



UM BREVE ESTUDO SOBRE FERRO FUNDIDO NODULAR

Alexandre Reis Francklin

Rio de Janeiro

Julho de 2009

Alexandre Reis Francklin

Aluno do curso de Tecnologia em Produção Siderúrgica

UM BREVE ESTUDO SOBRE FERRO FUNDIDO NODULAR

Trabalho de Conclusão de Curso, TCC, apresentado ao Curso de Graduação em Tecnologia em Produção Siderúrgica, da UEZO como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Tecnólogo em Produção Siderúrgica, sob a orientação do Prof. Flávio Lemos.

Rio de Janeiro

Julho de 2009

UM BREVE ESTUDO SOBRE FERRO FUNDIDO NODULAR

Elaborado por Alexandre Reis Francklin,
Aluno do Curso de Tecnologia em Produção Siderúrgica, da UEZO

Este trabalho de Graduação foi analisado e aprovado com

Grau: **9,0**

Rio de Janeiro, 24 de julho de 2009

Fábio Henrique Silva dos Santos, D.Sc.

Flávio de Almeida Lemos, D.Sc.

José Roberto M. R. Gonçalves, Esp.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2009

AGRADECIMENTOS

Obrigado mãe...

RESUMO

O material aqui estudado será o ferro fundido nodular obtido por fundição e que não apresenta a baixa resistência e a fragilidade que caracterizam os ferros fundidos cinzentos, uma vez que os tipos nodulares assemelham-se mais aos aços de baixo e médio carbono.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar as propriedades físicas do ferro fundido nodular usado na indústria automobilística. A revisão bibliográfica foi realizada de modo a obtermos dados relevantes ao desenvolvimento do projeto, tais como: materiais, processamentos, tratamentos, caracterizações e aplicações.

A partir de amostras fundidas em forno elétrico, foram produzidos corpos-de-prova para sua caracterização e estudos. Para o preparo dos corpos-de-prova foram feitos alguns tratamentos térmicos descritos sucintamente a seguir e preparo de superfície. Os resultados obtidos com a caracterização das amostras mostraram-se satisfatórios e de acordo com a literatura.

Palavras-chave: Nodular. Propriedades mecânicas. Indústria automobilística.

SUMÁRIO

Apresentação.....	<i>ii</i>
Agradecimentos.....	<i>iii</i>
Resumo.....	<i>iv</i>
Sumário.....	<i>v</i>
Estrutura do Trabalho Científico.....	<i>vi</i>
1. Introdução.....	1
2. Objetivos.....	2
3. Revisão Bibliográfica.....	2
3.1 Ferro Fundido.....	2
3.2 A Estrutura do Ferro Fundido Nodular.....	6
4. Materiais e Métodos.....	13
4.1 Preparação do Ferro Fundido Nodular.....	13
4.2 Tratamentos Térmicos.....	15
4.2.1 Alívio de Tensões.....	15
4.2.2 Recozimento.....	16
4.2.3 Normalização.....	16
4.2.4 Têmpera e Revenido.....	16
4.2.5 Austêmpera.....	17
4.2.6 Têmpera Superficial.....	20
5. Resultados.....	20
6. Conclusões.....	21
Referências Bibliográficas.....	22

O trabalho aqui apresentado possui a seguinte estrutura:

Capítulo I: Introdução: uma breve apresentação;

Capítulo II: Objetivos;

Capítulo III: Revisão Bibliográfica; uma abordagem científica dos temas relevantes ao desenvolvimento do trabalho;

Capítulo IV: Materiais e Métodos; descrição de todo material utilizado assim como as metodologias empregadas, seguido do preparo dos corpos de prova e sua posterior caracterização;

Capítulo V: Resultados e Discussão; apresentação dos resultados obtidos e uma análise dos mesmos;

Capítulo VI: Conclusão; finalização do trabalho com análise adequada do projeto e sugestões para trabalhos futuros.

1. INTRODUÇÃO

O ferro fundido nodular é uma liga composta de, basicamente, carbono e silício, com o carbono (grafite) livre na matriz metálica, porém em forma esferoidal e passou a ser empregado industrialmente a partir da década de 70, ampliando o campo de aplicação dos ferros fundidos, devido à combinação de propriedades como elevada tenacidade, resistência à tração, ductilidade, resistência ao desgaste e à fadiga, tornando-se um material de engenharia competitivo, combinando propriedades antes encontradas somente nos aços.

O ferro fundido nodular, que apresenta boa resistência à tração é muito utilizado na indústria automobilística, cujo objetivo é a melhoria da produtividade com redução de custo nas operações. Para que a dureza do ferro fundido nodular convencional alcance um nível determinado dentro de um intervalo estreito, são necessários requisitos consideráveis no processo da fundição.

A composição química, a velocidade de resfriamento e o estado de nucleação do banho fundido requerem uma atenção cuidadosa. Para uma dada geometria da peça fundida com grandes variações na espessura da parede, uma ampla gama de diferentes velocidades de resfriamento é obtida e não pode ser influenciada pela fundição. Estas variações podem ser evitadas somente no estágio de projeto da peça fundida.

Um modo de reduzir a dispersão da dureza é produzir um material que seja menos suscetível às variações mencionadas acima. Uma alternativa é o ferro fundido nodular com matriz de fase única, que é menos passível de sofrer com a variação da espessura de parede, com a composição química e com o estado de nucleação.

A busca contínua pelas melhorias de propriedades tem levado várias indústrias e centros universitários ao desenvolvimento de várias pesquisas a fim de se manterem competitivas no mercado. A adição de elementos tais como o silício, magnésio, cromo, molibdênio e o cobre, e também a aplicação de tratamentos térmicos adequados tem contribuído muito para a melhoria das propriedades mecânicas destes materiais, como, por exemplo, a rigidez

e a ductilidade, tornando o emprego destes materiais viável em certas aplicações que eram até então exclusivas dos aços médio teor de carbono.

Atualmente devido às necessidades impostas pelos novos motores de combustão, vários tipos de materiais estão sendo desenvolvidos para atender a indústria automotiva. Entre eles o ferro fundido nodular com nióbio. O nióbio forma carbonetos estáveis melhorando a resistência ao desgaste. Além desta propriedade, o nióbio é um microconstituente quase inerte, pois, pouco interfere na densidade do ferro fundido e não modifica a composição das microestruturas (grafita, perlita, etc) do ferro fundido em níveis significantes.

Algumas aplicações significantes para este tipo de material se encontram na indústria automotiva na confecção de cabeçote de motores, anéis de pistão e painéis de freio.

Encontra-se também na indústria siderúrgica na fabricação de rolos laminadores e moinhos.

2 – OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo inicial realizar a caracterização e determinação das propriedades mecânicas de ferro fundido nodular produzido nas dependências da Empresa Schlauder Metal – Centrifugal S.A.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – FERROS FUNDIDOS

O ferro fundido foi descoberto em meados do ano 500 (DC) e foi inicialmente comercializado em 1388. Ele tem sido a liga metálica mais comum utilizada em aplicações tribológicas. Os ferros fundidos são ligas com grande aplicação em engenharia mecânica e na indústria automobilística sendo empregados, por exemplo, na fabricação de blocos de motores de combustão interna ou peças de motores em geral. Em 2005, dos cerca de 60% dos metais ferrosos produzidos na Alemanha (aproximadamente 4 milhões de toneladas)

2,5 milhões de toneladas correspondiam à produção de ferro fundido cinzento, seguido pelo ferro fundido nodular, com quase 35% ou 1,4 milhão de toneladas. Estas ligas oferecem custos de produção relativamente baixos, propriedades mecânicas satisfatórias, além de elevada resistência à corrosão em altas temperaturas.

O ferro fundido pode ser definido como uma liga de Fe-C contendo aproximadamente 2% de carbono, muitas vezes resultando em carbono livre na forma de partículas de grafita. Desta forma, é um material composto de partículas de grafite dispersas em uma matriz metálica.

Os ferros fundidos são classificados em seis classes: 1) ferro fundido cinzento; 2) ferro fundido branco; 3) ferro fundido mesclado; 4) ferro fundido maleável; 5) ferro fundido de grafita compactada e 6) ferro fundido nodular.

Tradicionalmente os ferros fundidos são classificados de acordo com a cor da sua fratura, em cinzentos, brancos ou mesclados. Uma análise microestrutural mostra que os ferros fundidos cinzentos apresentam a grafita (C) em sua constituição, os ferros fundidos brancos apresentam carbonetos (Fe_3C , M_3C ou M_7C_3) e os mesclados, uma mistura das duas fases. A grafita pode se apresentar sob a forma compacta, de veios ou nódulos, entre outras, dependendo da presença de pequenas quantidades de elementos, dentre os quais os mais importantes são o magnésio e o cério adicionados num processo conhecido como nodulização.

O ferro fundido apresenta partículas de diferentes formas que afetam diretamente suas propriedades termo-mecânicas. A dureza e a ductibilidade são fortemente dependentes da forma da partícula de grafite. As partículas com formas nodulares aumentam essas propriedades, enquanto as partículas mais alongadas ou com contornos irregulares são prejudiciais devido à concentração de pontos de tensão. Desta forma, o ferro fundido pode ser classificado de acordo com a forma de suas partículas de grafite.

A Figura (1) ilustra as diferentes formas das partículas de grafite, encontradas em ferros fundidos.

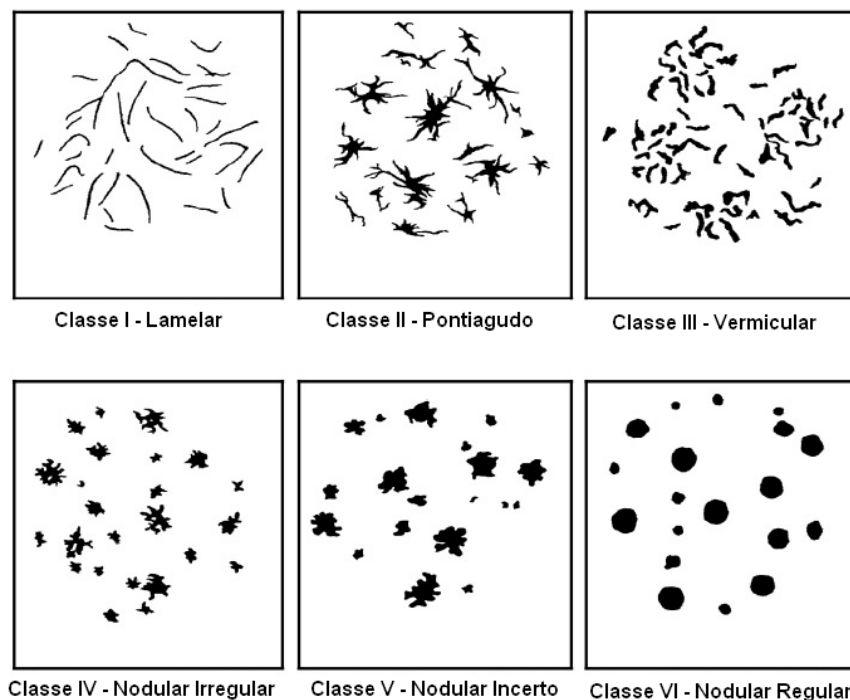


Figura 1 - Imagens de referencia para as seis classes de partículas de grafite de acordo com a Norma ISO-945

A Classe I é denominada de laminar devido às características da forma de suas partículas observadas na seção plana. Na verdade, as lamelas estão interconectadas, formando colônias que somente podem ser observadas em três dimensões. As partículas de grafite da Classe I são típicas do ferro fundido cinzento.

A Classe II, chamada de pontiagudo devido a sua forma com ramificações afiadas que lembram “pernas de siri” e representa uma forma de partícula de grafite que não corresponde a nenhum tipo de ferro fundido. As partículas desta classe aparecem devido a degeneração das partículas da Classe VI na produção de ferro fundido quando estão presentes impurezas ou presença de excessos de elementos nodulizantes. As partículas desta classe também podem se formar no resfriamento rápido de ferro cinzento hipereutético.

A Classe III é composta de ferro fundido vermicular (também conhecido como ferro fundido grafítico compacto). O ferro fundido vermicular, também conhecido como “Compacted Graphite Iron” (CGI), foi descoberto por acaso durante a fabricação do ferro fundido nodular. O ferro fundido vermicular tem sido produzido em componentes de

geometria relativamente simples há mais de trinta anos; no entanto apenas nos últimos anos as fundições têm empregado essa tecnologia em componentes mais complexos. Portanto, o material é denominado vermicular quando 80% das partículas de grafita estão na Classe III e também contém partículas da Classe V e VI.

Este material apresenta boas características de resistência mecânica, amortecimento, tenacidade, resistência a choques térmicos, condutividade térmica, e ductilidade. A junção de características tão importantes, tanto do ferro fundido cinzento quanto do ferro fundido nodular, atribui ao ferro fundido vermicular uma grande importância para aplicação industrial. Nos últimos anos ele vem sendo matéria-prima na fabricação de protótipos e blocos de motores de carros de corrida e, mais recentemente, na fabricação de motores a diesel substituindo o ferro fundido cinzento que até então era tradicionalmente utilizado.

As propriedades mecânicas do vermicular são superiores e possibilitam a fabricação de motores mais potentes com mesma cilindrada ou até mais compactos. Outro fator que contribui para o desenvolvimento do ferro fundido vermicular se deve as rígidas normas européias e norte-americanas de controle de poluentes. A combustão mais eficiente é uma característica dos blocos de motor fabricados com este material.

A composição do ferro fundido vermicular é muito similar à do cinzento. A grande diferença está na presença de magnésio. No tradicional, o cinzento, não há magnésio, ou há quantidade muito pequena. No vermicular, o elemento químico tem de ser mantido em uma faixa bastante estreita, entre 0,010% e 0,012%. Se houver mais do que isso, o ferro deixa de ser vermicular e perde suas características. O ferro fundido nodular, que tem outras propriedades, é utilizado na fabricação de virabrequins, por exemplo – pode ter entre 0,035% e 0,060% de magnésio em sua composição.

A presença de magnésio na quantidade exata faz com que se formem, no ferro fundido, estrias grossas de grafita o que inspirou o nome vermicular. No ferro fundido cinzento, a grafita aparece em forma de veios finos e, no nodular, como bolinhas ou nódulos. É esta microestrutura que determina a resistência do material. No cinzento, o limite de resistência é de 250 MPa; no vermicular, de 450 MPa; e no nodular, de 700 MPa.

A Classe III apresenta partículas de grafite com formas intermediárias entre as Classes I e VI e também pode formar colônias. Similarmente, o ferro fundido vermicular é um intermediário entre o ferro fundido cinzento e o ferro fundido nodular, apresentando propriedades térmicas similares ao ferro fundido cinzento e propriedades mecânicas similares ao ferro fundido nodular.

As Classes IV, V e VI são denominadas, respectivamente, de nodular irregular, nodular indistinto e nodular regular ou esferoidal e são as classes que correspondem a ferros fundidos maleáveis (IV e V) e nodulares (V e VI). De fato, o ferro fundido nodular é geralmente caracterizado pela presença de pelo menos 80% das partículas de grafite nas classes V e VI e pela ausência de partículas das classes I e II.

Normalmente, a classificação de ferro fundido é feita pela comparação visual de micrografias óticas com cartões de referência da norma ISO-945. Obviamente, uma comparação visual simples é subjetiva e não pode ser automatizado em um ambiente industrial. Desta forma, GOMES e PACIORNIK (2005) desenvolveram um método automático para classificação de formas de partículas de grafita.

3.2 – A ESTRUTURA DO FERRO FUNDIDO NODULAR

Quando a grafita está na forma de nódulos os ferros fundidos são chamados de nodulares ou esferoidais, designados por FE de acordo com a Norma NBR 6916/1981 (Quadro 1). Por exemplo: FE 38017 indica que o ferro fundido tem grafita esferoidal. As propriedades indicadas na tabela correspondem ao estado bruto de fusão.

Quadro 1 - Propriedades de ferros fundidos nodulares de acordo com a Norma Técnica
ABNT (NBR 6916/1981)

Classe	Limite de Resistência (LR) (Mpa)	Limite de Escoamento (LE) (Mpa)	Alongamento (A) (%)	Dureza Brinell (HB)	Microestrutura predominante
FE 38012	380	240	17,0	140 - 180	Ferrítica
FE 42012	420	280	12,0	150 - 200	Ferrítica - Perlítica
FE 50007	500	350	7,0	170 - 240	Ferrítica - Perlítica
FE 60003	600	400	3,0	210 - 280	Perlítica
FE 70002	700	450	2,0	230 - 300	Perlítica
FE 80002	800	550	2,0	240 - 312	Perlítica
FE 38017 - RI	380	240	17,0	140 - 180	Ferrítica

Obs.: RI – Classe com requisito de resistência ao choque.

De acordo com a Norma NBR 8650/1984 (Quadro 2), estes ferros fundidos são aplicados, em flanges, engrenagens, pinhões, etc, e os teores de carbono variam entre 3,40% e 3,80%, os de manganês entre 0,30% e 1,00% e os de silício, entre 2,10% e 2,80%, Os teores de fósforo e enxofre são geralmente menores que 0,09% e 0,02%, respectivamente, com magnésio residual entre 0,04% e 0,06%. O níquel, cobre, estanho e o cromo são os elementos de liga mais comuns para elevar as propriedades de resistência mecânica.

Quadro 2 – Composições de diferentes tipos de ferros fundidos nodulares de acordo com a Norma NBR 8650/1984

Elemento	Classes de ferro fundido nodulares					
	FE 38017	FE 42012	FE 50007	FE 60003	FE 70002	FE 80002
C	3,4 a 3,8	3,4 a 3,8	3,4 a 3,8	3,4 a 3,8	3,4 a 3,8	3,4 a 3,8
Si	2,1 a 2,8	2,1 a 2,5	2,8 a 2,8	3,4 a 3,8	2,3 a 2,8	2,1 a 2,8
Mn (máx)	0,3	0,3	0,5	0,5	1,0	1,0
P (max)	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
S (máx)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Cu	-	-	0,2 a 0,7	0,5 a 1,0	0,5 a 1,0	0,5 a 1,0
Mg	0,04 a 0,06	0,04 a 0,06	0,04 a 0,06	0,04 a 0,06	0,04 a 0,06	0,04 a 0,06

O quadro (3) apresenta as principais aplicações para diferentes classes de ferro fundido nodular:

Quadro 3 - Aplicações industriais de diferentes classes de ferros fundidos nodulares

Classe	Aplicação
FE 38017	Fundidos submetidos à pressão, corpos de válvulas e de bombas, mecanismos de direção, flanges
FE 42012	Fundidos para máquinas submetidas a cargas de choque e fadiga, discos de freio
FE 50007	Girabrequins e engrenagens
FE 60003	Engrenagens de alta resistência, componentes de máquinas, peças automotivas
FE 70002	Engrenagens de alta resistência, componentes de máquinas, peças automotivas
FE 80002	Pinhões, engrenagens, trilhos

Existe um bom relacionamento entre as propriedades de tração com a dureza Brinell. Essa relação depende da microestrutura do material. A figura (2) mostra a relação geral entre a dureza e os característicos de resistência à tração, limite de escoamento e alongamento de ferros nodulares nas condições fundida e recozida (ou normalizada) com uma microestrutura de ferrita e/ou perlita.

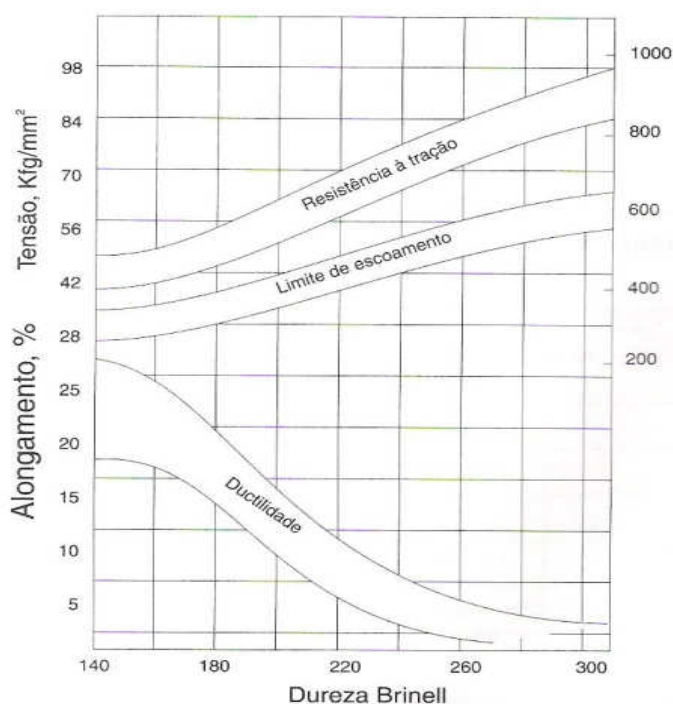


Figura 2 - Relação geral entre dureza e propriedades de tração de ferros nodulares na condição fundida e recozida (ou normalizada) com microestrutura de ferrita e/ou perlita

A figura (3) mostra o comportamento da curva tensão-deformação para dois tipos de ferro fundido nodular, onde pode ser visto um menor desempenho do ferro nodular ferrítico recozido:

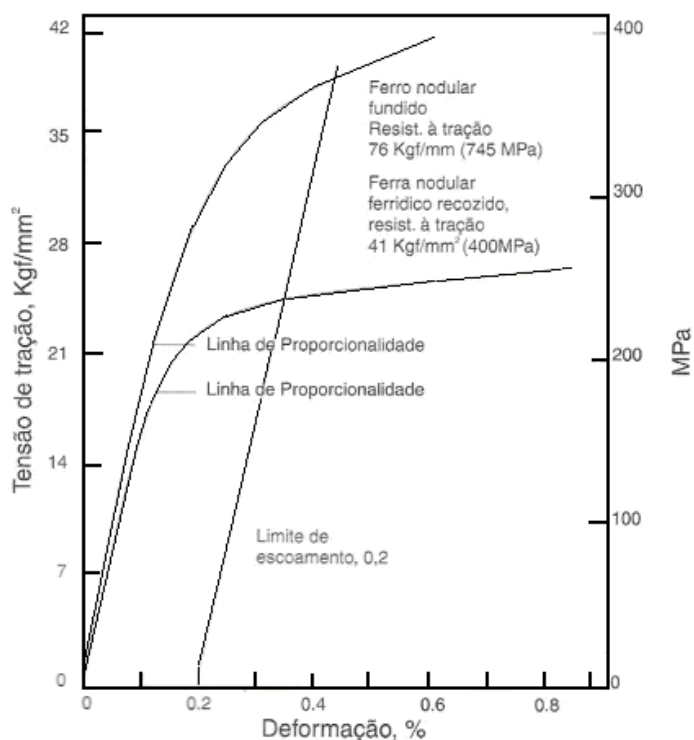


Figura 3 - Comportamento de dois tipos de ferros fundidos nodulares

Para a produção de ferro nodular é vital o estrito controle da constituição do metal líquido. Este é um dos mais importantes fatores metalúrgicos que permitem dar início ao objetivo de solidificar peças adequadas com microestruturas que garantam as melhores combinações das propriedades em uso.

Outros fatores que também tem efeitos marcantes sobre a microestrutura do material são as velocidades de resfriamento e sub-resfriamento e o tempo de solidificação. Na produção de ferro nodular, o líquido de base algumas vezes está severamente restrito a pequenas quantidades de elementos minoritários que interferem na formação de grafite esferoidal. O nodulizante mais comumente empregado é o magnésio que possui elevada afinidade para reagir como enxofre e com o oxigênio com a formação de compostos estáveis. Este fato, na prática obriga a necessidade de realizar operações de dessulfurização e de refino do líquido e adições prévias de elementos nodulizantes.

Desta forma, pode-se afirmar que modificações no processo de fabricação de materiais têm um efeito direto sobre o desempenho do produto, conforme demonstra a Pirâmide de Processo apresentada na Figura (4). Nesta, pode-se observar que o desempenho de um componente fundido

está diretamente relacionado com o processo de fabricação e demais características como microestrutura, composição química e propriedades mecânicas. Alterando-se um dos vértices desta pirâmide, como no caso das alterações provocadas no processo de solidificação do ferro fundido, usando-se resfriadores em pontos localizados do molde, os outros vértices também serão alterados, uma vez que existem ligações entre as características do desempenho do material. Desta maneira, pode-se variar as características mecânicas e metalográficas do produto, sem haver, porém, alterações na composição química do material indicada para a obtenção de um ferro nodular ferrítico.

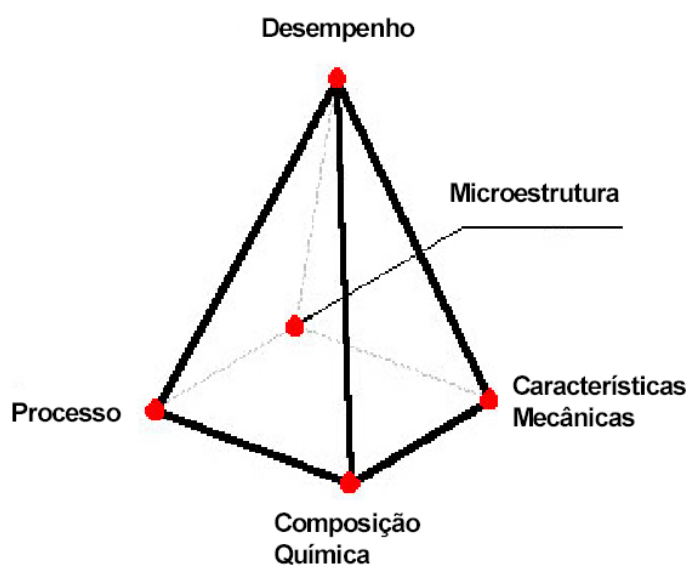


Figura 4. Pirâmide de um processo de um componente fundido

A usinabilidade desses materiais depende da composição química e da microestrutura. As principais relações são: a redução do teor de carbono causa o aparecimento de carbono livre, fragilizando a matriz e conseqüentemente prejudicando a usinabilidade; o aumento no teor de silício causa a diminuição de APC (aresta postiça de corte) e assim melhora usinabilidade do material; o aumento do teor de perlita torna a região branca mais dura e reduz a usinabilidade do material. A usinagem do ferro fundido pode variar desde muito fácil, como no caso do ferro fundido cinzento ferrítico, até muito difícil, como no caso do ferro fundido branco. A dureza do ferro fundido cinzento, e, portanto, o desgaste da ferramenta, aumenta com o aumento da porcentagem de perlita e cementita. Os flocos de grafita no ferro fundido cinzento eliminam a ductilidade do material, o que facilita a quebra dos cavacos, produzindo um comprimento de contato cavaco-ferramenta pequeno, relativamente baixas forças de usinagem e potência consumida, baixas taxas de desgaste e

altas taxas de remoção de material. O ferro fundido nodular permite maiores vidas nas ferramentas de metal duro do que os ferros fundidos cinzentos.

O ferro fundido, ainda no seu estado líquido recebe adição de elementos no banho metálico, que visam aumentar a velocidade de resfriamento do metal, e conseqüentemente, esferoizar à grafita. Este procedimento é chamado de “esferoidização”. Após este tratamento, se faz necessária a introdução de outros elementos químicos para reduzir o “efeito de coquilhamento”, por de um processo chamado de “inoculação”.

O magnésio, cério, cálcio, bário, ítrio e as terras raras são os principais elementos que favorecem a esferoidização da grafita. Porém, o processo mais comum e mais econômico usado para a fabricação do ferro fundido nodular é o tratamento com magnésio, tendo como método mais usual é o processo “sandwich”. Neste processo, a liga de magnésio é instalada em uma cavidade no fundo da panela de tratamento (geralmente, a panela de espera) e coberta com limalhas de ferro fundido, que tem a finalidade de retardar a reação do magnésio com o metal líquido. O metal é vazado de modo a atingir o fundo da panela no lado oposto da colocação da liga, evitando um ataque direto do metal líquido com a liga. A reação com a liga é explosiva e muito rápida, sendo assim, perigosa.

Após testes laboratoriais, se estabeleceu uma fórmula empírica (1) para calcular a quantidade de liga de magnésio indicada no tratamento de esferoidização, e que é apresentada por:

$$Q = \{P * [0,76 (\%S - 0,01) + K + t * 10^{-3}] / (R * \% Mg) / 100\} * (T/1450)^2 \quad (1)$$

Onde:

Q = quantidade em quilos da liga de magnésio;

P = quantidade em quilos do metal líquido a ser tratado;

%S = teor de enxofre do metal líquido;

K= teor residual de Mg do metal líquido, fixado na faixa de 0,03 a 0,06%, dependendo de vários fatores como: espessura da peça, quantidade de elementos que dificultem a esferoidização e estrutura da matriz metálica requerida.

t = tempo em minutos entre o tratamento com magnésio e o vazamento da última peça;

R = rendimento do Mg em % no tratamento;

%Mg = % de Mg na liga utilizada;

T = temperatura do metal líquido, em graus centígrados, no momento do tratamento.

É importante citar que a quantidade de liga de magnésio adicionada depende também da espessura da peça final e de outros fatores. Considera-se, na prática, uma adição de 0,8% de liga nodulizante para peças muito finas e até 1,5% para peças espessas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas inicialmente previstas para o presente trabalho consistiam das seguintes atividades:

- Preparação do ferro fundido nodular nas dependências da Companhia Schlauder Metal – Centrifugal S/A.
- Confecção dos corpos de provas na oficina do Centro de Tecnologia Mineral – CETEM.
- Preparação de amostras para microscopia óptica na Pontifícia Universidade Católica – PUC/RJ.
- Análises de propriedades mecânicas no Laboratório de Ensaio não Destrutivos do Programa de Engenharia Metalurgia e de Materiais da COPPE/UFRJ.
- Microscopia óptica no Laboratório da Coordenação de Análises Minerais do Centro de Tecnologia Mineral onde seria empregada a técnica desenvolvida por Gomes e Paciornik, (2005) para classificar ferros fundidos nodulares.

Em seguida será descrito de forma sucinta o procedimento de preparação do ferro nodular e as etapas de tratamento térmico.

4.1. PREPARAÇÃO DO FERRO FUNDIDO NODULAR

A fusão do ferro foi efetuada em fornos elétricos com capacidade útil de 3 toneladas e potência total de 2000 kW, com frequência máxima de 300 Hz. Na figura (5), tem-se o forno e, logo abaixo deste, a panela de espera:



Figura 5: Forno de indução e panela de espera

Uma carga de ferro fundido para produção de ferro nodular é composta de 30 % de sucata de aço, 60% de gusa, 10% de material de retorno interno e de material para correção, elementos de liga e fundentes (FeSi, FeMn, FeP, FeCr, FeMo, Cu, Ni, Mg e S). No momento do vazamento na panela de espera (1520°C), a liga nodulizante é adicionada (composta basicamente de Magnésio e Cério), responsável por transformar em nódulos a grafita dissolvida.

Apesar do grande número de variantes do processo de fundição, a obtenção dos diferentes tipos de ferros fundidos pode ser sintetizada de acordo com o fluxograma a seguir, na figura (6):

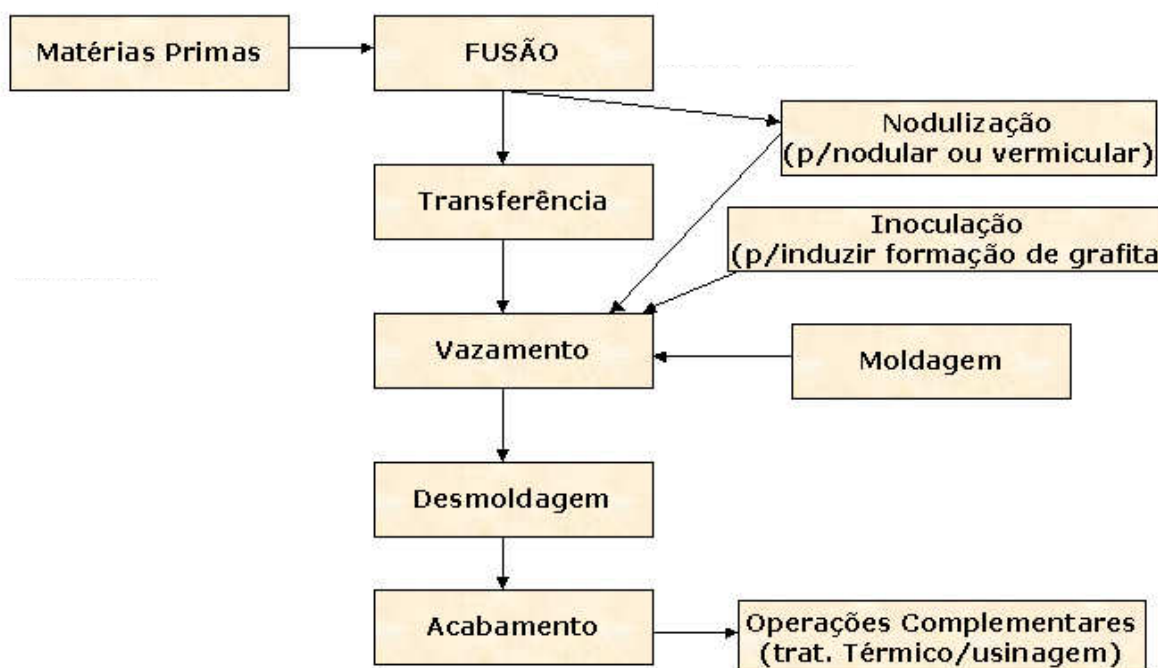


Figura 6: Fluxograma de produção em forno elétrico

4.2. TRATAMENTO TÉRMICO

Dependendo do tratamento que o material é submetido, é possível determinar que tipo de matriz metálica envolve os nódulos de grafita: ferrita, perlita ou ainda, uma mistura dos dois tipos. O tratamento térmico usual é o que decompõe a cementita produzindo ferrita e mais grafita esferoidal, mediante um recozimento ou normalização. Pode-se também temperar e revenir à dureza desejada. As operações de tratamento térmico a que usualmente podem ser submetidos os ferros nodulares são as seguintes:

4.2.1. Alívio de tensões

Reduz ou elimina as tensões residuais das peças fundidas de grandes dimensões ou de secção transversal não uniforme. Normalmente, a temperatura é mantida abaixo de 600°C e o tempo é de cerca de 20 minutos por centímetro de secção. Não há efeito sobre as propriedades mecânicas.

4.2.2. Recozimento

É feito o aquecimento a 900°C e posterior resfriamento até 700°C, em uma hora, seguido de resfriamento até 650°C, à razão do 3°C/h, para obtenção de matriz ferrítica. É também chamado de “recozimento para ferritização”, porque produz uma matriz essencialmente ferrítica.

4.2.3. Normalização

Depois de austenitizado o material (à temperatura de 900°C, durante determinado tempo), é resfriado ao ar. Se o resultado final apresentar dureza acima da desejada, pode-se proceder a um revenido posterior, até a dureza desejada, revenido esse que também reduz as tensões internas.

4.2.4. Têmpera e Revenido

O material é austenitizado pelo aquecimento entre 870° e 900°C. A seguir, é feito o resfriamento em óleo, geralmente e posterior revenido (que consiste em reaquecer a peça temperada a uma temperatura inferior à da têmpera - zona crítica/fase austenítica, deixando a peça por um determinado tempo em tal temperatura e em seguida, deixar a peça resfriar lentamente) até a dureza desejada. Isto resulta em estruturas correspondentes à da martensita revenida e o tratamento tem como objetivo conferir ao material, valores de resistência mecânica, dureza e resistência a desgaste mais elevados. A linha indicativa do processo (cor verde) no diagrama TTT (transformação tempo-temperatura) da Figura (7) dá uma idéia das etapas. O resfriamento é a parte esquerda da curva, isto é, da temperatura pouco acima de A (fase austenítica) até pouco abaixo de M_f (martensita final).

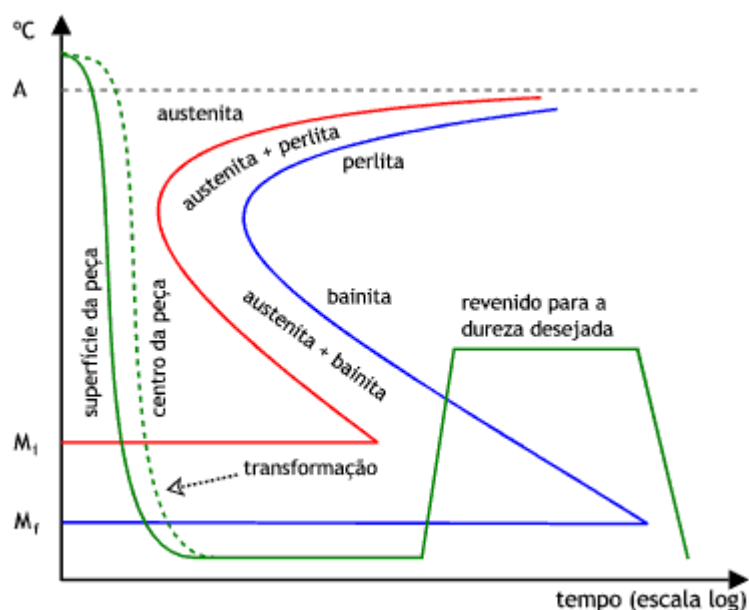


Figura 7 – Curva TTT para têmpera e revenido

Considerando a inércia térmica do metal e a rapidez do resfriamento, conclui-se que este último não se dá de maneira uniforme. Quanto mais próximo do meio de resfriamento, maior a velocidade. Assim, há duas curvas extremas, uma para a superfície e outra para a região central.

4.2.5. Austêmpera

Há cerca de 15 anos, o ADI (Austempered Ductile Iron) ou ferro fundido nodular austemperado era desconhecido no mercado metalúrgico nacional, já introduzido no mercado mundial desde a década de 1960, devido à suas potencialidades, capaz de competir de maneira vantajosa com materiais clássicos como o aço forjado, o ferro fundido tradicional e as ligas de alumínio.

É observada a melhora das propriedades devido esse tipo de tratamento. No processo, o aquecimento para austenitização é feito entre 850° e 925°C, de modo a que haja transferência suficiente de carbono à matriz austenítica. Como as zonas ferríticas do ferro nodular são isentas de carbono, para que o material se torne endurecível, é necessário, na

austenitização, que haja suprimento de carbono à ferrita ou austenita (acima da temperatura crítica), o que ocorre por solução e difusão, a partir dos nódulos de grafita.

Por ser um tratamento isotérmico, esse processo depende da temperatura e do tempo. Por isso, às vezes ocorre austenitização a temperaturas mais elevadas. Os tempos variam de duas a quatro horas, dependendo da secção, justamente para obter-se a máxima solubilização do carbono e resultante endurecibilidade. No caso de componentes para a indústria automobilística, verificou-se que, por exemplo, engrenagens pesadas exigiram quatro horas a 900°C e engrenagens de eixo traseiro três horas a 900°C. A temperatura de formação da bainita varia entre 235° a 400°C, para o ferro nodular sem elementos de liga. Na faixa de 235 a 270°C, obtém-se bainita inferior ou acicular, de alta dureza, alta resistência mecânica ao desgaste, com moderadas tenacidade e resistência ao choque. As temperaturas mais altas de austêmpera – 300° a 400°C – produzem bainita mais dúctil e tenaz. A figura (8) ilustra o tratamento:

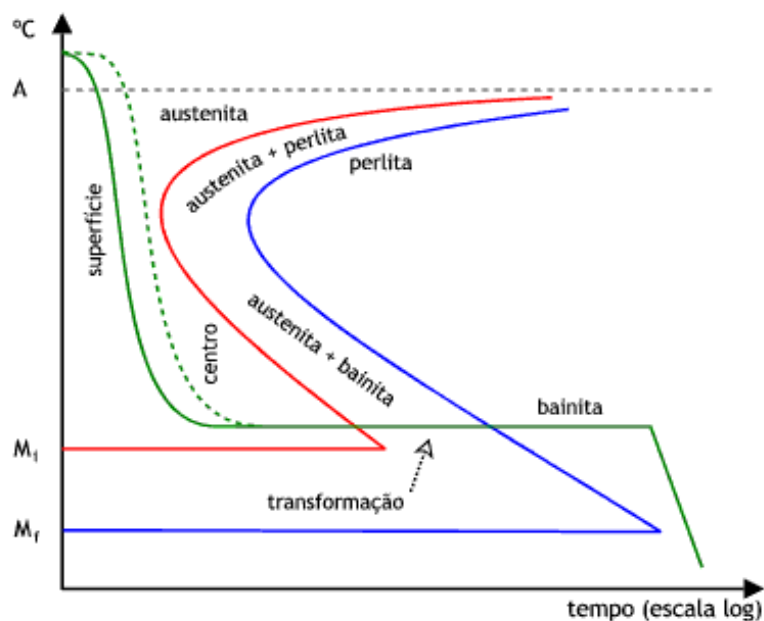


Figura 8 – Curva TTT para austêmpera

A peça produzida (fundida) apresenta melhora significativa em suas propriedades mecânicas, como a resistência, a tração, comportamento à fadiga, entre outras. O resultado

é um material tão resistente quanto o aço e que consome, em sua produção, menos energia, o que o torna um forte concorrente.

Entre outros aspectos entre o ferro nodular e o aço o teor de carbono é um grande diferencial, que altera as propriedades mecânicas e a maneira de o produto se solidificar. Densidade e algumas características microestruturais também diferem. Enquanto o aço pode ser trabalhado, laminado, o ferro fundido, inclusive o nodular e o austemperado, ganha a forma desejada na hora da fabricação da peça, de acordo com o molde – o que traz vantagens, principalmente no caso de componentes com geometria mais complexa. Já a fase de usinagem pode ser feita antes ou depois da austêmpera e é facilitada no ferro fundido pela presença da grafita, que ajuda na lubrificação.

O quadro (4) mostra as propriedades mecânicas do ADI, obtidas a temperaturas ambientes:

Quadro 4: Principais propriedades mecânicas de ferro fundido nodular austemperado

Propriedades	Valores
Limite de resistência (MPa)	800 - 1600
Limite de escoamento a 0,2% (MPa)	500 - 1500
Alongamento (%)	1 - 16
Módulo de elasticidade longitudinal (GPa)	150 X 162
Dureza (Brinell)	150 X 550
Limite de resistência à fadiga (MPa)*	310 X 690
Resistência ao impacto (J/cm ²)	25 - 170

*690MPa pode ser obtido por endurecimento localizado.

Obs: para se converter a unidade da escala Brinell para Rockwell C, utiliza-se a equação (2),

$$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}, \quad (2)$$

em que P representa a carga aplicada em Kgf, D é o diâmetro da esfera penetradora e d a diagonal média da indentação (espaço penetrado) em mm.

4.2.6. Têmpera superficial

Aplica-se tanto o processo por chama como por indução, para obter-se uma dureza superficial da ordem de 60 Rockwell C (equivalente a 2,48mm e 611 HB na tabela Brinell de acordo com a ASTM E140 - *Standard Hardness Conversion Tables for Metals*) e uma superfície de elevada resistência ao desgaste. A temperatura da superfície deve atingir 900°C durante alguns segundos, seguindo-se resfriamento imediato por jato de água.

5. RESULTADOS

A figura (9) apresenta a imagem microscópica de uma amostra do material no seu estado bruto de fusão, onde é possível observar os nódulos de grafita (A), e a mesma amostra após o ataque químico com Nital (composto de 2% de ácido nítrico e 98% de álcool) (B), onde podem ser vistos os nódulos de grafita numa matriz metálica.

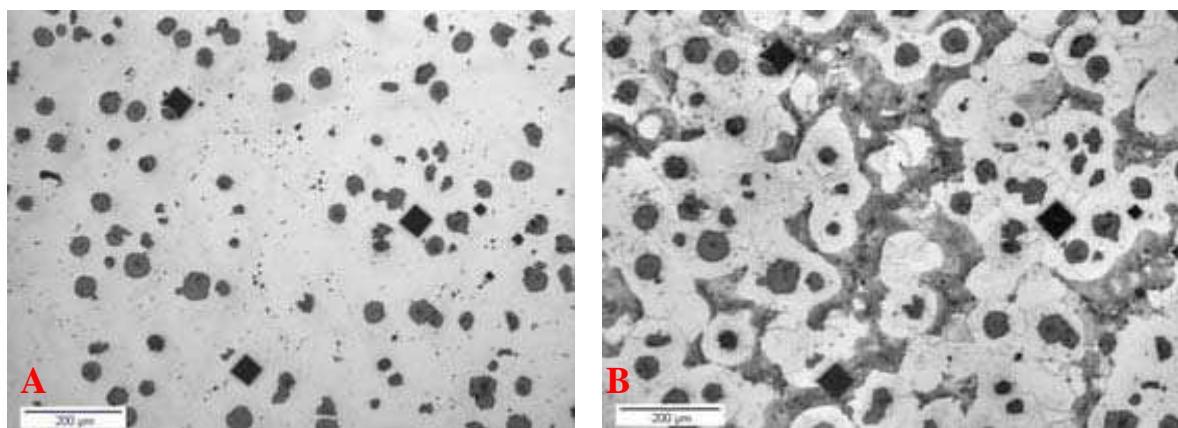


Figura 9: Microscopia de amostra de ferro fundido nodular

A análise comparativa entre o aço e o ferro fundido nodular empregando a técnica de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) é mostrada na figura (10). Como esperado, pode-se verificar uma elevada concentração de cromo no ferro fundido nodular.

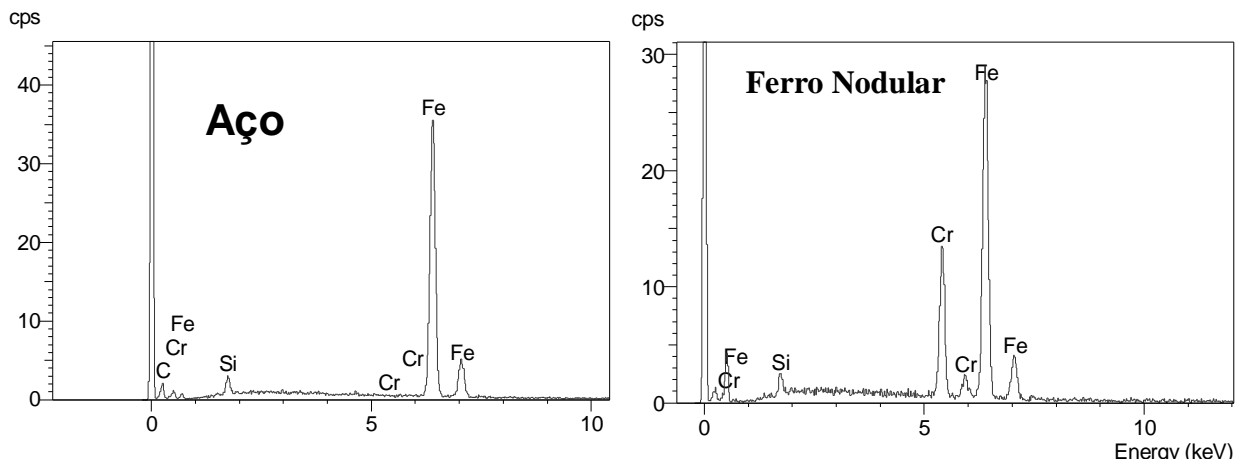


Figura 10: Análises de EDS de amostras de aço e ferro fundido nodular

Quanto às demais análises, fica a sugestão para futuros trabalhos.

6. CONCLUSÕES

O ferro fundido com grafita esferoidal é considerado um grande avanço da tecnologia metalúrgica de fabricação dos fundidos. Conhecido internacionalmente como ferro fundido nodular tornou-se, em algumas aplicações, um substituto do aço principalmente na indústria automobilística.

Testes práticos de fundição mostram que o material não parece ser mais difícil de fundir que o aço e que tal processo é, de fato, mais econômico. Por reciclar a matéria prima (sucata), deve ser considerado como alternativa às técnicas convencionais buscando um desenvolvimento sustentável, a proteção ao meio ambiente e a prevenção da poluição equilibrada com as necessidades socioeconômicas do mundo atual.

Pode-se enumerar algumas características típicas que apontam para o emprego de ferro fundido nodular:

- excelente ductilidade (de até 20% em componentes recozidos);
- tenacidade superior aos dos ferros fundidos brancos e cinzentos;
- limite de escoamento mais alto que os demais ferros fundidos e aços comuns;
- melhor resistência ao impacto e a fadiga que os ferros fundidos cinzentos;
- baixa capacidade de absorver vibrações e

- sua usinabilidade e a resistência ao desgaste, que dependem, basicamente, da microestrutura da matriz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for Testing and Materials – **ASTM E140-02e1 Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness**. New York: 1998. 21 p.

A. ROULA, G.A. KOSNIKOV. **Manganese distribution and effect on graphite shape in advanced cast irons**. *Materials Letters* 62, 2008. 4 p.

BJORKEGREN, L.-E., HAMBERG, K. e JOHANNESSON, B. Propriedades mecânicas e usinabilidade de FoFos nodulares ferríticos endurecidos com silício. **Revista Giesserei-Praxis** n 1, p 16-27, jan. 1999.

CALLISTER, W.D. **Materiais Science and Engineering: An Introduction**. 6th edition. New York: 2003.

CHIAVERINI, V. **“Aços e ferros fundidos”**. 6^a ed., São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1990. 576 pgs.

E. HUG, C. KELLER, J. FAVERGEON K. DAWI. Application of the Monkman–Grant law to the creep fracture of nodular cast irons with various matrix compositions and structures – **Revista Materials Science and Engineering A**, 2009.

G. DYBOWSKI, D. HARTMANN. O uso de sucatas de aço microligados e zincados na produção de ferro fundido. **Revista Giesserei** n.6, p. 50-60, jun. 2004.

G. O. RIBEIRO, J. F. DIAS. **Estudo do comportamento a fadiga de elementos estruturais e de máquinas em Ferro Fundido Nodular Austemperado (ADI) sujeitos a carregamentos de amplitude variável.** 2006.

J. PUPAVA, R. DÖPP, F. NEUMANN. Beitrag zur metallurgischen Bewertung von elektrisch erschmolzenem Gußeisen Mit Lamellengraphit für Automobilguß. **Revista Giesserei-Praxis** n 12, p 489-497, dez. 2003.

M. HUPALO, E. H. CONRAD, M. C. TRINGIDES. **Growth mechanism for epitaxial graphene on vicinal 6H-SiC (0001) surfaces: A scanning tunneling microscopy study.** Jul. 2008.

M. B. DA SILVA, D. F. SANTOS. **Determinação da Usinabilidade do ferro fundido nodular produzido na fundição da A A Eletrotécnica LTDA.** Jun. 2008.

REVISTA FUNDIÇÃO E SERVIÇOS. – Ano 17, N° 170, p 10-11, Fev. 2007.

TELES, J. M. **Torneamento de Ferro Fundido Nodular Ferritizado com Nióbio Utilizando Ferramentas de Metal Duro.** 2007. 124 p.

W. L. GUESSER, D. G. HILÁRIO. **A produção dos ferros fundidos nodulares perlíticos.** Out. 1999.