

# PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE MOLDES DE INJEÇÃO PARA TERMOPLÁSTICOS

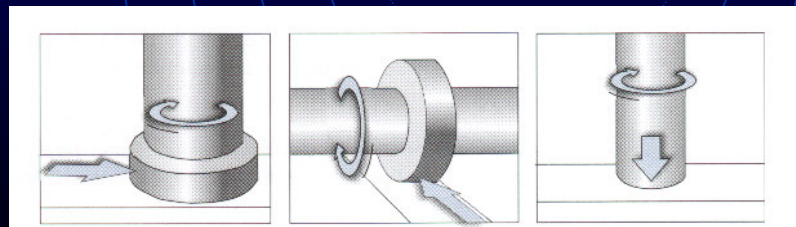
- IFSUL
- Fundamentos de Projetos de Ferramentas
- Prof. Mauro César Rabuski Garcia

# Processos de Fabricação de moldes de injeção para termoplásticos

- Os processos de alteração das formas que no contexto da indústria de moldes têm mais importância, por acrescentarem mais valor, são os processos de remoção de material, com especial ênfase para a **usinagem em geral, eletroerosão e retificação.**

# FRESAGEM

- Numa operação de fresagem, a ferramenta de corte gira em torno de um eixo enquanto a peça se desloca segundo um determinado movimento, linear ou circular. Existe uma coordenação de movimentos entre a ferramenta, com uma ou várias arestas de corte, e a peça a usinar.



# FRESAGEM

- O desenvolvimento a que assistimos nos últimos anos, quer dos aspectos construtivos das máquinas (fresadoras ou centros de usinagem), quer dos comandos CNC e dos sistemas de CAM, quer das ferramentas de corte, permitem a execução de várias operações com uma eficiência e qualidade impensáveis no passado.



# TORNEAMENTO

- É um processo de corte que consiste em gerar formas de revolução com uma ferramenta de uma só aresta de corte, geralmente sem movimento de rotação. O movimento e corte é dado pela rotação da árvore da máquina com movimento simultâneo da ferramenta seguindo uma diretriz definida no mesmo plano do eixo da peça. É um processo que está bastante otimizado, mas requer uma análise exaustiva de determinados fatores para as diferentes aplicações.





# FURAÇÃO

- Furação é o termo utilizado para descrever todos os métodos de execução de furos cilíndricos em peças, usando ferramentas de corte em geral multicortantes. O termo furação serve para designar subsequentes usinagens, tais como **mandrilagem**, **escareamento** e **roscagem** e determinadas formas de acabamento. Em todos estes processos é comum um movimento rotativo principal da ferramenta ou da peça combinado com um movimento de avanço linear, segundo uma diretriz retilínea coincidente com o eixo de rotação.



# USINAGEM HIGH SPEED

- Na indústria de moldes, a essência da usinagem a alta velocidade, consiste em fazer a maior quantidade de movimentos com pequenos passos, em alta velocidade. Esta estratégia funciona em operações de desbaste mas, sobretudo, em operações de acabamento.
- Esta nova tecnologia dá suporte a operações de torneamento, furação, rosqueamento, no entanto, a grande área de aplicação é a fresagem.



# RETIFICAÇÃO

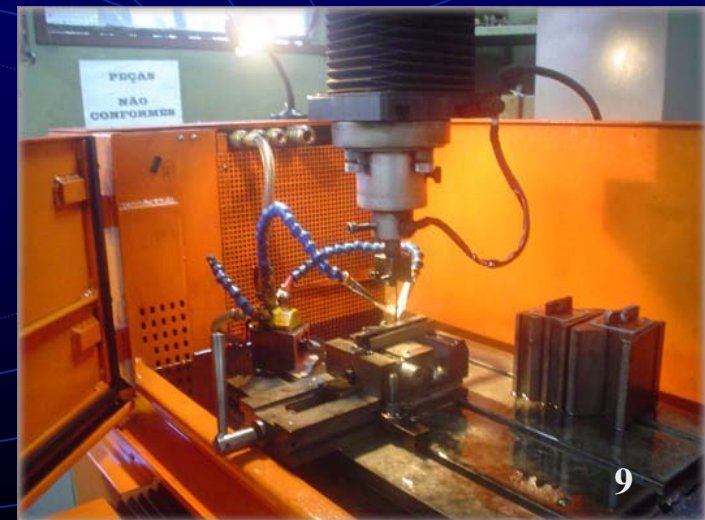
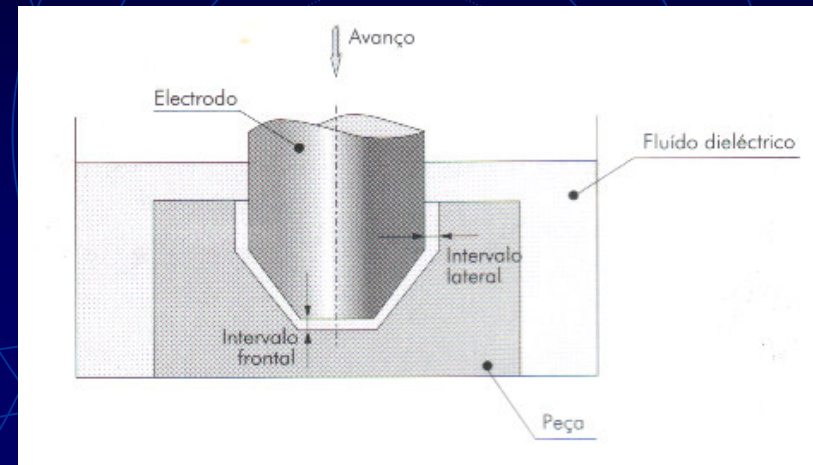
- A retificação é um processo tecnológico em que o material é removido por ação de um rebolo abrasivo. O rebolo permite a remoção de micro cavacos, e conseguem-se bom acabamento superficial e tolerâncias dimensionais pequenas.





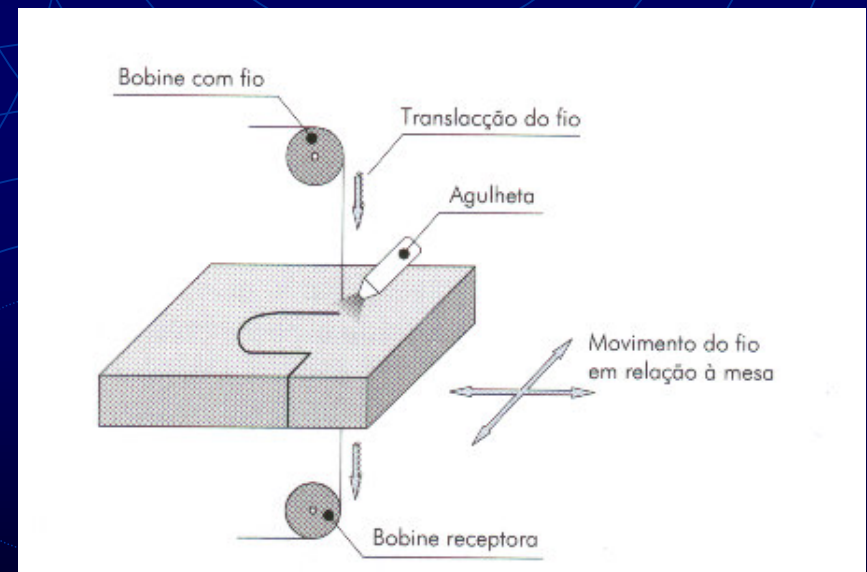
# ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO

- A eletroerosão é um processo de corte que utiliza a energia elétrica para remoção de material da peça. O material é removido por ação de uma sucessão de descargas elétricas entre um eletrodo e a peça que estão imersas num fluido dielétrico.
- A forma do eletrodo é assim reproduzido negativamente na peça à medida que o eletrodo penetra na mesma. Cada descarga gera uma quantidade de energia térmica que provoca a fusão e ebulição dos materiais da peça e do eletrodo.
- Não existe contato entre o eletrodo e a peça que estão distanciadas dum intervalo designado por “gap”.
- Uma das grandes vantagens deste processo tecnológico reside no fato das forças de corte serem nulas. Sendo assim, determinadas características mecânicas do material a erodir, como a dureza, não tem influência no processo.
- Este processo tem grande aplicação no processamento de materiais duros, como o metal duro, materiais endurecidos por tratamento térmico, peças com geometrias complexas e cavidades difíceis de realizar por outro processo e com a vantagem de não deixar rebarbas.



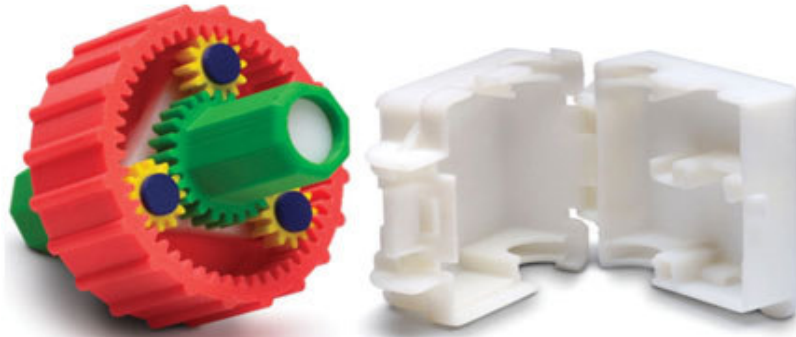
# ELETROEROSÃO A FIO

- É uma técnica complementar do procedimento de usinagem por eletroerosão em que o eletrodo tem a forma de um fio. Em vez de imprimir na peça a forma negativa do eletrodo, as máquinas de eletroerosão por fio utilizam um eletrodo metálico com a forma de um fio.
- A peça a ser cortada é fixa sobre uma mesa em que os deslocamentos relativos do eletrodo fio permitem definir os movimentos em função do contorno a cortar.



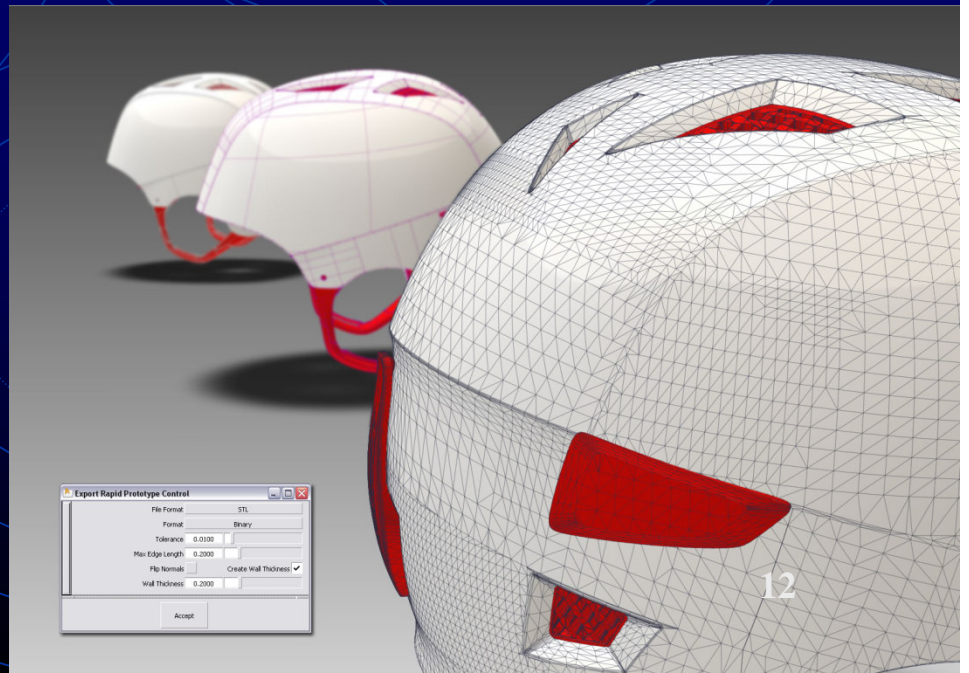






# Prototipagem Rápida

- A PR permite aumentar a eficácia do ciclo de projeto e a qualidade do produto
- Permite a visualização e manipulação dos mesmos em fases iniciais
- Permite a execução de testes funcionais (otimização de geometria, dimensões, ergonomia, montagens e interferências)



# PROTOTIPAGEM RÁPIDA

## ETAPAS

- 1. Modelagem 3D
- 2. Conversão (.STL) e Transmissão de dados
- 3. Verificação e Preparação
- 4. Construção
- Pós-processamento





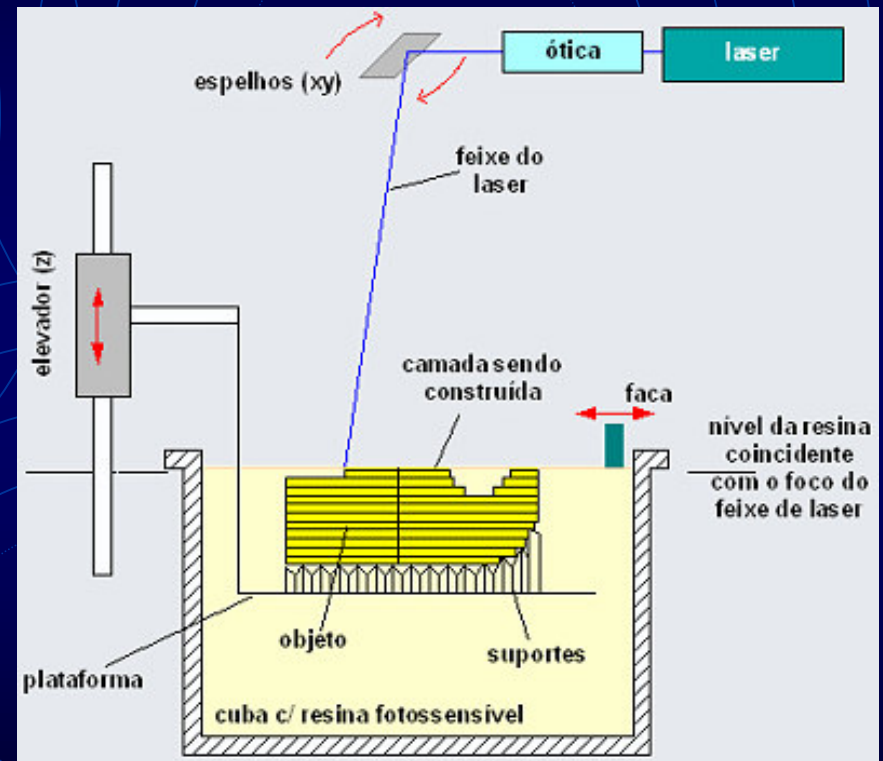
# TÉCNICAS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA

- 1. SL – Estereolitografia
- 2. LOM – Laminated Object Manufacturing
- 3. Selective Laser Sintering
- 4. FDM – Fused Deposition Modeling
- 5. SGC – Solid Ground Curing
- 6. Impressoras 3D (3D Printers – 3DP ou TDP)



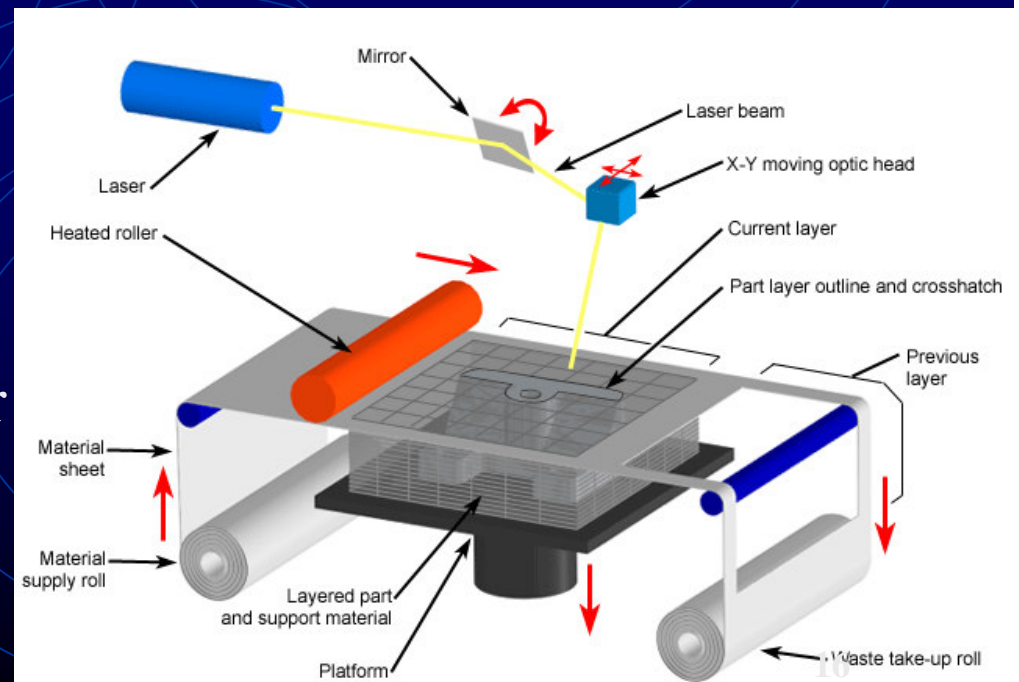
# 1. Esteriolitografia

- A estereolitografia (SL) foi o primeiro sistema de Prototipagem Rápida a ser desenvolvido, em 1989, por intermédio da 3D Systems Inc. A estereolitografia permite a construção de protótipos através da adição sucessiva de camadas. A construção de modelos físicos resulta da solidificação de uma resina líquida, que sob a ação de um feixe de laser, polimeriza e solidifica.



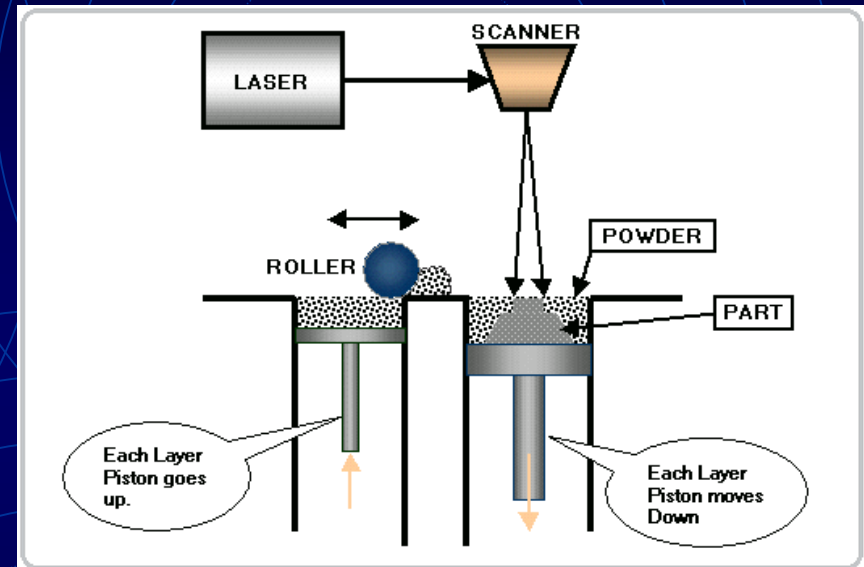
## 2. LOM – Laminated Object Manufacturing

- Os modelos são fabricados colando sucessivamente folha de papel, nas quais um feixe de laser corta o perímetro exterior correspondente ao corte local do componente. Cada camada de papel impregnado de cola térmica é colada à anterior por ação de um rolo de compressão aquecido.



# 3. SLS – Selective Laser Sintering

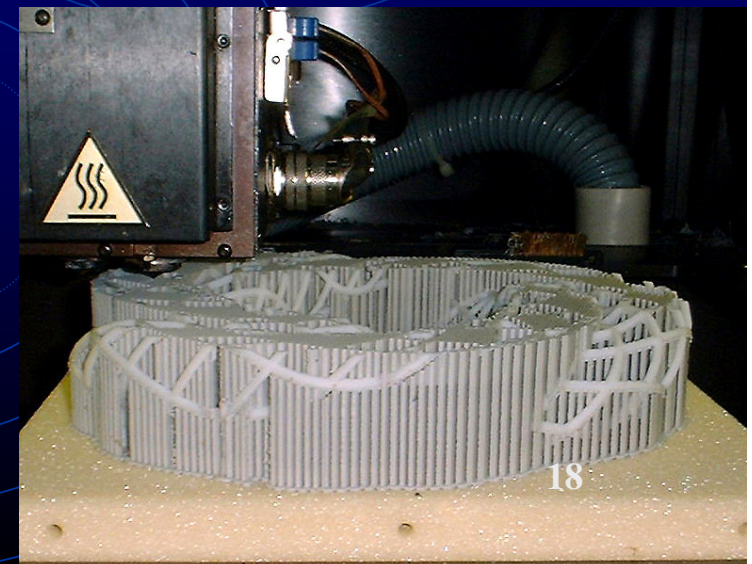
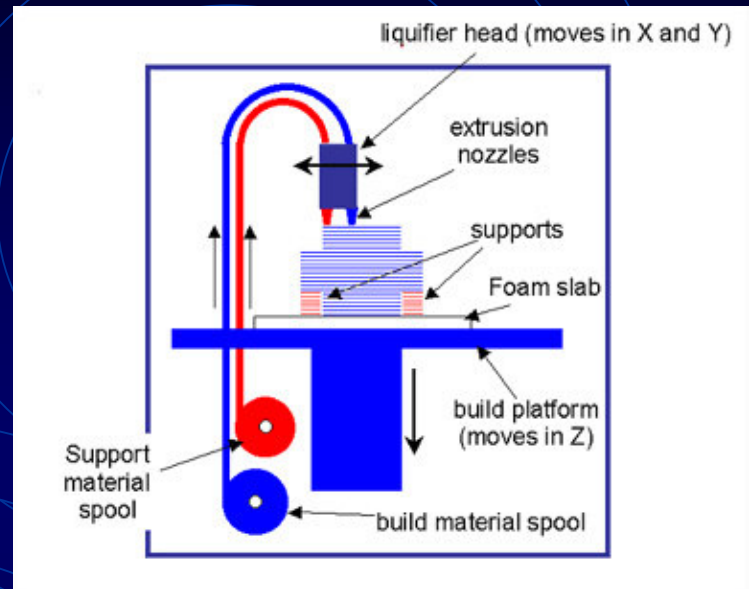
- Esta técnica utiliza um feixe de laser para fundir materiais em pó. O pó é elevado nos alimentadores e espalhado por auxílio de um rolo sobre a área de construção e é processado num ambiente inerte e termicamente controlado no interior de uma câmara de processamento. O material atinge a temperatura de fusão, pela energia cedida por um laser de elevada potência, sendo sinterizado em cada camada uma seção transversal do modelo CAD 3D. O modelo é sustentado ao longo do processo pelo material envolvente não sinterizado (bolo de pó), dispensando-se deste modo a criação de suportes. Após o resfriamento do protótipo, este é sujeito a uma operação de limpeza, no qual é removido o pó envolvente.





# 4. FDM – Fused Deposition Modeling

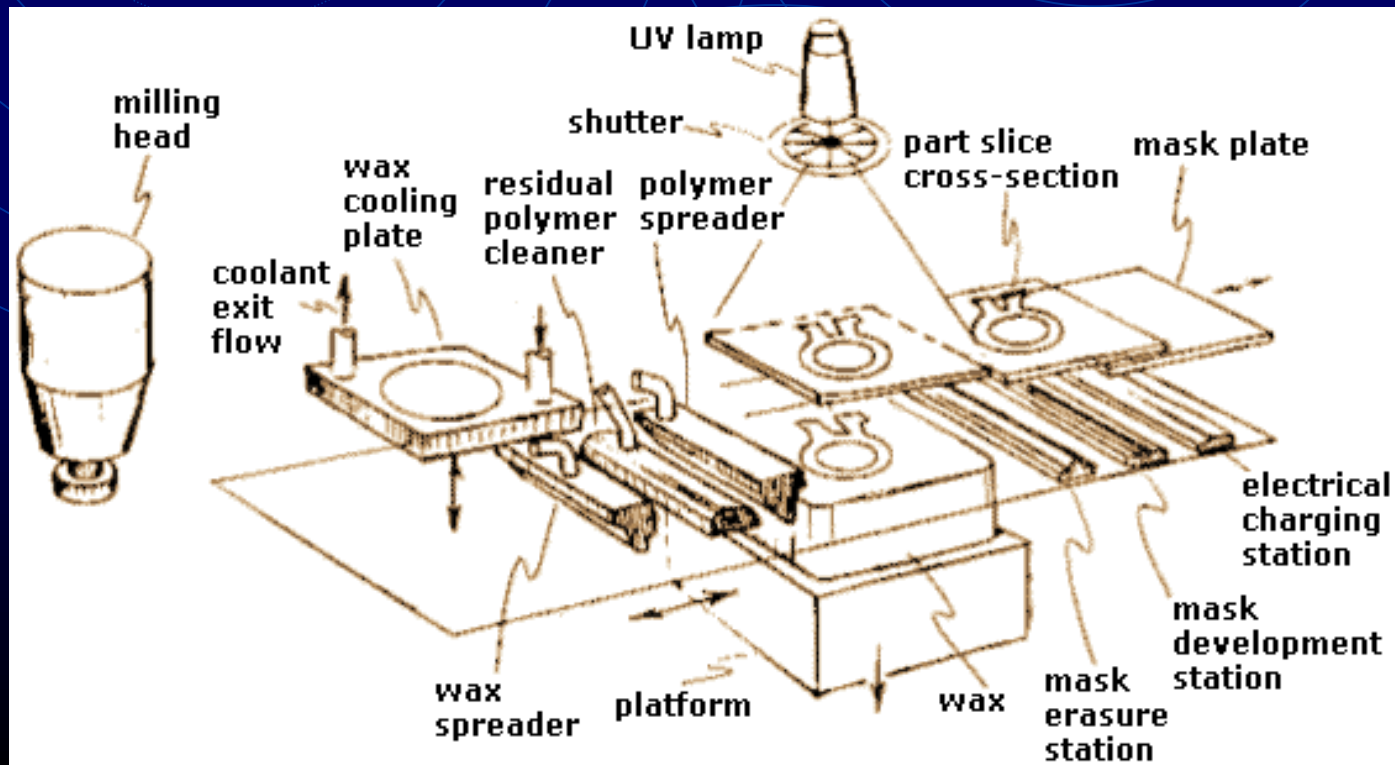
- Filamentos de material termoplástico aquecido são extrudados por uma microfieira que se movimenta no plano X-Y. O material, sob a forma de fio, é alimentado através de uma bobina até a fieira de extrusão. A cabeça de extrusão é aquecida até fundir o plástico e possui um mecanismo que permite que o fluxo do plástico fundido possa ser interrompido. A cabeça extruda e deposita o material em camadas muito finas sobre a plataforma de construção para formar a primeira camada. A plataforma é mantida a uma temperatura baixa, para que o material endureça rapidamente. O sistema encontra-se no interior de uma câmara mantida a uma temperatura ligeiramente inferior ao ponto de fusão do material plástico. Após a plataforma descer, a cabeça de extrusão deposita a segunda camada sobre a primeira. O material endurece rapidamente após ser extrudado pela fieira e adere à camada anterior.





# 5. SGC – Solid Ground Curing

- A resina fotosensível é espalhada na plataforma de construção. A máquina cria uma máscara fotográfica correspondente à camada a ser construída. Esta máscara é impressa numa placa de vidro por cima da plataforma de construção utilizando um processo eletrostático semelhante ao utilizado nas fotocopiadoras. A máscara é exposta a luz UV, que apenas passa pelas áreas transparentes da máscara endurecendo seletivamente a forma de cada camada.



# 5. SGC – Solid Ground Curing

- Após a camada ser endurecida, toda a resina não endurecida é aspirada para reciclagem, deixando todas as áreas endurecidas intactas. A camada endurecida passa sob uma luz UV para completar o processo de cura da resina. As cavidades deixadas pela aspiração da resina líquida são preenchidas com cera. Esta cera é endurecida por resfriamento proporcionando um suporte sólido para o modelo à medida que este é fabricado. Posteriormente, a superfície resina/cera é usinada por fresagem proporcionando um elevado acabamento e planicidade para a próxima camada. Após todas as camadas estarem completas, a cera é removida e podem efetuar-se operações de acabamento no modelo. Não é necessário qualquer operação de pós-cura da resina.



## 6. Impressoras 3D – 3D Printers – 3DP ou TDP

- As impressoras tridimensionais são equipamentos que permitem a obtenção rápida de protótipos físicos em fases muito incipientes do processo de desenvolvimento de produtos, sendo também conhecidas como *concept modelers*.
- Os equipamentos mais divulgados são os produzidos pelas empresas norte-americanas 3D Systems Inc. e Z Corporation



## 6.1 - Thermojet

- Utiliza uma cabeça de impressão com 96 canais/jatos dispostos linearmente, que depositam um material termopolímero criando uma peça e os suportes. O modelo é construído a partir da base e a deposição é rápida. A cabeça de impressão apenas se movimenta na direção de X, sendo os restantes movimentos efetuados pela plataforma de construção. O processo repete-se até a construção total da peça, não sendo necessárias operações de pós-processamento, que não seja a simples remoção das estruturas de suporte.



## 6.2 – Z Corporation

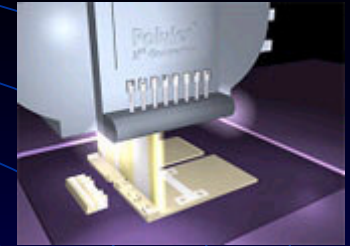
- Utilizando pó como matéria-prima, uma cabeça de impressão deposita aglomerante na forma líquida para ligar as partículas de pó. Este pode ser uma mistura celulósica ou gesso. A cabeça de impressão faz a deposição através de 128 jatos que o tornam num dos processos de construção por camadas mais rápido, com a vantagem adicional de não requerer a construção de suportes, uma vez que a peça é criada envolvida numa massa de pó.





## 6.3 - Polyjet

- O bloco de impressão desloca-se no ao longo do eixo X, como uma impressora, depositando uma camada de fotopolímero na plataforma de construção. Imediatamente após a deposição do material, uma lâmpada move-se por cima da camada emitindo luz UV, promovendo a cura e endurecimento de cada camada. São utilizados 2 materiais diferentes para construção do modelo, enquanto o segundo, um fotopolímero tipo gel, é utilizado como material de suporte. Após a construção do modelo, o material de suporte pode ser removido dos modelos através da aplicação de um jato de água ou manualmente.



# FABRICAÇÃO RÁPIDA DE FERRAMENTAS

## 1. Processos diretos

1.1 – Direct AIM

1.2 – Sinterização por Laser (SLSm e DMLS)

## 2. Processos indiretos

2.1 - 3D Keltool

2.2 – Moldes de Silicone

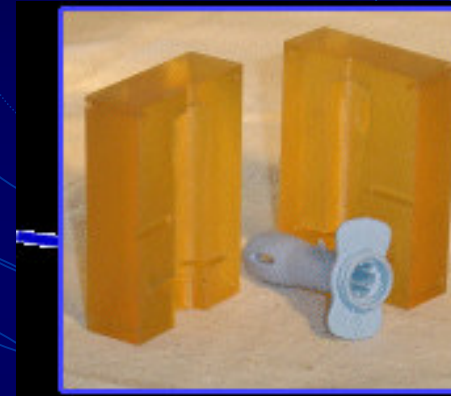
2.3 – Fundição por modelo perdido – Investment Casting

2.4 – Moldes de resina carregada – EP

2.5 – Metal Arc Spraying / Spray Metal Tooling

# 1.1 – Direct AIM (ACES Injection Moulding)

- ACES (Accurate Clear Epoxy Solid)
- Cria as zonas moldantes diretamente a partir do CAD por Estereolitografia. Este processo é adequado para pequenas séries de peças (até 50) de pequena dimensão e pouco complexas geometricamente. O processo consiste na produção de uma casca em Estereolitografia de espessura constante com a geometria da cavidade, que é preenchida com resina epoxídica carregada com alumínio granulado, permitindo a introdução de canais conformáveis de cobre para refrigeração do molde.
- As cavidades produzidas por esta variante são usadas em injetoras convencionais, mas as peças injetadas não apresentam características idênticas às produzidas num molde convencional. O tempo de ciclo é bastante longo (entre 3 e 5 minutos) devido à fraca condutividade térmica da resina, quando comparada com metais.



# 1.1 – Direct AIM

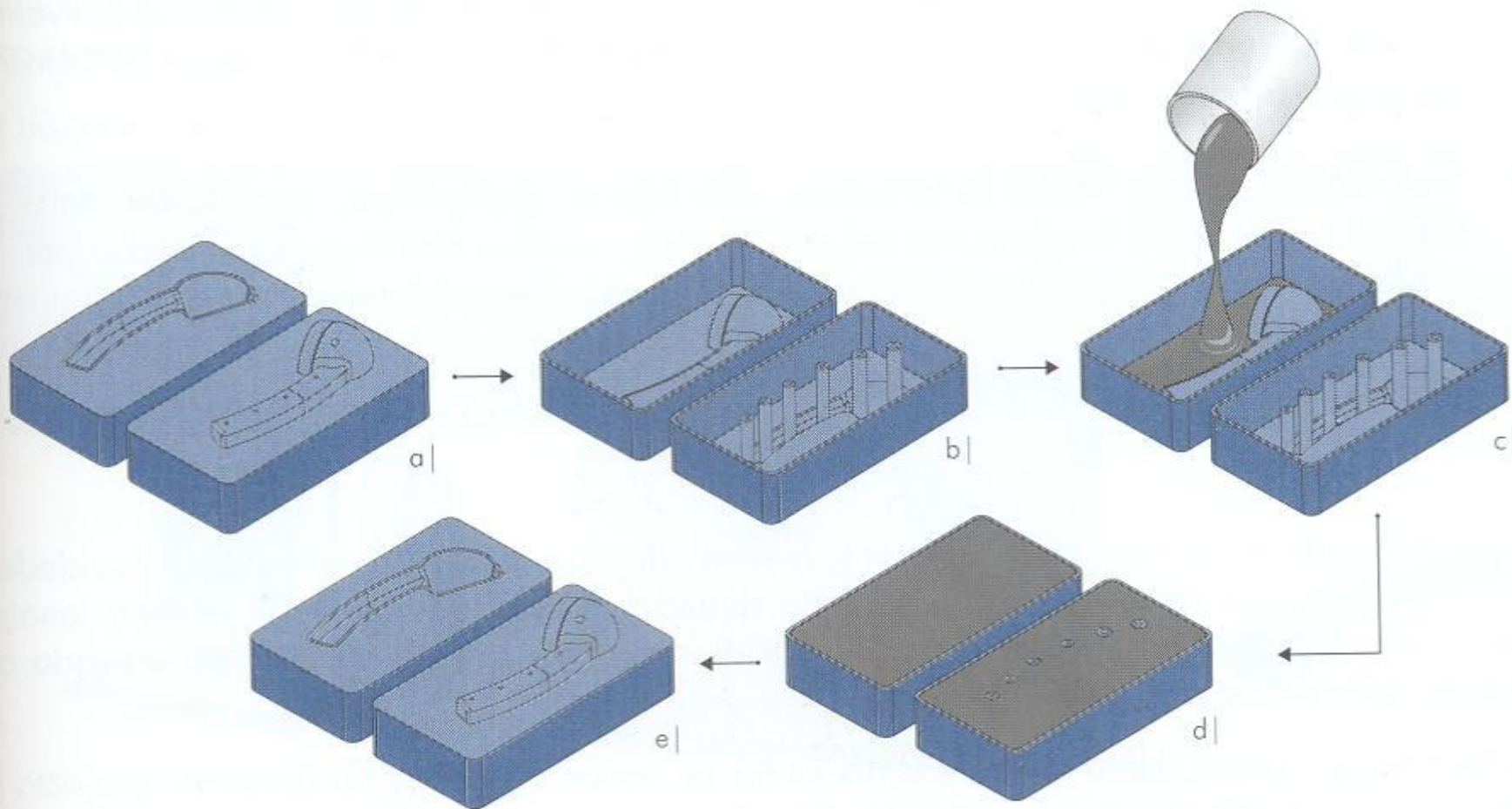


Fig. 9.49 – Processo Direct AIM™

a| Concepção da bucha e cavidade em CAD 3D.; b| Criação dos modelos (bucha e cavidade) em casca por Estereolitografia;  
c| Enchimento do postigo com resina reforçada; d| Postigos com resina reforçada; e| Insertos finais

## 1.2 – Sinterização por Laser

- Os processos de Sinterização Seletiva por Laser são processos aditivos, onde finas camadas de materiais em pós são espalhadas sobre uma plataforma de construção e fundidas seletivamente por ação de um feixe de laser.
- Estas tecnologias são adequadas para fabricação de insertos, cavidades e machos de dimensão reduzidos.
- Permitem reproduzir modelos físicos por sinterização, por exemplo furos para extração e refrigeração otimizada (conformal cooling). Os canais de refrigeração podem ser desenhados diretamente no CAD 3D das zonas moldantes, com a forma e complexidade mais adequados.





# 1.2 – SLSm – Sinterização Seletiva por Laser de metais

- Utiliza materiais metálicos em forma de pó de reduzida granulometria contém um ligante polimérico. Há duas fases no processo: 1) máquina de sinterização, 2) dois ciclos consecutivos no forno de infiltração
- Obtém-se peças e inserts metálicos passíveis de serem utilizados na injeção de plásticos (milhares de ciclos) ou injeção de ligas leves.
- O laser percorre, em cada camada, a seção transversal do modelo CAD 3D, sendo o ligante polimérico fundido, o que irá promover a ligação das partículas metálicas, em seguida a plataforma de suporte desce passando seguidamente um rolo que espalha uma nova camada de pó, produzindo, camada a camada, o inserto na sua totalidade.
- A peça/inserto resultante desta operação (peça em verde) é posteriormente infiltrada com outro metal (bronze), processo executado num forno a temperaturas específicas e controladas. O bronze funde e flui para o interior do inserto ocupando os interstícios existentes na peça/inserto, aumentando a sua densidade.
- Os inserts em estado final são constituídos por cerca de 60% de aço e 40% de bronze e têm propriedades mecânicas semelhantes ao aço P-20 e propriedades térmicas superiores ao alumínio.
- Os inserts podem ser usinados, polidos, soldados e erodidos tal como os moldes convencionais

# 1.2 - SLSm

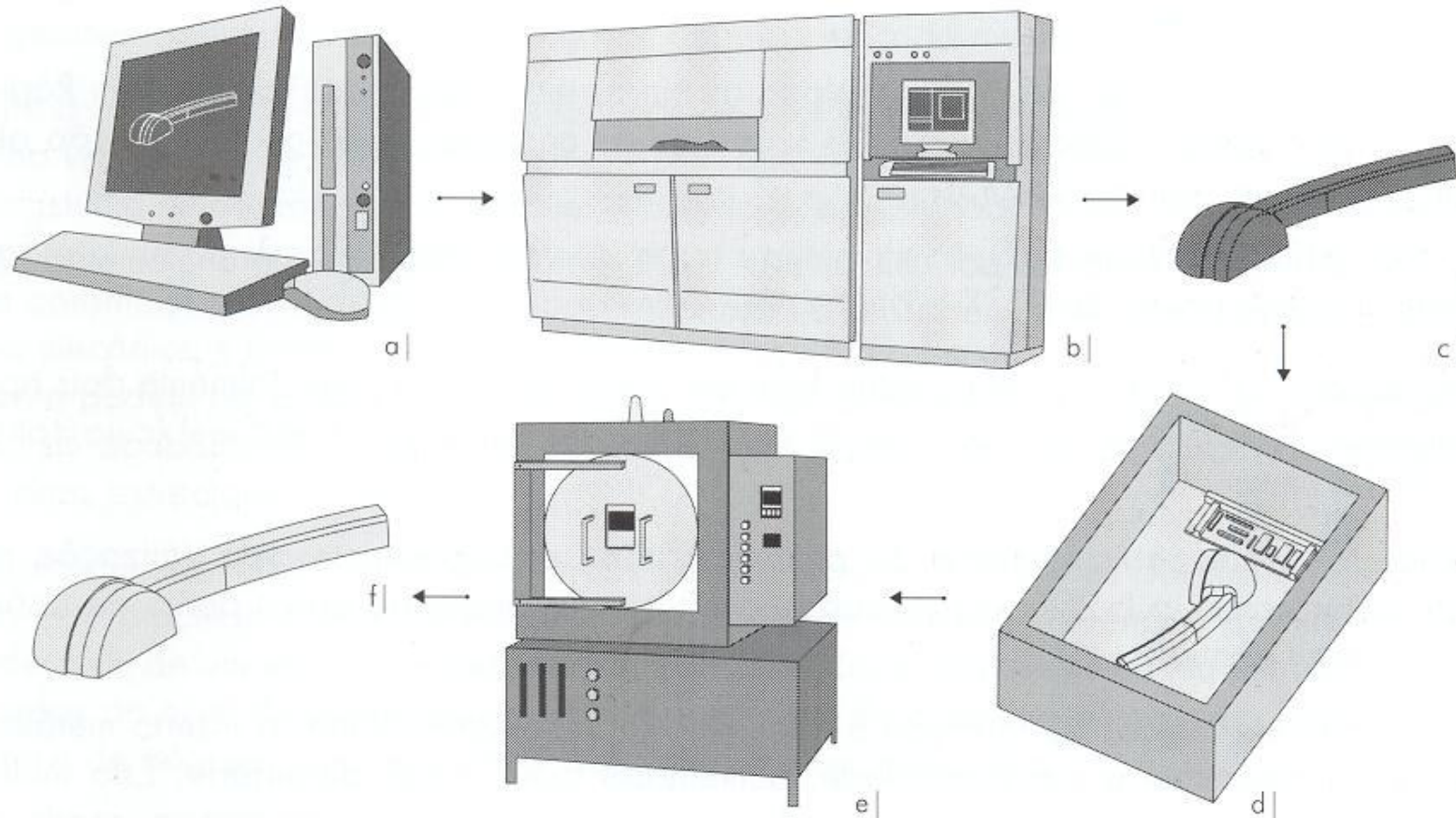


Fig. 9.51 – Sequência de operações do processo SLSm (RapidTool™)  
a) Preparação do ficheiro STL e da plataforma; b) Construção na máquina SLS; c) Limpeza da *green part*;  
d) Colocação dos modelos e do bronze na cuba; e) Ciclo de forno; f) Modelo final

# 1.2 – DMLS – Direct Metal Laser Sintering

- Adequado a fabricação de insertos metálicos para injeção de plásticos
- Permite a utilização de pós de menor tamanho médio de partícula, tendo em vista uma maior qualidade superficial dos protótipos fabricados.
- Utiliza pós 100% metálicos de baixa granulometria (20, 50 ou 100  $\mu\text{m}$ ) e espessuras de camada até 0,02 mm.
- Matérias-primas disponíveis: Direct Metal (bronze) e Direct Steel (aço).
- Laser de maior potência (>200 W) utiliza para fundir um metal de baixo ponto de fusão que funciona como ligante.



# 1.2 – DMLS – Direct Metal Laser Sintering

- Para aplicação em moldes de injeção é necessário infiltrar o inserto metálico sinterizado para preencher a porosidade, aumentando sua densidade. Esta infiltração pode ser feita com uma resina epoxídica de baixa viscosidade a alta temperatura, sendo necessária uma operação posterior de pós-cura, realizada em forno a temperatura determinada.
- Podem ser submetidos a operação de acabamento manual (polimento) e usinagem e erosão.
- Para fabricação de moldes protótipos ou pequenas ou médias séries de produção em moldes para injeção de plástico, possível injetar milhares de peças.

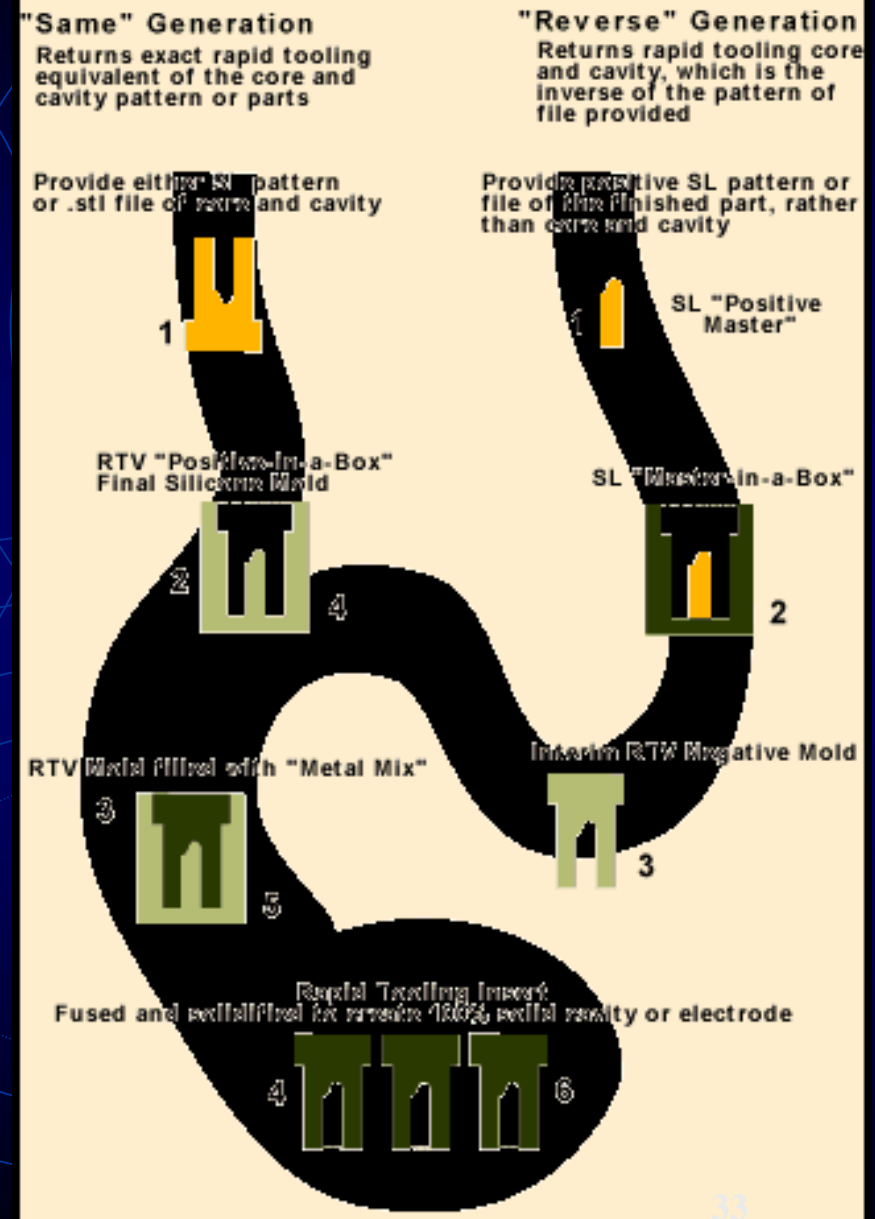




# 2. PROCESSOS INDIRETOS

## 2.1 – 3D Keltool

- Permite a utilização de quase todos os tipos de protótipos como modelo e consiste no vazamento de uma mistura em aço e carboneto de tungstênio revestidos por um ligante, obtendo-se o green state. Este molde verde é levado a altas temperaturas para queima do ligante e infiltração do cobre, sendo o seu desempenho mecânico e térmico semelhante ao de um aço P20. É possível operações de acabamento e polimentos posteriores, assim como a adição de canais de refrigeração e furos nos extratores.



## 2.1 – 3D Keltool

- Os blocos moldantes obtidos suportam as temperaturas e as pressões do processo de injeção, produzem grandes séries com boa precisão e acabamento. No entanto, apresentam limitações ao nível da dimensão máxima que é cerca do volume de um cubo com 150 mm de aresta, e de não ser possível a replicação de paredes muito finas.



## 2.2 – Moldes de silicone

- Os moldes de silicone podem ser usados para obter modelos de cera, peças de plástico ou metálicas em ligas de baixo ponto de fusão, e blocos moldantes a partir de pó.
- O molde de silicone necessita de um modelo da peça a replicar, normalmente obtido por uma técnica de PR, sendo a Estereolitografia a mais usada. O 1º passo é a colagem de um canal de ataque e bucha de injeção, assim como canais para o escape de ar, sendo o conjunto fixado numa caixa de madeira onde será vazado o silicone no estado líquido, após sua degaseificação e aplicação de desmoldante na montagem. Após a cura, o silicone endurece e procede-se ao corte manual do molde e remoção do modelo.



## 2.2 - Moldes de silicone

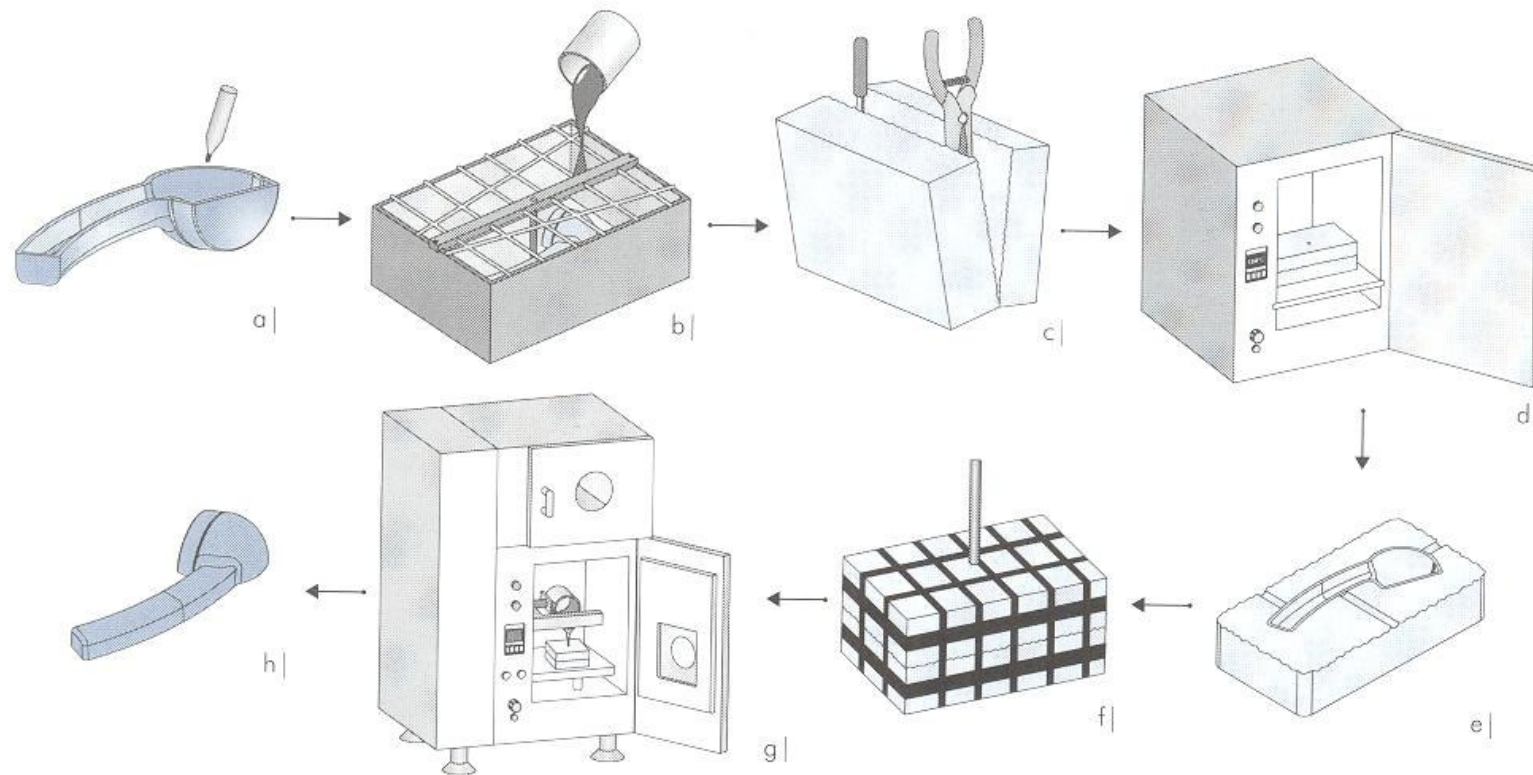


Fig. 9.56 - Produção de moldes em silicone  
a| Demarcação do plano de separação no modelo físico; b| Vazamento do silicone; c| Corte e abertura do molde;  
d| Cura do silicone; e| Zona moldante após cura; f| Selagem do molde e colocação do canal de alimentação;  
g| Vazamento da resina em vácuo; h| Peça final



## 2.3 – Fundição por modelo perdido – Investment Casting

### Casting

- O processo de fundição com moldagens cerâmicas obtidas a partir de um modelo, é considerado dos mais precisos entre todos os processos de fundição, sendo designado por fundição de precisão ou fundição de cera perdida.

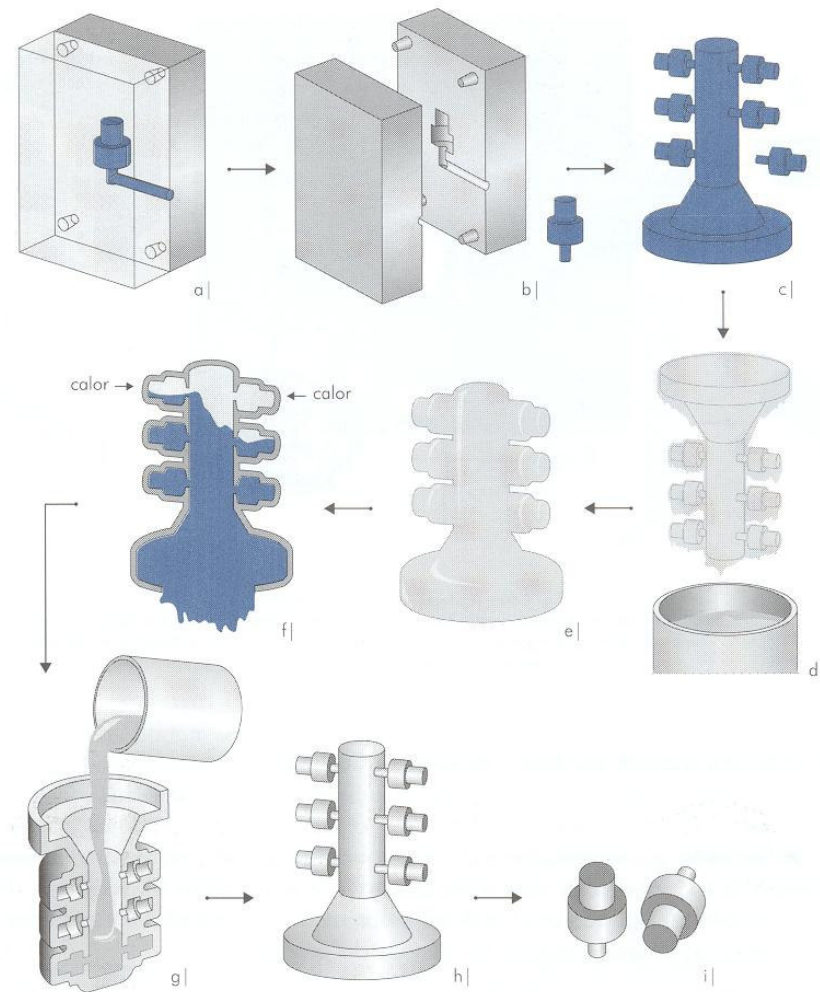
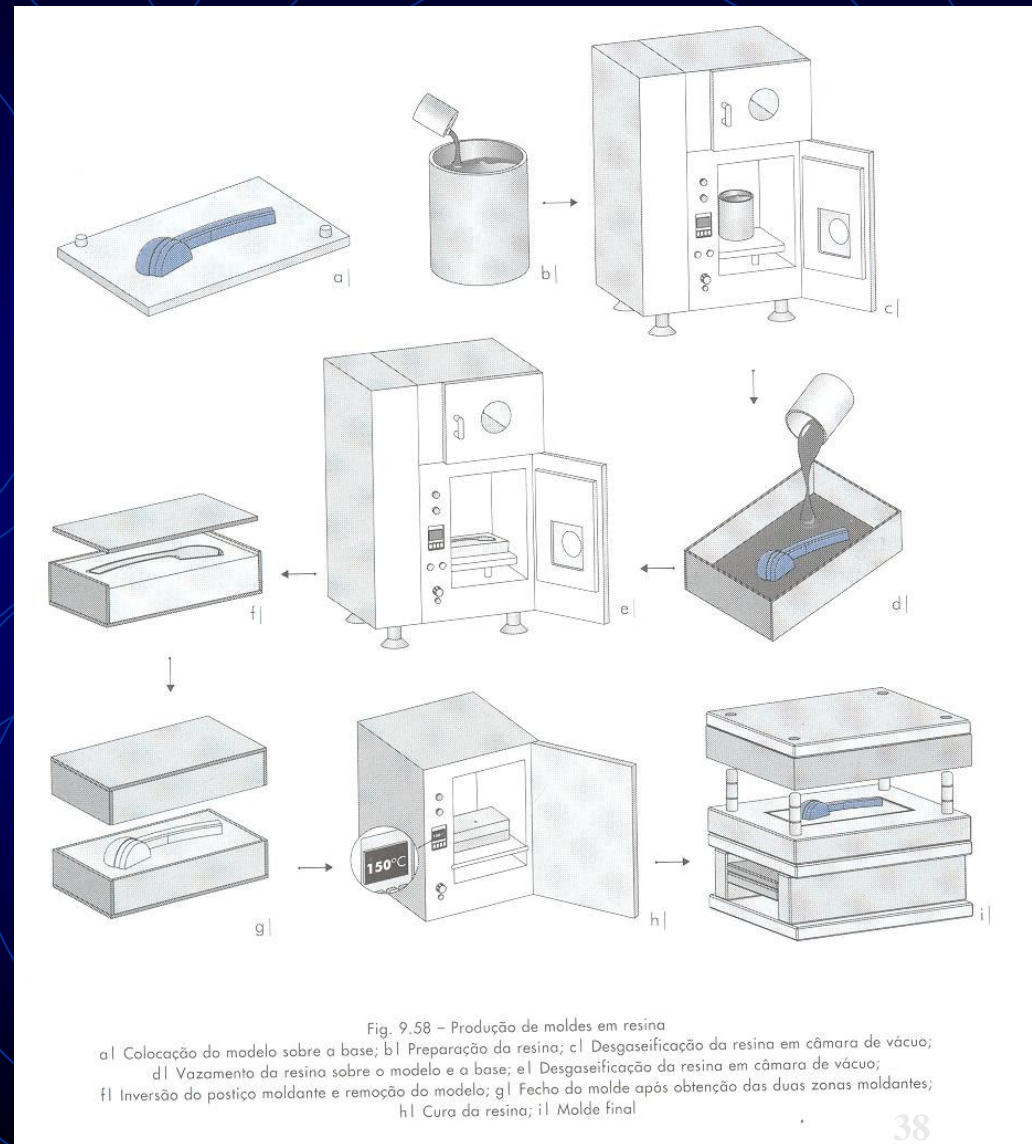


Fig. 9.57 – Moldagens cerâmicas por modelo perdido  
a| Injeção de cera em molde de resina ou silicone; b| Modelo em cera; c| Construção do "cacho"; d| Imersão em barbotina cerâmica;  
e| Carapaça cerâmica; f| Eliminação do "cacho" por fusão e calcinação; g| Vazamento da liga metálica; h| Reprodução metálica;  
i| Obtenção das peças fundidas

## 2.4 – Moldes de resina carregada - EP

- Moldes obtidos a partir de resina epoxídica com alumínio (resinas EP) em pó ou granulada. Aplica-se para pequenas séries de peças injetadas em termoplástico.
- O modelo da peça é obtido por Estereolitografia e montado numa caixa com uma linha de partição, onde é vazada a resina carregada como Al para criação de uma metade do molde. Após o endurecimento desta metade, o conjunto é invertido para proceder o vazamento da outra metade. Após a cura de todo o conjunto, o modelo é removido e procede-se a montagem da estrutura.



## 2.4 – Moldes em resina carregada - EP

- Estes moldes são adequados para geometrias relativamente simples podendo chegar as 2000 peças, ficando a poucas centenas se a complexidade aumentar, obtendo-se peças com propriedades semelhantes às obtidas num molde convencional de alumínio. Ciclos de injeção mais demorados devido a baixa condutividade térmica do material, e as pressões inferiores devido a baixa resistência mecânica

# 2.5 – Metal Arc Spraying / Spray Metal Tooling

- Consiste no revestimento por pulverização de ligas metálicas (cobre, zinco ou níquel) de peças/modelos obtidos PR.
- Na fabricação de insertos, após a definição do plano de partição, é aplicado desmoldante, sendo depois pulverizado em toda a superfície da peça com elevadas taxas de deposição. Assim é possível obter camadas com espessuras até 5 mm. As zonas moldantes obtidas apresentam a configuração de uma casca que são preenchidas com resinas epoxídicas carregadas com alumínio (resinas EP) para a formação do bloco moldante.

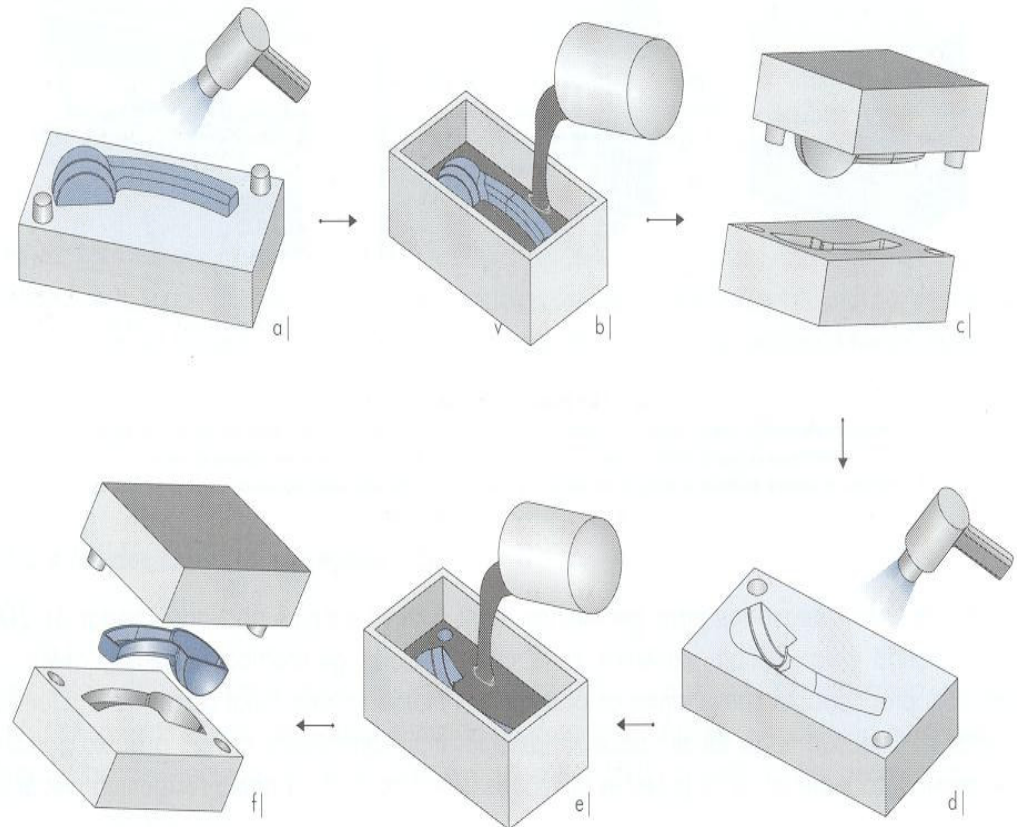


Fig. 9.60 – Processo Spray Metal Tooling

a) Revestimento do modelo por projecção metálica; b) Enchimento do molde com resina carregada (cavidade); c) Desmoldação da cavidade; d) Revestimento da cavidade por projecção metálica; e) Enchimento do molde com resina carregada (buchta); f) Peça final



# 2.5 – Metal Arc Spray / Spray Metal Tooling

- Nos blocos moldantes obtidos podem ser injetados 200 e 2000 (melhores resultados obtidos com ligas de níquel, dada a maior dureza e resistência à abrasão) peças sendo o tempo de obtenção do molde inferior a 4 semanas.



# Comparação entre processos diretos

PROCESSOS DIRECTOS			
	SLSm	DMLS	Direct AIM
Prazo (semanas)	2-5	1-4	1
Quantidade	100000	1000-1000000	10-50
Material	Termoplásticos	Termoplásticos	Termoplásticos de baixa temperatura não carregados
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condições de operação similares a moldes convencionais</li> <li>• Possibilidade de incorporar canais de refrigeração</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condições de operação similares a moldes convencionais</li> <li>• Possibilidade de incorporar canais de refrigeração</li> <li>• Não necessitam pós processamento</li> </ul>	Processo rápido e directo
Desvantagens	Algumas variantes necessitam pós processamento demorado	Custo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requer experiência</li> <li>• Condições especiais de injeção</li> <li>• Limitação de materiais</li> </ul>

Tabela 9.6 – Comparação entre processos directos



# Comparação entre processos indiretos

PROCESSOS INDIRECTOS					
	Moldes silicone	3D Keltool	Resinas Carregadas	Fundição modelo perdido	Spray metal tooling
Prazo (semanas)	0.5-2	1-6	1-4	2-6	2-4
Quantidade	10-25	1000-1000000	100-2000	1000-1000000	200-2000
Material	Resinas poliuretano, acrílicas ou epoxídicas	Termoplásticos	Termoplásticos	Termoplásticos	Termoplásticos
Vantagens	Custo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precisão</li> <li>• Duração do molde</li> </ul>	Custo	Custo	Dimensão das peças
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitação materiais</li> <li>• Duração do molde</li> </ul>	Limitação de dimensão	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Duração do molde</li> <li>• Mais adequado a geometrias simples</li> <li>• Ciclo de injeção longo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acabamento superficial</li> <li>• Operações manuais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Duração do molde</li> <li>• Mais adequado a geometrias simples</li> </ul>

Tabela 9.7 – Comparação entre processos indirectos