

# Ferro fundido com grafita compacta

Wilson Guessser  
Tupy Fundições e UDESC  
wguesser@tupy.com.br

Tecnologias limpas permitem o desenvolvimento de motores a diesel com melhor desempenho

## ABSTRACT

*Prototype CGI block and head castings have provided 90% increase in tensile strength and 40% increase in elastic modulus relative to gray iron castings. The present paper provides an overview of the properties of CGI and the process control requirements for the production of low nodularity CGI microstructures without the use of titanium and without the risk of flake graphite formation. Product results are provided for fourteen different automotive castings.*

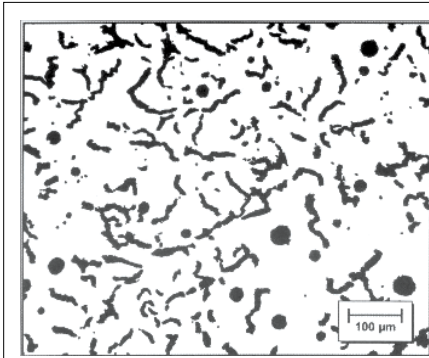
**D**esenvolvimentos recentes dos motores a diesel permitiram obter melhores desempenhos associados a menores emissões de po-

luentes e operação mais silenciosa. Esses aperfeiçoamentos baseiam-se em maiores pressões e maiores temperaturas de trabalho, que sujeitam os blocos dos motores a solicitações que poderiam levar a falhas prematuras. Conseqüentemente, os projetistas de motores precisaram buscar novos materiais para dar conta deste novo nível de solicitações, sem aumentar o tamanho ou peso dos componentes.

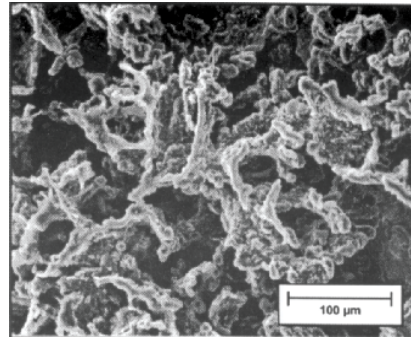
A escolha natural foram os ferros fundidos com grafita compacta. Comparados aos tradicionais ferros fundidos com grafita lamelar atualmente utilizados, os ferros fundidos com grafita compacta podem apresentar incrementos de 75% no limite de resistência, 35% a 40% no módulo de elasticidade e o dobro de resistência à fadiga. Podem, assim, atender não só às demandas atuais como à de projetos futuros de motores a diesel.

A **figura 1a** mostra o aspecto da grafita compacta. O aspecto em duas dimensões rendeu a denominação grafita vermicular. Entretanto, a **figura 1b** mostra que, na verdade, as partículas são interconectadas. A morfologia compacta, com extremidades arredondadas, torna a nucleação e propagação de trincas muito mais difícil que no caso dos ferros com grafita lamelar.

A matriz metálica dos ferros fundidos com grafita compacta pode ser variada de acordo com as aplicações. Enquanto que um coletor de escape é fabricado com mais de 95% de ferrita, privilegiando a estabilidade dimensional deste componente que trabalha em altas temperaturas, blocos e cabeçotes são especificados com matrizes contendo essencialmente perlita, privilegiando a resistência e a rigidez. A **tabela 1** apresenta propriedades mecânicas e físicas



**Figura 1a. Aspecto da grafita compacta em metalografia óptica.**



**Figura 1b. Aspecto da grafita compacta após ataque profundo. MEV**

**Tabela 1. Propriedades típicas de ferro fundido com grafita compacta (10% nodular)**

Propriedade	Temperatura (°C)	70% perлита	100% perлита
Limite de resistência (Mpa)	25	420	450
	100	415	430
	300	375	410
Limite de escoamento (0,2%) (Mpa)	25	315	370
	100	295	335
	300	284	320
Módulo de elasticidade (Gpa)	25	145	145
	100	140	140
	300	130	130
Alongamento (%)	25	1,5	1,0
	100	1,5	1,0
	300	1,0	1,0
Limite de Fadiga sem entalhe (Mpa)	25	195	210
	100	185	190
	300	165	175
Relação Fadiga/resistência	25	0,46	0,44
	100	0,45	0,44
	300	0,44	0,43
Condutividade térmica (W/m°C)	25	37	36
	100	37	36
	300	36	35
Coeficiente expansão térmica (µm/m°C)	25	11,0	11,0
	100	11,5	11,5
	300	12,0	12,0
Coeficiente Poisson	25	0,26	0,26
	100	0,26	0,26
	300	0,27	0,27
Dureza Brinell (BHN)	25	190-225	207-255

de ferros fundidos com grafita compacta, comparando materiais com 100% e 70% de perлита.

Ferros fundidos com grafita compacta sempre contêm alguma grafita nodular. Alguns componentes, como coletores de escape, podem ser produzidos com até 50% de grafita nodular, sem prejuízo para a fundibilidade ou desempenho. No caso de blocos e cabeçotes, entretanto, a complexidade geométrica e a necessidade de uma alimentação perfeita (ausência de defeitos de contração), combinadas com as severas solicitações térmicas e mecânicas, exigem que a microestrutura contenha no máximo 20% de grafita na forma nodular. A grafita lamelar não é tolerada, já que mesmo quantidades mínimas já causam quedas de até 30% na resistência do material.

A produção seriada de peças de ferro fundido com grafita compacta requer, portanto, que o processo, por um lado, evite a

formação de grafita lamelar e, por outro, garanta a otimização de fundibilidade, usinabilidade e condutividade térmica do material, propriedades associadas a baixas quantidades de grafita esferoidal.

O primeiro processo desenvolvido para produção de peças em ferro fundido com grafita compacta utilizava a adição de Ti, em teores entre 0,10% e 0,15%, em combinação com o Mg. Enquanto o Mg impede o crescimento de grafita lamelar, o Ti suprime a morfologia nodular. Entretanto, a formação de inúmeras partículas de TiC, de elevada dureza, torna o processo inviável para peças intensivas em usinagem, como é o caso de blocos e cabeçotes, embora possa ser utilizada em peças como coletores de escape. Conseqüentemente, um novo processo precisaria ser desenvolvido para a fabricação de grandes séries de blocos e cabeçotes.

### Processo de produção

Os elementos-chave no controle do processo de produção do ferro fundido com grafita compacta são as habilidades para medir, de maneira precisa, o comportamento do metal líquido e para responder, correspondentemente, antes do vazamento das peças

No processo SinterCast, adotado pela Fundição Tupy, o controle é baseado na análise térmica durante a solidificação da liga após o tratamento inicial com magnésio. Esta análise sintetiza o efeito combinado de todas as variáveis do processo, incluindo as matérias-primas, as

práticas de fusão e manutenção do banho, as diferenças de operação e os rendimentos das adições de magnésio. A adição inicial de Mg é intencionalmente baixa, de maneira que a análise térmica sempre determina a quantidade adicional de tratamento necessária para chegar à formação da grafita compacta.

A análise térmica é realizada utilizando-se um amostrador por imersão, ilustrado na figura 2. Trata-se de um copo metálico

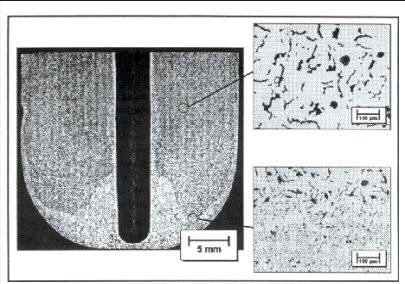


**Figura 2. Aspecto do amostrador por imersão e esquema da interação do líquido com o revestimento reativo.**

de paredes finas, que, em uma imersão de 3 s, obtém uma amostra de 200 g. A análise por imersão proporciona volume e temperaturas constantes de amostragem, evita a oxidação e resulta numa medida mais precisa das características de solidificação da liga. Um ponto fundamental do sistema consiste na pintura das paredes internas do amostrador com um revestimento reativo que consome o Mg. As correntes convectivas durante o resfriamento e solidificação fazem com que uma parte do líquido “lave” as paredes do amostrador e acabe concentrando-se em seu fundo. Esta porção do metal resulta com um teor de Mg menor que o centro da amostra, simulando a perda de Mg que ocorre numa espera de cerca de 15 minutos.

O amostrador contém um tubo protetor pelo qual dois termopares reutilizáveis monitoram a solidificação das duas regiões, centro e fundo. Tipicamente, a curva de análise térmica da região com menos Mg indicará a tendência à formação de uma mescla de grafita compacta e grafita de super-resfriamento, tipo D, enquanto que a curva da região central apresentará as características correspondentes à formação de grafita compacta. A figura 3 mostra as microestruturas correspondentes às duas regiões do amostrador.

O processador do sistema analisa as



**Figura 3. Na região central do amostrador, formou-se grafita compacta. Na região com menos Mg, formou-se grafita de super-resfriamento.**

duas curvas e determina a quantidade de correção para manter as peças fundidas livres de grafita lamelar e com um mínimo de grafita nodular. As adições complementares de Mg são feitas automaticamente, por meio de um alimentador de fio de magnésio metálico.

Num regime de produção, todos os dados obtidos em cada processamento são tratados estatisticamente e armazenados. Esta análise determina se há necessidade de alterar o tratamento preliminar do banho.

O processo de produção na Fundição Tupy começa com a fusão de um metal base de baixo enxofre, com carbono equivalente entre 4,4% e 4,5%, em fornos de indução de 18 t. A adição inicial de Mg é efetuada por meio do processo sanduíche. De cada vez são tratados de 800 kg a 1100 kg, utilizando-se FeSiMg (5% Mg), contendo Ce e terras raras. Como a adição de Mg é muito menor que na produção de ferro nodular, o tratamento é efetuado diretamente nas painéis de vazamento, evitando-se, assim, as perdas de temperatura e a oxidação do Mg que ocorreriam em transferências. Depois do tratamento preliminar, uma amostra para análise térmica é recolhida da panela. Enquanto a análise térmica é realizada, a superfície do banho é limpa e a panela é posicionada na estação de tratamento complementar, próxima da linha de moldes. Ao fim da análise, a um aperto de botão o sistema fornece a quantidade calculada de fio de magnésio, iniciando-se, em seguida, o vazamento das peças. O sistema permite o processamento de uma panela a cada 3,5 minutos, podendo ser ampliado, utilizando-se processamento de amostras em paralelo.

**Produção e caracterização de protótipos**

Foram produzidos protótipos de 14 peças para validação do processo e avaliação nos clientes. A lista de peças inclui 11 tipos de blocos e cabeçotes para motores em linha ou em V, de 1 a 12 litros, abrangendo pesos de 20 kg a 400 kg, com especificação de 20% máximo de grafita nodular. Embora utilizando modelos correspondentes às peças em ferro fundido cinzento, nenhuma das peças apresentou defeitos de contração, na forma de porosidades internas ou rebaixamento da superfície. Produziram-se materiais nas classes 300 a 450 da norma ASTM A842-85. Para isso, adicionaram-se, sobre um mesmo metal base, diferentes teores de cobre (entre 0,45 % e 0,60%) e estanho (entre 0,05% e 0,08%), obtendo-se porcentagens de perlita entre 70% e 90%. Como exceção, um cabeçote para um motor de 12 litros foi especificado com 30% a 50% de perlita, o que foi obtido sem adição de elementos de liga.

Amostras para ensaios de tração foram extraídas das mesmas posições de peças fundidas com grafita compacta ou lamelar. A **figura 4** mostra os resultados obtidos nas peças de ferro fundido perlítico, podendo-se constatar que, na média, os ferros fundidos com grafita compacta apresentaram limites de resistência 90% superiores.

A comparação entre os módulos de elasticidade dos ferros fundidos com grafita compacta ou lamelar revela que

o valor típico para as peças fundidas em ferro com grafita compacta é de 150 GPa, enquanto que os dos ferros cinzentos é de 100 a 110 GPa.

A microestrutura dos ferros fundidos é influenciada pela velocidade de resfriamento, observando-se maiores porcentagens de nódulos em seções que resfriam rapidamente. Em peças complexas como blocos e cabeçotes, as velocidades de resfriamento de diferentes partes das peças dependem não só das espessuras de paredes, como também do modo como o metal preenche a peça. Para a maior parte dos blocos, as velocidades de resfriamento das paredes com espessuras a partir de cinco milímetros são suficientemente baixas para manter a taxa de nodularidade dentro da faixa de 0% a 20%. Espessuras menores, que resultam em nodularidades na faixa de 30% a 50%, geralmente ficam restritas a paredes externas e aletas, não sendo prejudiciais à fundibilidade ou ao desempenho. A análise pormenorizada de um bloco pequeno (1 litro) mostrou que, mesmo na parede mais fina, com 4,5mm, a nodularidade não passou de 25%, mantendo-se na faixa de 10% a 15% nas demais espessuras.

Com relação a tensões residuais nas peças fundidas, foi constatado não haver diferenças significativas na comparação entre ferros cinzentos e com grafita compacta. Medições efetuadas em várias posições resultaram, para ambos os materiais, numa razão entre tensão residual e

limite de resistência da ordem de 0,20. Dessa forma, não se prevê a necessidade de alterações do processo, na transição de cinzento para vermicular.

Como consequência dos desenvolvimentos efetuados, a produção de cilindros e blocos de ferro fundido com grafita compacta atingiu a confiabilidade necessária para se estabelecer como material para produção de grandes séries.

**Figura 4. Resultado de ensaio de tração de ferros fundidos com grafita compacta ou lamelar (corpos de prova extraídos das peças).**

