

DESENVOLVIMENTOS RECENTES EM FERROS FUNDIDOS APLICADOS À INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

Wilson Luiz Guesser, Luís Carlos Guedes
Indústria de Fundição Tupy

Trabalho apresentado no Seminário da Associação de Engenharia Automotiva
- AEA, São Paulo, 1997

RESUMO

São apresentadas inovações na tecnologia de ferros fundidos, enfocando materiais, propriedades e aplicações, bem como tendências nas técnicas de fabricação que resultam em alterações de qualidade e custo de componentes fundidos.

Discutem-se exemplos de aplicação a altas temperaturas e a solicitações de fadiga térmica de ferros fundidos vermiculares e nodulares ligados ao Si e Mo. Apresentam-se também desenvolvimentos em ferros fundidos nodulares bainíticos, inclusive com tratamentos de nitretação visando utilização em engrenagens. O uso de elementos de liga como Ti e Nb para aumentar a resistência ao desgaste em nodulares e cinzentos é também discutido.

Enfocam-se ainda técnicas de fabricação que vem sendo crescentemente empregadas visando aumento de precisão dimensional, melhoria de acabamento interno de peças com cavidades complexas e otimização da usinabilidade.

1) INTRODUÇÃO

A tecnologia de ferros fundidos tem recebido, continuamente, importantes desenvolvimentos, tanto em processos de fabricação como em materiais. Estes desenvolvimentos, resultantes de necessidades nas áreas de aplicação ou ainda de redução de custos, trazem como consequência a atualização tecnológica de um material de longa tradição de uso na indústria automobilística. No presente trabalho são descritas algumas destas inovações, tanto no que se refere às propriedades dos ferros fundidos, bem como à sua tecnologia de fabricação.

2) APLICAÇÕES A ALTAS TEMPERATURAS

O uso de ferros fundidos nodulares ferríticos, contendo Si e Mo como elementos de liga, tem se firmado em aplicações para altas temperaturas, tais como coletores de exaustão e carcaças de turbocompressores (1, 2) (fig 1). A tabela I ilustra faixas de temperatura típicas

para diversas classes de materiais, iniciando-se com os nodulares ferríticos não-ligados e finalizando com os nodulares austeníticos ligados ao Ni; a classe dos nodulares ferríticos ligados ao Si e Mo representa um compromisso entre desempenho e custo. Este material é projetado para trabalho no campo ferrítico, pois as transformações de fase no aquecimento (austenitização) e no resfriamento (transformações eutetóides ou martensítica) se dão com variação de volume, que podem resultar em tensões e portanto em trincas. O alto teor de Si deste material tem, então, o objetivo de expandir o campo ferrítico, permitindo o uso do componente até temperaturas mais elevadas (3). Adições de Mo objetivam aumentar a resistência mecânica a altas temperaturas (tabela II), porém diminuem a ductilidade e a usinabilidade, de modo que o teor deste elemento é geralmente ajustado para cada aplicação específica.

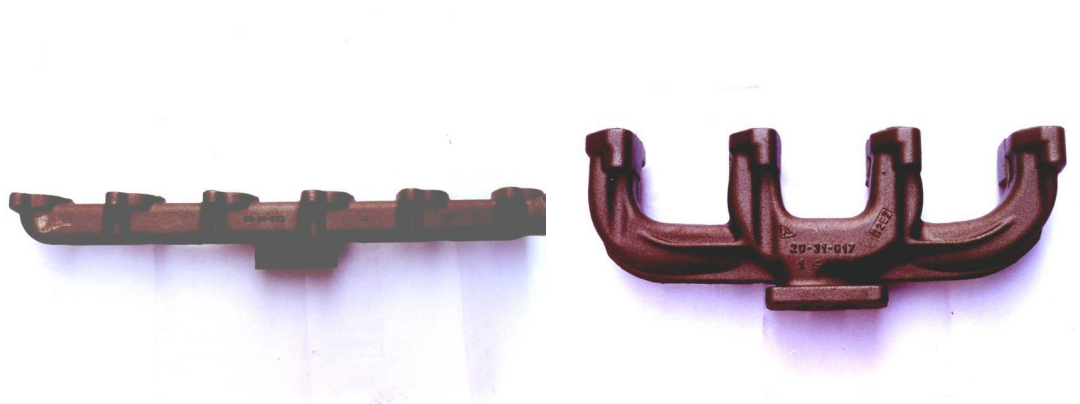


Figura 1 - Coletores de exaustão de motores diesel. Ferro fundido nodular SiMo.

Tabela I - Temperaturas de utilização de ferros fundidos nodulares (1).

material	temperatura
nodular ferrítico classe FE 50003, 3% Si	máx 820 °C
nodular ferrítico SiMo	máx 860 °C
nodular austenítico (20-35% Ni)	860 -900°C

Tabela II - Resultados de fadiga térmica sob condições de deformação restringida. Ciclagem térmica entre 200 a 650°C. Ferros fundidos nodulares (4).

elementos de liga	número de ciclos até ruptura
2,1 % Si	80
3,6% Si	173
3,6% Si - 0,4% Mo	375
4,4% Si - 0,2% Mo	209
4,4% Si - 0,5% Mo	493

Outra classe de ferro fundido que vem encontrando aplicação crescente neste tipo de solicitação é o ferro fundido vermicular (5-11). Este material apresenta grafita em forma de vermes, que confere propriedades mecânicas e térmicas intermediárias entre o ferro fundido cinzento (alta condutividade térmica, baixa resistência e alongamento) e o ferro fundido nodular (baixa condutividade térmica, alta resistência e alto alongamento), compromisso este muito favorável para solicitações de fadiga térmica. Adicionalmente, o ferro fundido vermicular pode receber elementos de liga, sendo usual o uso de Mo e de altos teores de Si, objetivando melhorar as propriedades a quente (fig. 2) . O seu uso em coletores de escapamento já é consagrado (5), normalmente ligado com Si e Mo (fig. 3), mencionando-se também o seu potencial em discos e tambores de freio (7,9).

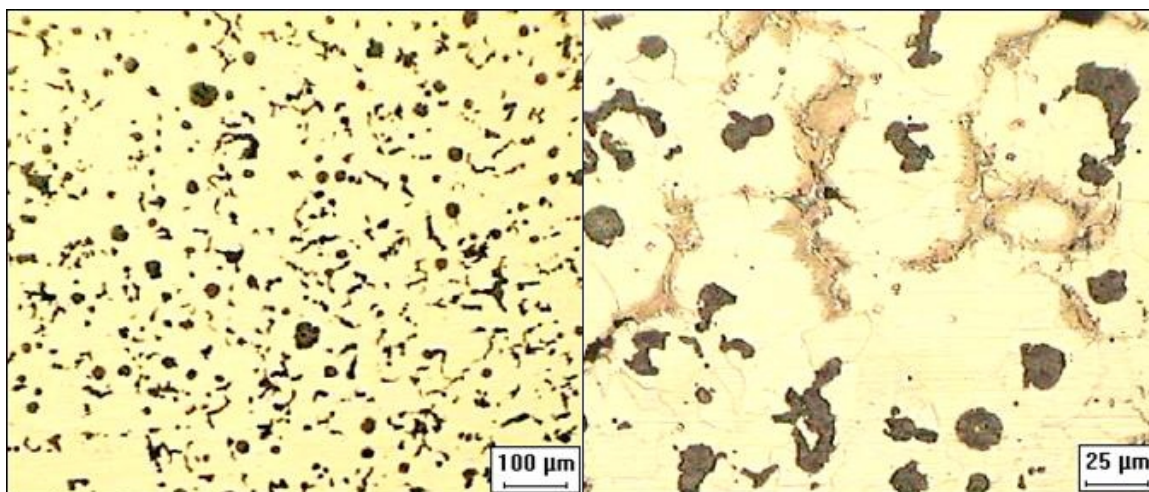


figura 2 - Microestrutura típica de ferro fundido vermicular ligado ao Si e Mo. Grafita em forma de vermes, com algumas partículas nodulares. Carbonetos intercelulares de Mo, associados a perlita. Matriz predominantemente ferrítica.



figura 3 – Coletor de escapamento produzido em ferro fundido vermicular SiMo.

Existem ainda desenvolvimentos para a utilização de ferros fundidos vermiculares em blocos e cabeçotes de motores, tendo-se em mente a maior resistência do vermicular quando comparado com o cinzento, e portanto a possibilidade de redução de peso (6, 8).

3) FERROS FUNDIDOS NODULARES BAINÍTICOS

Os ferros fundidos nodulares bainíticos, obtidos por tratamento térmico de austêmpera, representam as classes de ferros fundidos com as melhores combinações de valores de resistência e alongamento (12), sendo utilizados para aplicações envolvendo impacto e desgaste (suporte de mola de caminhão, componentes de transporte em mineração de carvão) ou ainda resistência à fadiga e desgaste (engrenagens).

Para algumas aplicações em que se tornou clássico o uso do componente no estado bruto-de-fundição, a aplicação de nodulares bainíticos é restringida pelo aumento de custo de fabricação (tratamento térmico). Este é o caso de girabrequins em ferro fundido nodular, onde, apesar das excelentes propriedades apresentadas pelo nodular bainítico (13), ainda é prática generalizada o emprego de nodulares perlítico sem tratamento térmico.

A utilização de nodulares bainíticos em engrenagens tem apresentado interesse, devido à possibilidade de redução acentuada de custo de fabricação. Diversos estudos mostram a viabilidade técnica desta substituição (14-16), existindo inclusive desenvolvimentos de nitretação em nodulares bainíticos (17). A composição química é projetada para que ocorra reação de precipitação durante o tratamento de nitretação, de modo a se evitar diminuição de resistência mecânica devido a este tratamento. As restrições ao uso generalizado de nodulares bainíticos em engrenagens são principalmente de ordem logística, já que, exceto em poucos casos, a usinagem deve ser feita antes do tratamento térmico, sequência esta não tradicional no fornecimento de componentes em ferros fundidos.

4) FERROS FUNDIDOS LIGADOS AO Nb E AO Ti

Para aplicações envolvendo desgaste, os ferros fundidos apresentam diferentes opções, cada qual adequada a um conjunto de condições. Neste sentido, adições de Nb e de Ti foram desenvolvidas objetivando conferir características específicas a componentes de ferro fundido (fig. 4 e 5). Assim, por exemplo, adições de Nb em camisas de cilindro de ferro fundido cinzento (18) e em anéis de ferro fundido nodular (19) resultam em aumento significativo da resistência ao desgaste, característica crítica neste tipo de componente.

Adições de Ti a peças de ferro fundido cinzento tem objetivo semelhante, proporcionando porém, além de aumento da resistência ao desgaste, também melhoria de propriedades anti-fricção. Deste modo o Ti tem sido usado como elemento de liga em blocos de motores produzidos em ferro fundido cinzento, bem como em discos de freio (20).

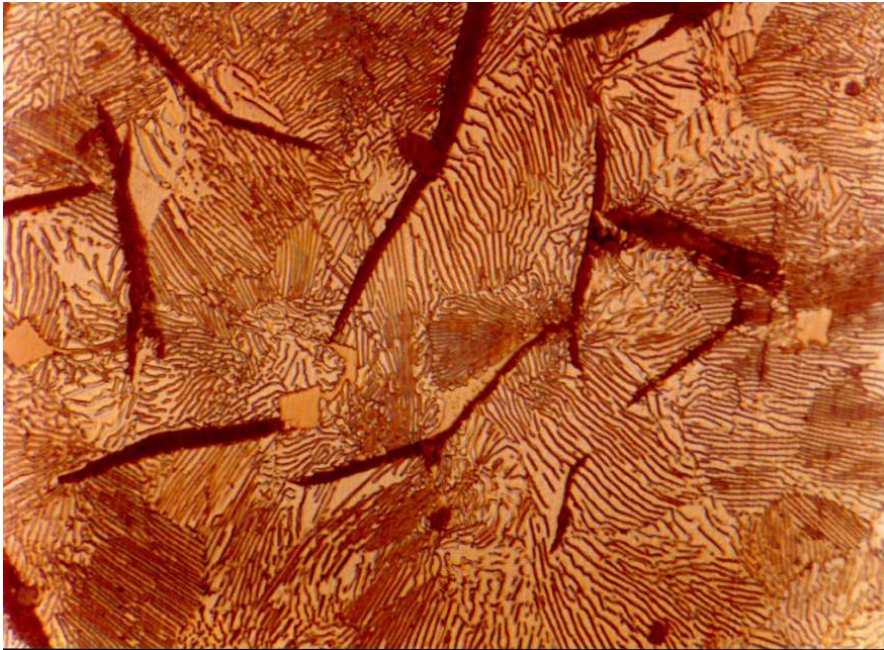


figura 4 - Microestrutura de camisa de cilindro. Ferro fundido cinzento resistente ao desgaste, ligado ao Nb e P. Grafita em veios, partículas de carbonetos de nióbio e de fosfetos, matriz perlítica.

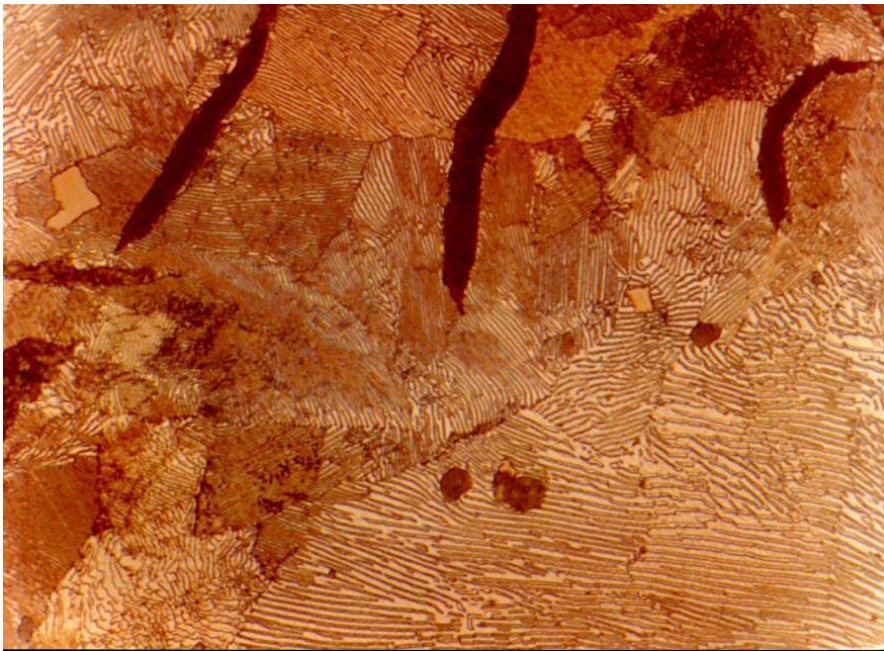


figura 5 - Microestrutura de ferro fundido cinzento ligado ao titânio. Grafita em veios, partículas de carbonitreto de titânio, matriz perlítica.

5) FERRO FUNDIDO CINZENTO DE ALTA CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Visando otimizações no desempenho de discos e tambores de freio, foi desenvolvida uma classe de ferro fundido cinzento de alta condutividade térmica, associada ainda a bons valores de resistência mecânica e de resistência ao desgaste. A microestrutura destes materiais apresenta grande quantidade de grafita e matriz perlítica, a grafita conferindo alta condutividade térmica e a matriz perlítica fornecendo resistência mecânica e ao desgaste. Este material é obtido com o uso de teores relativamente elevados de carbono e de elementos de liga perlitizantes, como o cobre, cromo e estanho. A menor resistência mecânica do que o ferro fundido cinzento usualmente empregado para estes componentes, isto é, limite de resistência de 150 Mpa em vez de 200 ou 250 Mpa, deve ser considerada no projeto da peça. Por outro lado, o aumento da condutividade térmica tem resultado no aumento da vida de componentes sujeitos à fadiga térmica, como discos e tambores de freio (21, 22).

6) FERROS FUNDIDOS RESISTENTES AO IMPACTO

A produção de componentes solicitados ao impacto, fabricados em ligas metálicas, deve ter sempre em mente a possibilidade da ocorrência de mecanismos de fragilização, que podem comprometer seriamente todo o projeto metalúrgico da peça, transformando uma liga de excelente tenacidade num material não adequado a solicitações de impacto. Este risco é conhecido em praticamente todas as ligas metálicas, incluindo-se aí os ferros fundidos. Deste modo, tem-se procurado, recentemente, caracterizar e estudar em detalhes os seus possíveis mecanismos de fragilização, como segregação de fósforo em nodulares ferríticos e austemperados (12, 23, 24), fragilização por hidrogênio em nodulares (25), presença de

grafita de Widmanstaeten em ferro fundido cinzento (26), precipitação de carbonetos em nodulares austemperados (12, 24), etc. Este conjunto de estudos tem permitido desenvolver componentes em ferros fundidos sob aplicações cada vez mais severas (fig.6), envolvendo solicitações de impacto e de fadiga.

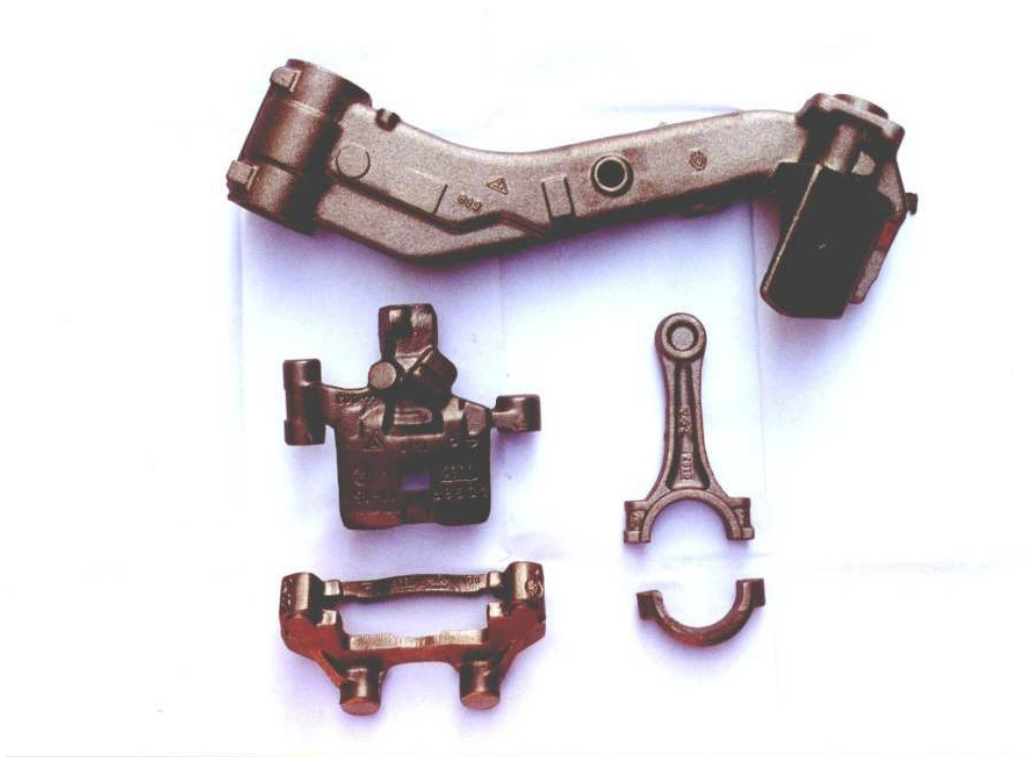


figura 6 - Peças em diversas classes de ferros fundidos nodulares. Componentes de freio (FE-50007), biela (FE-60003), braço de suspensão (FE-40015).

7) TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

Modernos tratamentos superficiais tem sido aplicados a componentes de ferros fundidos, como refusão superficial de eixos comando por TIG, deposição de camadas empregando laser (27) ou ainda nitretação de diferentes classes de ferros fundidos nodulares (17, 28). Isto permite a obtenção de propriedades específicas, visando-se em particular o aumento de resistência ao desgaste, à corrosão e resistência à fadiga. Uma técnica que resulta em propriedades extremamente interessantes é a deposição localizada, através de laser, de ligas de níquel, de cobalto, de titânio ou ainda de tungstênio, obtendo-se simultaneamente incrementos consideráveis de resistência ao desgaste e à corrosão. Os resultados desta técnica são maximizados pela alta condutividade térmica do ferro fundido cinzento, obtendo-se estruturas de solidificação extremamente finas na camada depositada (27).

Outro tratamento que merece destaque é a roletagem (deformação superficial localizada), que apresenta modificações importantes da resistência à fadiga, particularmente quando aplicada a componentes de ferro fundido nodular (29), sendo usualmente empregada na fabricação de girabrequins de ferro fundido nodular de matriz perlítica.

8) MELHORIAS DE PROCESSO EXPANDEM O CAMPO DE APLICAÇÃO DOS FERROS FUNDIDOS

Um primeiro aspecto a mencionar, relativo a processos de fabricação, refere-se ao amplo emprego dos novos sistemas de qualidade, em particular das técnicas de controle estatístico de processo, que através da redução de variações, tem permitido ao fundidor produzir componentes com propriedades anteriormente vistas como conflitantes e impossíveis de atender simultaneamente. Assim por exemplo uma peça de ferro fundido nodular, sujeita à têmpera superficial após a usinagem, deve ter uma composição química tal que promova a presença de matriz predominantemente perlítica na região a ser temperada, o que no passado era visto como sinônimo de usinabilidade ruim. Atualmente, com as novas técnicas de Controle Estatístico de Processo, reduzindo-se variações de composição química, pode-se atender tanto aos requisitos de resposta à têmpera superficial como de boa usinabilidade. A prática das fundições está hoje repleta de exemplos semelhantes a este, e a melhoria da usinabilidade tem sido uma consequência importante deste aprimoramento do controle de processo. Outra consequência da redução de variações refere-se à obtenção de peças com as propriedades necessárias já no estado bruto-de-fundição, eliminando-se etapas posteriores de tratamento térmico e limpeza de carepas de oxidação, com implicações no custo e na qualidade das peças fundidas.

Outra consequência de desenvolvimento de processos é observada na melhoria da precisão dimensional de fundidos, resultado principalmente do advento de processos de moldagem a alta pressão, aumentando a densidade dos moldes e reduzindo assim o efeito da contração da bentonita verificada no aquecimento da areia de moldagem. Esta maior estabilidade dos moldes, aliada a técnicas modernas de projeto e construção de ferramentais em CAD/CAM tem permitido produzir fundidos de ferro com variações dimensionais cada vez menores

Também a rugosidade superficial de cavidades internas de peças fundidas tem sido objeto de evolução, atuando-se particularmente em tintas de macharia. Atualmente utilizam-se tintas com cargas refratárias e lamelares, que estabelecem barreiras físico-químicas à penetração de metal entre os grãos de areia, resultando em melhoria do acabamento e da rugosidade superficial.

Um desenvolvimento digno de menção é o de capa de mancal de motor obtido em fundição contínua (fig. 7). O processo de fundição contínua de perfis em ferros fundidos, cinzento e nodular, tem sido empregado desde longa data para diversos produtos, como moldes para vidrarias, engrenagens usinadas, comandos hidráulicos, peças diversas de máquinas, em suma, peças geralmente sujeitas à usinagem intensa, procurando-se aproveitar a excelente usinabilidade dos perfis obtidos em fundição contínua. Na indústria automobilística o uso de perfis de ferros fundidos não é muito divulgado, procurando então aqui registrar o desenvolvimento de capas de mancal por este processo. O perfil é obtido com a seção da

capa de mancal, efetuando-se posteriormente o corte do perfil nas capas individuais. Na usinagem posterior as condições são ajustadas de modo a se poder utilizar a excelente usinabilidade deste material, decorrente da fina distribuição de grafita (devido à alta velocidade de resfriamento) e da ausência de grãos de areia e silicatos aderidos à peça.



figura 7 - Capas de mancal em ferros fundidos cinzento e nodular, obtidas por fundição contínua.

9) CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estes são alguns exemplos de desenvolvimentos em materiais e em processos de fabricação, com consequências sobre as propriedades dos produtos fabricados em ferros fundidos, e que certamente serão adicionados de novos exemplos com o contínuo desenvolvimento tecnológico de equipamentos, materiais e processos, permitindo ao projetista, em trabalho conjunto com a fundição, lançar mão destes recursos para a melhoria do seu produto. Equipes de Engenharia Simultânea podem possibilitar a utilização plena das novas tecnologias disponíveis na área de ferros fundidos, transportando rapidamente para o consumidor os resultados destas inovações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- 1) Bastid, P. et all. Untersuchungen an Werkstoffen fuer hochbeanspruchte Abgaskruemmer. Konstruieren + Giessen, 20 (2) :26-28, 1995.
- 2) Roehrig, K. Eigenschaften von unlegiertem und niedriglegiertem Gusseisen mit Kugelgraphit bei erhoehten Temperaturen. Giessere-Praxis (3-4) :29-40, 1985.

- 3) Beckert, A. & Guedes, L.C. Ferros fundidos nodulares com 4% de silício. Seminário ABM - A Indústria de Fundição. Joinville, 1989.
- 4) 4 - 6% silicon nodular irons for high-temperature service. BCIRA Broadsheet 219-2, 1985.
- 5) Renfang, W. et all. Gusseisen mit Vermiculargraphit fuer Abgaskruemmer und Getriebegehäuse. Konstruieren + Giessen, 20 (2) :9-14, 1995.
- 6) Lampic, M. Eine neue Chance fuer Gusseisen mit Vermiculargraphit. Giesserei, 79 (21) : 872-878, 1992.
- 7) Courderc, P. La fonte à graphite vermiculaire - Une première expérience industrielle. Fonderie - Fondeur D'Aujourd'Hui, 44 :27-32, apr 1985.
- 8) Bertram, J. & Kiel, N. Gusseisen mit Vermiculargraphit - seine Anwendung fuer gegossene Bauteile im Grossmotorenbau. Giesserei, 72 (13) :388-391, 1985.
- 9) ___ C V Buchan - A new name in the foundry industry. Foundry Trade Journal, 167 (3472) :178-180, apr 1993.
- 10) Fuller, A. G. & S. Santos, A. B. Propriedades físicas e mecânicas de ferros fundidos com grafita compacta. Metalurgia e Materiais - ABM, 53 (463) :136-140, mar 1997.
- 11) Tschech, O. GGV-Werkstoffe. Kooperation zwischen Institut fuer Werkstoffe der Ruhr-Universitaet Bochum und Fundição Tupy. Sep. 1990.
- 12) Guedes, L.C. Ferros fundidos nodulares austemperados. Tese de Doutorado. EPUSP, 1996.
- 13) Kovacs, B.V.Sr. Development of austempered ductile iron for automobile crankshafts. J. Heat Treating, 5 (1) :55-60, 1987.
- 14) Guedes, L.C. et all. Utilização de ferros fundidos nodulares bainíticos na fabricação de engrenagens. 15ºCongresso Anual ABM, Rio de Janeiro, 1985.
- 15) Mannes, W. et all. Erprobung von Zahnraedern aus unlegiertem bainitischem Gusseisen mit Kugelgraphit. Konstruieren + Giessen, 10 (4) :19-29, 1985
- 16) Harding, R.A. Ferrous materials used for gears - a review. BCIRA Report 1578, 1984.
- 17) Giampietri, S. Estudo de um Ferro Fundido Nodular Bainítico para Nitretação. Dissertação de Mestrado, EPUSP, 1993.
- 18) Castello Branco, C.H. & Beckert, E.A. Niobium in gray cast iron. Niobium Technical Report, CBMM, mar 1984.
- 19) Vatauvuk, J. & Demarchi, V. The effect of the addition of hard particles on the wear of liner and ring materials running with high sulfur fuel. SAE Paper 950527, 1995.
- 20) Chapman, B.J. & Mannion, G. Titanium-bearing cast irons for automotive braking applications. Meehanite Report E.1344, 1981.
- 21) Jimbo, Y. et all. Development of high thermal conductivity cast iron for brake disk rotors. SAE Technical Paper 900002, Detroit, 1990.
- 22) Keiner, W. & Werning, H. Hochgekoelter Grauguss GG-15HC - Idealer Werkstoff fuer Bremsscheiben und Bremstrommeln. Konstruieren + Giessen, 15 (4) :4-14, 1990
- 23) Guesser, W.L. et all. A study about galvanizing embrittlement in ferritic malleable cast iron. In: Fracture Prevention in Energy and Transport Systems. Rio de Janeiro, 1983, p. 717-726.
- 24) Guedes, L.C. et all. Ueber einige Wirkungen von Phosphor in Bainitischem Gusseisen mit Kugelgraphit. Giesserei-Praxis (17) :276, 1990.

- 25) Guesser, W.L. Fragilização por Hidrogênio em Ferros Fundidos Nodulares e Maleáveis Pretos. Tese de Doutorado, EPUSP, 1993.
- 26) Kuhl, R. Grafita de Widmanstaeten em feror fundido cinzento. Seminário Curso Pós-Graduação, EPUSP, 1988.
- 27) Wolf, S. et all. Beschichten von Gusseisenwerkstoffen mit dem Laserstrahl. Konstruieren + Giessen, 19 (2) :26-28, 1994.
- 28) Dengel, D. & Eckert, A. Erhoehen der Dauerfestigkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit durch Nitrocarburieren. Konstruieren + Giessen, 21 (4) :17-21, 1996.
- 29) Hirsch, T. & Mayr, P. Zum Biegewechselverhalten von randschichtverfestigtem bainitisch-austenitischem Gusseisen mit Kugelgraphit. Konstruieren + Giessen, 18 (2) :25-32, 1993.