balanço energético 221
- calor, distribuição de 221
- construção do arco 220
- corrente de soldagem 223
- diâmetro do orifício 224
- eficiência de fusão 221
- eletrodo 224
- equipamento 220, 222
- furo controlado 223
- gás de orifício, vazão 223
- gases 225
- orifício de construção 224
- procedimentos de soldagem 226
- quedas de potencial 221
- técnicas e variantes 226
- tipos de 220
- tochas 220
- tolerâncias: parâmetros e junta 226
- vantagens sobre o TIG 222
- variáveis de controle 223
- velocidade de soldagem 223
- Plasma, Corte com 388. *Veja também* Plasma
- ar 390
- argônio 390
- condições 392
- DIN 2310 392
- equilíbrio energético 389
- equipamento 388
- hidrogênio 389
- nitrogênio 390
- parâmetros 391
- parâmetros e gases 389
- qualidade 391
- paralelismo e tolerância de inclinação 392
- tolerância de rugosidade 393
- quantidade de calor para fusão 389
- ruido 391
- técnica e aplicações 390
- vapor d'água 390
- velocidade de corte
- cálculo da 389
- versus espessura da peça 391
- plasma, corte com ar 390
- Plasma Transferred Arc - PTA 367
- Plasma-MIG 226
- Plásticos
- meio ambiente 436
- soldagem dos 436
- Plásticos Estabilizados 436
- PO
- potencial de oxidação 206
- pó de ferro
- arco submerso 145
- eletrodo revestido 75
- pó metálico
- oxicorte 378
- poça (de fusão) 5
- poça de escória líquida
- Eletroescória 238
- poça de fusão
- corrente, efeito da
- eletroescória 237
- tensão, efeito da
- eletroescória 238
- Polímeros
- soldagem dos. *Veja* Plásticos: soldagem dos
- pontes
- Centelhamento 270
- ponto
- soldagem por resistência elétrica 244
- ponto de operação 44
- ponto de orvalho
- brasagem 347
- ponto, dimensionamento do
- resistência elétrica 257
- pontos catódicos 25
- porosidade 241
- porta eletrodo 71
- pós-aquecimento 21
- posições de soldagem 21, 103
- potência
- aparente 66
- componente reativo 66
- útil 66
- potência de soldagem
- densidades típicas 222
- potencial de
- carbono, MIG 205
- ionização, gases 30
- ionização, vapores metálicos 30
- oxidação, MIG 205, 206
- Prandtl, número de 26
- pré-aquecimento 21
- oxicorte 379, 384
- oxigênio de corte 384
- pressão axial 283
- pressão, reguladores da
- gases 422
- princípio da exclusão
- Pauli, W. 290
- Procedimentos de Soldagem
- Arco Submerso 151
- Centelhamento 275
- Eletrodo Revestido 111
- Eletrodos Tubulares 166
- Eletroescória 239
- Feixe de Elétrons 311
- Fricção 284, 285
- LASER 298
- MIG 215
- Oxigás 323
- Plasma 226
- Resistência Elétrica
- ponto, soldagem por 258
- TIG 184
- processo/atmosfera, correlação 6
- processos de união
- requisitos mínimos 5
- Processos de União e Corte
- descrição sumária 10
- relação dos 6
- Processos, descrição sumária
- Brasagem 15
- Chama 16
- Difusão 16
- Forno 16
- Imersão 16
- Indução Elétrica 16
- Infravermelho 16
- Resistência Elétrica 16
- Corte Térmico 16
- Arco Elétrico 16
- Arco Elétrico: Carbono/Grafita 16
- Arco Elétrico: Carbono/Grafita e Ar Comprimido 17
- Arco Elétrico: Eletrodo (Tubo) e Oxigênio 17
- Arco Elétrico: Eletrodo Revestido e Nu 17
- Arco Elétrico: Lança (com Oxigênio) 17
- Arco Elétrico: Plasma 17
- Chama 17
- Erosão por Faiscamento 16
- LASER e Feixe de Elétrons 16
- Pulverização Térmica 17
- Arco Elétrico 17
- Chama 17
- Detonação 17
- Solda Branda 16
- Soldagem em Fase Sólida 10
- Difusão 11
- Explosão 11
- Forjamento 10
- Fricção 11
- Pressão a frio 10
- Pressão a quente 10
- Ultra-Som 11
- Soldagem por Arco Elétrico 14
- Arco Submerso 15
- Eletrodo Revestido 14
- Eletrodo Tubular 15
- Eletrogás 15
- Magneticamente Impelido 14
- MIG/MAG 15
- Plasma 15
- Prisioneiro 14

- TIG 15
- Soldagem por Energia Radiante 13
- Feixe de Elétrons 13
- Imagem da Fonte de Energia 14
- LASER 13
- Soldagem por Resistência Elétrica 12
- Centelhamento 13
- Costura 12
- Eletroescória 13
- Ponto 12
- Projeção 13
- Soldagem Termoquímica 11
- Aluminotermia 12
- Hidrogênio Atômico 12
- Oxigás 12
- produtividade
- economia da soldagem 402
- produtividade, indicadores de eletrodo revestido 102
- profundidade da poça
- Eletroescória 238
- projeção, soldagem por resistência elétrica 264
- propano
- oxicorte 380
- proteção, equipamentos de 433
- Pulverização Térmica 362
- arco elétrico, por 366
- taxa de deposição 367
- chama, por 364
- consumíveis, tipos de 364
- taxa de deposição 365
- combustão contínua, por 366
- partículas, temperatura das 366
- partículas, velocidade das 366
- taxa de deposição 366
- detonação, por 366
- partículas, temperatura das 366
- partículas, velocidade das 366
- etapas do processo 362
- materiais e aplicações 369
- cerâmicos 370
- cermet 370
- compósitos 370
- compostos intermetálicos 370
- ligas metálicas 370
- metais puros 369
- polímeros 370
- material de adição, formas do 362
- método, seleção do 364
- objetivos principais 362
- plasma, por 367
- revestimento
- densidade do depósito 363
- rugosidade da superfície 363
- tamanho da partículas 363
- tempo de residência da partículas 363
- substrato, preparação do 367
- jateamento abrasivo 368
- macro rugosidade 369
- revestimento intermediário 369
- Q**
- Q**
- energia para a fusão
- resistência elétrica 245
- qualidade
- economia da soldagem 402
- LASER, corte com 396
- plasma, corte com 391
- valor agregado pela 403
- qualidade do corte térmico
- quantificação da 372
- quanta 290
- quantum 290
- Questões 448
- R**
- R**
- resistência elétrica 44, 245, 253
- velocidade de rotação do volante 284
- r**
- fator de ondulação 55
- rendimento térmico 245
- resistividade 49
- resistividade elétrica 248
- radiação 433
- raios-X 300
- rasgo, largura do
- corte térmico, processos de 373
- LASER, corte com 396
- razão de combustão
- oxigás 315
- reação de gaseificação 205
- reatância indutiva 44
- reator saturável de auto-saturação 54
- recalque
- centelhamento 270
- rechupe
- eletroescória 241
- Referências Bibliográficas 442
- refletividade
- LASER, corte com 394
- relação volumétrica do revestimento 102
- rendimento de deposição 412
- eletrodo revestido 102
- rendimento do fluxo 413
- rendimento térmico 42
- reparos das soldas defeituosas
- Custos da Soldagem 419
- residência da partícula, tempo de pulverização térmica 363
- resistência ao forjamento
- Centelhamento 270
- Resistência Elétrica
- ciclo de soldagem 247
- ciclo de trabalho 252
- controle, dispositivos 253
- síncronos 255
- costura, soldagem por 265
- condições de soldagem 267
- corrente alternada 266
- corrente pulsada 266
- variantes 266
- eletrodos, materiais para 251
- equipamento
- garganta, profundidade da 253
- mono-fásico 253
- tri-fásico 253
- equipamentos 252
- materiais, efeito da soldagem 249
- métodos de soldagem 244
- ponto, distribuição da temperatura 245
- ponto, resistências elétricas 245
- ponto, solda 244
- ponto, soldagem por 255
- direta 256
- eletrodo, geometria do 255
- eletrodos, força máxima 256
- indireta 256
- paralelo 257
- ponto, dimensionamento do 257
- pontos, distribuição dos 257
- procedimentos de soldagem 258
- série 257
- projeção, soldagem por 264
- condições de soldagem 265
- eletrodos, geometria dos 264
- rendimento térmico
- tempo, influência do 245
- soldabilidade 248
- soldagem por 244
- variáveis de operação 245
- ciclo de soldagem 247
- corrente 246
- corrente, densidade de 245
- corrente, taxa de aplicação 247
- força dos eletrodos 246
- forjamento 248
- fusão, energia para 245
- pós-aquecimento 248
- superaquecimento dos eletrodos 247
- superfícies, acabamento das 246, 248
- superfícies recobertas 248
- tempo 246
- ressecagem, eletrodo revestido 98
- retificação em ponte 55
- retificador
- eficiência da retificação 55
- fator de ondulação 55
- Retorno do Capital
- estimativa
- acuracidade 405

- retorno do capital
 estimativa 405
 retro-alimentação "inteligente" 63
 revestimento básico 4
 revestimento intermediário
 pulverização térmica 369
 revestimentos dos eletrodos
 funções 72
 tipos 73
 revestimentos protetores ao
 desgaste
 eletrodo revestido 93
 Reynolds, número de 26, 33, 178
 Richardson-Dushman
 equação de 24
 Robiniff, B. S. 3
 rotâmetro 422
 Rs
 brilho do feixe (de elétrons) 305
 rubi
 LASER 288
 rugosidade, macro-
 pulverização térmica 369
 rugosidade média
 LASER, corte com 396
 rugosidade, tolerância de
 oxicorte 386
 plasma, corte com 393
 ruído 432
 plasma, corte com 391
 RWMA, Classificação
 eletrodos, resistência elétrica
 251
- S**
 S
 largura de sobreposição das
 chapas 258
 soldabilidade 248
 s
 comprimento do eletrodo após o
 bico de contato 49
 Saha, equação de 30
 sangramento, técnica do
 oxicorte 383
 saúde, organismos padronizadores
 429
 saúde, padrões de exposição 429
 Schawlow, A. L. 288
 Schoop, M. U. 362
 Scott, configuração tipo 147
 Scott, S. S. 4
 SCR 57
 SCS 58
 semi-condutores 56
 short arc. *Veja* curto-circuito:
 transferência do metal, modo
 de; MIG: arco curto
 sinergia 48
 sistema inversor 61
 tipo PWM 61
 tipo ressonante 62
 Slavianoff, N. G. 3
 Solda 2
 definição 4
 Solda Branda 2
- Solda-Brasagem 328
 soldabilidade, índice de
 resistência elétrica 248
 Soldagem
 a arco com eletrodo revestido
 70. *Veja* Eletrodo Revestido
 a arco com eletrodo
 tubular. *Veja* Eletrodo Tubular
 custos da 402
 dos plásticos 436
 dos termoplásticos 436
 MIG. *Veja* MIG
 por arco submerso 136. *Veja*
 Arco Submerso
 por Centelhamento. *Veja*
 Centelhamento
 por Costura. *Veja* Resistência
 Elétrica: costura, soldagem
 por
 por eletrodo tubular 158
 por Electroescória. *Veja*
 Electroescória
 por Eletrogás. *Veja* Eletrogás
 por Feixe de Elétrons. *Veja*
 Feixe de Elétrons
 por Fricção. *Veja* Fricção
 por gravidade e contato 99
 por LASER. *Veja* LASER
 por MIG/MAG 194
 por Oxigás. *Veja* Oxigás
 por Plasma 220. *Veja* Plasma
 por Ponto. *Veja* Resistência
 Elétrica: ponto, soldagem por
 por Projecção. *Veja* Resistência
 Elétrica: projecção, soldagem
 por
 por Resistência Elétrica. *Veja*
 Resistência Elétrica
 por TIG 172
 TIG. *Veja* TIG
 soldagem à direita
 oxigás 324
 soldagem à esquerda
 oxigás 323
 soldagem com grande penetração
 oxigás 324
 Soldagem e Técnicas Conexas
 Descrição sumária dos proces-
 sos 10
 soldagem na vertical
 oxigás 324
 soldagem sobrecabeça
 oxigás 325
 Soldagem Subaquática
 MIG 215
 solidificação
 intervalo de 330
 solidus
 linha do 330
 sopro magnético. *Veja* deflexão
 magnética
 "spelter"
 brasagem 331
 spray. *Veja* aerossol: transferência
 do metal, modo de
 Stohr, J. A. 4
 Strohenger, A. P. 3
- subaquático, corte 399
 substrato, preparação do
 pulverização térmica 368
 superfície, acabamento da
 pulverização térmica 367
 superfície, do corte térmico
 tolerâncias 372
 superfície, eficiência do jateamento
 pulverização térmica 368
 superfície, rugosidade da
 pulverização térmica 363
- T**
 t
 constante de tempo (de um
 circuito) 48
 tempo 47
 Ta
 período de arco aberto 48
 TAA
 tempo de arco aberto 52
 tamanho da junta
 definição 20
 taxa
 de deposição 233, 413
 de geração dos fumos 430
 Eletrodo Revestido 430
 MAG 431
 de propagação (da chama) 315
 taxa de deposição
 eletrodo revestido 103
 MIG 209
 taxa de fusão 42
 MIG 209
 tb
 duração da corrente base 201
 tempo (de atuação) da corrente
 base 49
 Tc
 período de curto-circuito 48
 tecimento
 eletrodo revestido 109
 MIG 213
 técnicas de soldagem
 MIG 213
 temperatura da chama
 oxigás 315
 tensão de circuito aberto 44
 tensão do arco, equação 29
 tensões térmicas
 brasagem 356
 térmico, efeito
 variação da folga, Brasagem
 359
 Termoplásticos 436
 propriedades 436
 soldagem dos 436
 Tesla, N. 300
 Thompson, Elihu 3
 TIG 172
 acessórios e controle 176
 arame quente 181
 arco, bobina magnética 181
 arco, deflexão magnética 182
 arco elétrico, corte com 398
 arco, início do 179

- arco, oscilação do 182
 bocais 178
 calor, distribuição eletrodo/peça 173
 classificação AWS
 eletrodos, tipos 174
 com pulsos mistos de corrente 63
 corrente, desequilíbrio da onda 173
 corrente, intervalos de 175
 corrente pulsada 182
 efetiva 183
 energia de soldagem 183
 média 183
 curva característica 172
 difusor ("lente") 179
 efeito térmico de constrição 179
 eficiência térmica 173
 eletrodos, classificação AWS
 EWCE-2 174
 EWG 175
 EWLa-1 174
 EWP 174
 EWth 174
 EWZr-1 174
 eletrodos, geometria da ponta 175
 equipamento 172
 estabilidade do arco 176
 gás de proteção 177
 metais reativos 177
 vazão 178
 velocidade crítica 178
 oscilação do consumível 181
 penetração 173
 polaridades do eletrodo 173
 ponto 182
 problemas operacionais 190
 procedimentos de soldagem 184
 aços ao carbono e baixa liga 184
 aços inoxidáveis 184
 alumínio e suas ligas 185
 arame frio 188
 arame quente 188
 cobre e suas ligas 184
 corrente pulsada 188
 titânio e suas ligas 185
 pulso composto de corrente 183
 taxa de deposição 172
 técnicas operacionais 179
 tiristor 57
 interruptor controlado de silício 58
 retificador controlado de silício 57
 SCR 57
 SCS 58
 triac 57
 TLV - Threshold Limit Values 429
 topo, junta a 21
 Townes, C. H. 288
- tp
 duração da corrente de pico 201
 tempo (de atuação) da corrente de pico 49
 trabalho, custo do
 efeito do fator tecnológico 419
 transferência do metal
 modos de 40
 pressão ambiente. efeito da 40
 transferência do metal, modo de 37
 aerossol 199
 corrente pulsada 49
 curto-circuito, frequência de 198
 efeito motor 39
 equilíbrio das forças estáticas 38
 evolução de gases 39
 força de arraste 38
 força devido à aceleração da gravidade 38
 força devido à tensão superficial 39
 força eletromagnética 39
 globular 198
 gotas repelidas e projetadas 199
 jato de plasma 39
 MIG 197
 pressão sobre pontos catódicos 39
 tensão superficial 37
 teoria da instabilidade 39
 teorias 38
 zona de operação ótima 199
 transformador 52
 bobina móvel 53
 derivação móvel 54
 reator de núcleo móvel 54
 reator saturável 54
 resistência variável 55
 transistor 58
 BJT 58
 IGBT 59
 MOSFET 59
 transistores 4
 transistores de potência 4
 triac 57
 trinca
 de solidificação 81
 induzida pelo hidrogênio 98
 trinca de solidificação
 defeito, Eletroescória 237
 trincas 241
 TTS
 tempo total de soldagem 52
 tulipa, chanfro tipo
 parâmetros, oxicorte 385
- U
 U
 tensão 301
 tensão - fonte de potência 44
- Ua
 queda de potencial anódica 49
 Uc
 queda de potencial catódica 49
 Ucc
 tensão retificada (CC) 55
 União dos Cerâmicos 439
 União dos Materiais
 considerada a nível atômico 5
 Cronologia 2
 Grupos de Processos 2
 Brasagem 2
 Solda 2
 Solda Branda 2
 Uo
 tensão de circuito aberto 44, 49
 Up
 tensão na bobina primária (transformador) 53
 tensão, no ponto de operação 46
 "upset"
 centelhamento 270
 Urms
 tensão eficaz (CA) 55
 Us
 tensão na bobina secundária (transformador) 53
 Ut
 amplitude total do sinal retificado 55
- V
 V
 vazão do gás 210
 volume da gota 201
 volume da gota destacada 49
 vácuo, nível de
 feixe de elétrons 300
 valência 57
 válvula 58
 vapor d'água
 plasma, corte com 390
 variáveis de procedimento
 fixas 211
 MIG 211
 vazão do gás de proteção
 MIG 207
 Vc
 taxa de propagação 316
 valor contábil 407
 velocidade de combustão 316
 velocidade de combustão
 oxigás 315
 velocidade de corte
 plasma, corte com 389
 velocidade do corte
 oxicorte 382
 velocidade periférica da peça 283
 Volta, Alessandro 3
 von Linde, C. 3, 314
 von Pirani, M. 300
 von Röntgen, W. K. 300

470 Soldagem & Técnicas Conexas: Processos

Vs
velocidade de soldagem
(eletroescória) 238

W

W
velocidade de alimentação do
arame 201

Wa
taxa de alimentação do arame 238
velocidade de alimentação do
arame 47

Wall
número de 139

Wb
velocidade de alimentação
(corrente base) 49

Wp
velocidade de alimentação
(corrente de pico) 49
Wunder, G.G. 3

X

X
reatância 253
reatância indutiva 44

Y

Y
raio de giração do sistema 284
Young-Dupré, equação de
brasagem 332

Z

Z
carga espacial do feixe de
elétrons 303
impedância 44, 253
ZAC 20
Zeige, H. J. 288
zircônia 439
zona afetada pelo calor 20

CÓPIA AUTORIZADA PELO AUTOR.
DISTRIBUIÇÃO GRATUITA.
PROIBIDA A COMERCIALIZAÇÃO EM QUALQUER FORMATO.

**ORGANIZAÇÕES
ENVOLVIDAS COM
SOLDAGEM
&
TÉCNICAS CONEXAS**

A seguir estão listadas importantes Organizações envolvidas com Soldagem & Técnicas Conexas, as quais não necessariamente possuem funções, ou atribuições de Normalização.

AA

The Aluminium Association
900 19th St. N.W. - Suite 300
Washington, DC 20006, EUA

ABM

Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais
Rua Antônio Comparato, 218
04605-030 São Paulo - SP, Brasil
FAX: (011) 240-4273

ABNT

Associação Brasileira de Normas Técnicas
Rua Marquês de Itu, 88 - 4^o andar
01223-000 São Paulo - SP, Brasil

ABS

Associação Brasileira de Soldagem
Rua Correia Vasques, 67 - Vila Clementino
04038-010 São Paulo - SP, Brasil
FAX: (011) 571-3881

ABS

American Bureau of Shipping
45 Eisenhower Drive, Parannus, N.J. 07652, EUA

AFNOR

Association Française de Normalisation
Tour Europe, Cedex 7
92080 La Defence, Paris, França

AISC

American Institute of Steel Construction
400 N. Michigan Ave.
Chicago, Illinois 60611, EUA

AISI

American Iron and Steel Institute
1000 6th St., N.W., Washington, DC 20036, EUA

ANSI

American National Standards Institute
1430 Broadway New York
N.Y. 10018, EUA

API

American Petroleum Institute
1220 L. Street, N.W.
Washington, DC 20005, EUA

ASM International

Metals Park, Ohio
OH 44073, EUA

ASME

American Society of Mechanical Engineers
345 East 47th St.
New York, N.Y. 10017, EUA

ASTM

1916 Race St.
Philadelphia, Pennsylvania 19013, EUA

AWS

American Welding Society
550 N.W. LeJeune Rd.
Miami, FL 33126, EUA
FAX: 1-305-443-7559

BS

British Standards Institution
Linford Wood, Milton Keynes
MK 14 6LE, Reino Unido

CENPES/PETROBRÁS

Centro de Pesquisas e Desenvolvimento
Cidade Universitária - Quadra 7 - Ilha do Fundão
21949-900 Rio de Janeiro - RJ, Brasil
FAX: (021) 598-6790

DIN

Deutsches Institut für Normung e.V.
Postfach 1107, Burggrafenstrasse 4-10
D-1000 Berlin 30, Alemanha

DVS

Deutscher Verband für Schweisstechnik
4-Dusseldorf, 172 Aachener Strasse
Postschiessfach 2725, Alemanha

FBTS

Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem
Rua São Francisco Xavier, 601 - 2º andar
20550-011 Rio de Janeiro - RJ, Brasil
FAX: (021) 264-3097

IIW

International Institute of Welding
54 Princes Gates
London SW7 2PG, Reino Unido

IS

Institute de Soudure
32 Boulevard de la Chapelle
75880 Paris, Cedex 18, França

ISO

International Standards Organization
The Central Secretariat, 1 Rue de Varembe
Case Postale 56, CH 1211
Geneva 20, Suíça

JIS

Japanese Standards Association
1-24 Akasaka, 4-chrome Minatu-Ku
Tokyo 107, Japão

JWS/JWES

Japan Welding Society/Japan Welding Engineering Society
1-11 Kanda-Sakuma-Cho
Chiyoda-Ku, Tokyo, Japão

NEMA

National Electrical Manufacturers' Association
2101 L Street, N.W., Washington, DC 20037, EUA

Paton Institute of Electric Welding

Ulitza Gorkogo 69, Kiev, Ucrânia

SAE

400 Commonwealth Drive
Warrendale, Pennsylvania 15096, EUA

TWI

The Welding Institute
Abington Hall, Abington
Cambridge CB1 6AL, Reino Unido

WRC

Welding Research Council
345 East 47th Street, New York
N.Y. 10017, EUA

CÓPIA AUTORIZADA PARA DISTRIBUIÇÃO GRATUITA
PROIBIDA A COMERCIALIZAÇÃO DE QUALQUER FORMA

CONVERSÃO DE UNIDADES USUAIS

COPYRIGHT
PROIBIDA A COMERCIALIZAÇÃO

Para Converter	Em	Multiplicar por
Ampère/polegada ao quadrado	Ampère/centímetro ao quadrado	0,1550
Btu	Joule	1055,056
Btu/hora	Watts	0,2930711
caloria	Joule	4,186800
galão (EUA)	litro	3,785
grain (troy)	grama	0,06480
grain (troy)	grain (avoirdupois)	1,0
HP	Watts	745,7
HP-hora	Joule	2,684 x 10 ⁶
Joule/polegada	Joule/milímetro	0,03937
libra	grama	0,4536
libra (troy)	grama	373,24177
libra	onça	16,0
libra/pé ao cubo	quilograma/metro ao cubo	16,02
libra/polegada ao cubo	grama/centímetro ao cubo	27,68
libra/polegada	grama/centímetro	178,6
libra/pé ao quadrado	atmosfera	4,725 x 10 ⁻⁴
libra/polegada ao quadrado	atmosfera	0,066804
libra/polegada ao quadrado	quilograma/metro ao quadrado	703,1
libra (força)/polegada ao quadrado	Pascal	6,894757 x 10 ³
libra (força)	Newton	4,448222
libra/hora	quilograma/hora	0,4536
milha (náutica)	quilômetro	1,8532
mils	milímetro	2,54 x 10 ⁻²
nó (náutica)	quilômetro/hora	1,8532
pé ao cubo	metro ao cubo	0,02831685
pé ao cubo	litro	28,32
polegada ao cubo	centímetro ao cubo	16,39
polegada ao cubo	litros	0,01639
pé	metro	0,3048
pé/minuto	centímetro/segundo	0,5080
pé/segundo	metro/minuto	18,29
pé-libra	Joule	1,355818
pé ao quadrado	metro ao quadrado	0,09290
pé ao cubo/hora	litro/minuto	0,471948
pint (líquido)	litro	0,2780139
polegada	milímetro	25,4
polegada de mercúrio	atmosfera	0,03342
polegada ao quadrado	centímetro ao quadrado	6,452
polegada/minuto	milímetro/segundo	2,36

Para Converter	Em	Multiplicar por
onça	grama	28,349527
onça (troy)	grama	31,103481
onça (troy)	onça (avoirdupois)	1,09714
radiano	graus	57,30
slug	quilograma	14,59
temperatura Fahrenheit (°F)-32	temperatura Celsius (°C)	5/9
tonelada (longa)	quilograma	1016
tonelada (métrica)	quilograma	1000
tonelada (curta)	quilograma	907,1847
Torr	Pascal	133,322

CÓPIA AUTORIZADA PELO AUTOR.
 DISTRIBUIÇÃO GRATUITA.
 PROIBIDA A COMERCIALIZAÇÃO EM QUALQUER FORMATO.

Esse livro foi formulado para ser útil tanto aos engenheiros e pós-graduados, quanto aos técnicos de grau médio, que lidam com Soldagem e Técnicas Conexas.

Através das suas 477 páginas, 353 figuras e 159 tabelas, são tratados com profundidade os processos de soldagem ao arco elétrico e outros, como aqueles de alta densidade de potência, tais como LASER e Feixe de Elétrons, precedidos por detalhadas conceituações relativas à União dos Materiais, além de examinar atentamente a Economia da Soldagem.

Estão incluídas, também, as Técnicas Conexas mais importantes (entre outras, o Corte Térmico e a Brasagem), com 156 Referências Bibliográficas e 258 Questões versando sobre os assuntos analisados.