



Disciplina: <b>Fundição – Ferros Fundidos</b>	Código: <b>TMEC003 DN</b>
Professor da Disciplina: Ramón S. Cortés Paredes, Dr. Eng.	

Complemento para o estudo da Tecnologia de Fundição e de seus principais processos de fabricação por fundição de matéria prima e componentes e/ou peças.

## **DESENVOLVIMENTOS DE FERROS FUNDIDOS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

Adaptado de: Wilson Luiz Guessser e Luís Carlos Guedes, da Indústria de Fundição Tupy. Do trabalho apresentado no Seminário da Associação de Engenharia Automotiva - AEA, São Paulo.

**RESUMO.** Foram apresentadas inovações na tecnologia de fundição de ferros fundidos, focando em materiais, propriedades e aplicações, bem como tendências nas técnicas de fabricação que resultam em alterações de qualidade e custo de componentes fundidos.

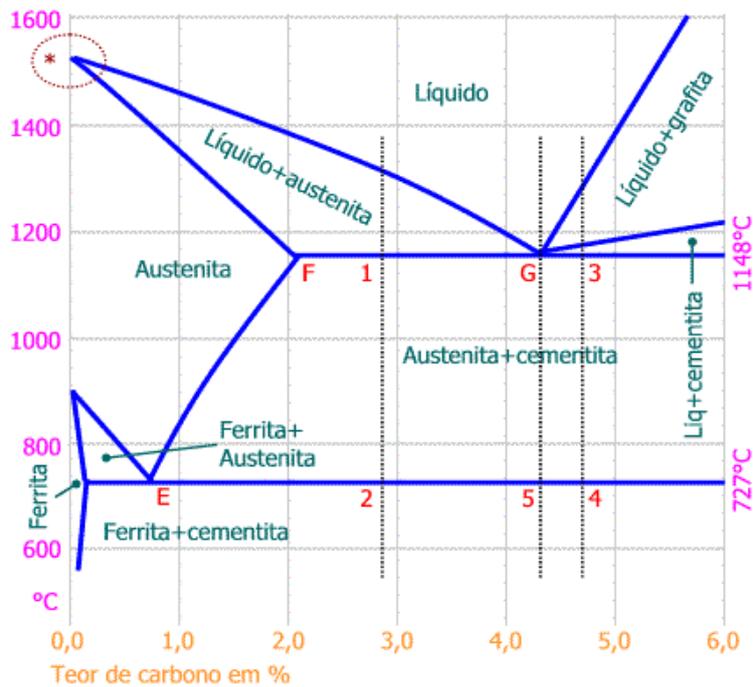
Foram discutidos exemplos de aplicação de peças para altas temperaturas com solicitações de fadiga térmica de ferros fundidos vermiculares e nodulares ligados ao Si e Mo. Apresentam-se também desenvolvimentos em ferros fundidos nodulares bainíticos, inclusive com tratamentos de nitretação visando utilização 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.

Comentam-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**

#### **1.1. Classificação dos Ferros Fundidos**

É o termo genérico utilizado para as ligas Ferro-Carbono nas quais o conteúdo de Carbono excede o seu limite de solubilidade na Austenita na temperatura do eutético. A maioria dos ferros-fundidos contém no mínimo 2% de carbono, mais silício (entre 1 e 3%) e enxofre, podendo ou não haver outros elementos de liga. Na figura 1 observa-se o diagrama de equilíbrio dos ferros fundidos.



**Figura 1.** Diagrama de equilíbrio dos ferros fundidos.

De forma similar aos aços, ferros fundidos podem ser hipoeutéticos, eutéticos ou hipereutéticos, com o valor eutético definido pelo ponto de equilíbrio entre a austenita e a cementita (aprox 4,3%, linha G-5 no diagrama)

#### - Definição:

Quando o ferro fundido eutético é solidificado, logo abaixo do ponto G, há formação de uma estrutura com fundo de cementita e glóbulos de austenita, denominada ledeburita.

Continuando o resfriamento, abaixo de 727°C não poderá mais existir a austenita e, portanto, a ledeburita será composta de glóbulos de perlita sobre fundo de cementita.

Um ferro fundido hipoeutético (1-2) deve apresentar áreas de perlita, ledeburita e cementita.

Um ferro fundido hipereutético (3-4) apresenta cristais de cementita em forma de agulhas sobre fundo de ledeburita.

#### - Classificação

Os ferros fundidos apresentam uma extensa gama de resistências mecânicas e de durezas, e na maioria dos casos são de fácil usinagem.

Através da adição de elementos de liga é possível obter-se excelente resistência ao desgaste, à abrasão e a corrosão, porém em geral a resistência ao impacto e a ductibilidade são relativamente baixas, limitando sua utilização em algumas aplicações.

De acordo com a composição química e com a distribuição de carbono na sua microestrutura, os ferros fundidos podem ser classificados em quatro grandes categorias, na tabela 1 observa-se a composição química da classificação dos ferros fundidos.

- Branco
- Cinzento
- Maleável
- Dúctil

Tabela 1. Classificação e composição química dos Ferros Fundidos não ligados.

Ferros Fundidos	%C	%Si	%Mn	%S	%P
Cinzentos	2,5-4,0	1,0-3,0	0,25-1,0	0,02-0,25	0,05-1,0
Branco	1,8-3,6	0,5-1,9	0,25-0,80	0,06-0,20	0,06-0,18
Maleável	2,0-2,6	1,1-1,6	0,20-1,0	0,04-0,18	0,18 máx.
Dúctil	3,0-4,0	1,8-2,8	0,10-1,0	0,03 máx.	0,10 máx.

Nota: Algumas literaturas fazem também referência aos ferros fundidos misturados (intermediário entre o branco e o cinzento); nodulares (similares ao dúctil) e os especiais (quando observa-se a presença de outros elementos de liga além dos usuais).

## 1.2. Tipos:

1.2.1. FERRO FUNDIDO BRANCO: Praticamente todo carbono se apresenta na forma combinada de carboneto de ferro, mostrando uma superfície de fratura clara. Devido à grande quantidade de cementita, apresentam elevada dureza e resistência ao desgaste.

A produção de ferro fundido branco é baseada na adequação da composição química – teores de carbono e silício – e na velocidade de resfriamento. O coquilhamento é um sistema usado, que consiste em resfriamento do metal líquido em moldes nas condições apropriadas reduzindo bastante o efeito da grafitação.

Estes materiais são empregados em revestimento de moinhos, rodas de trem, cilindros para laminação e britamento de minério entre outras.

Nos ferros fundidos brancos é usual fazer tratamentos térmicos para reduzir as tensões decorrentes das diferentes velocidades de solidificação através das seções da peça. A uniformização da estrutura é fundamental quando essas peças são sujeitas a esforços mecânicos de choque.

1.2.2. FERRO FUNDIDO CINZENTO: Nestes materiais parte do carbono está sob a forma de grafita, o aspecto da fratura é escuro, o que origina o nome.

Suas principais características são:

- fácil fusão e moldagem;
- boa resistência mecânica;
- excelente usinabilidade;
- boa resistência ao desgaste;
- boa capacidade de amortecimento.

As propriedades mecânicas e estrutura do ferro fundido cinzento está intimamente ligada devido à presença de carbono livre (grafita). A forma, distribuição e dimensões dos veios de grafita são determinantes no comportamento do material.

É possível determinar as propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento em função de sua composição química, espessura das peças e forma de apresentação da grafita.

O tratamento térmico nos ferros fundidos cinzentos têm por objetivo melhorar suas propriedades, os mais comuns são: alívio de tensões ou envelhecimento artificial; recozimento, para melhorar a usinabilidade; normalização e têmpera com revenido, atuando na resistência à tração e dureza melhorando a resistência ao desgaste.

1.2.3. FERRO FUNDIDO MALEÁVEL: É um material derivado do ferro fundido branco através de um tratamento térmico – maleabilização – que torna a liga mais tenaz, dúctil e aliado às propriedades iniciais do material, amplia sua aplicação.

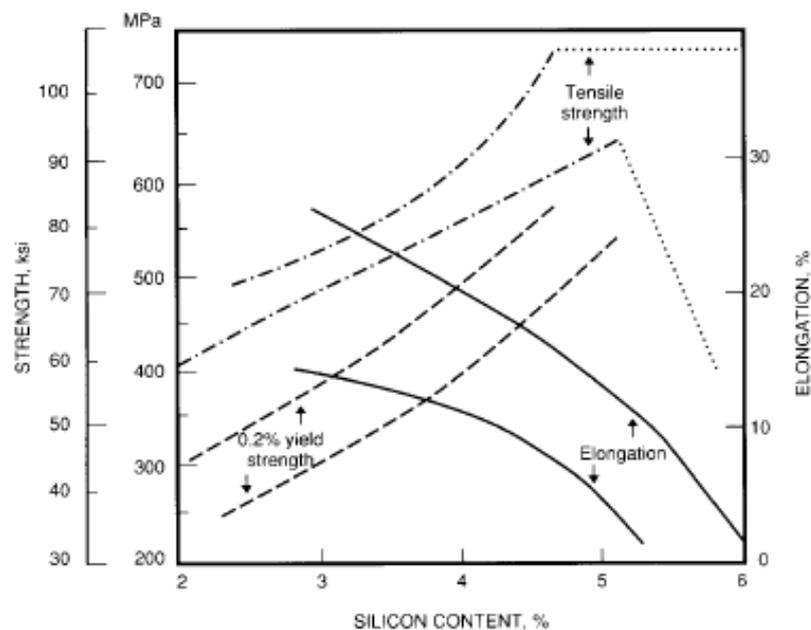
O processo de maleabilização consiste em aquecimento prolongado, em condições de temperatura, tempo e meio adequadas, provocando a transformação total ou parcial do carbono combinado em grafita. Sua característica principal é sua ductilidade, podendo ultrapassar a 10% do alongamento. Este material é intermediário entre o aço e o ferro fundido branco.

O ferro fundido maleável é empregado em conexões para tubulação hidráulicas, conexões para linhas de transmissão elétrica, sapatas de freios, etc.

1.2.4. FERRO FUNDIDO NODULAR: As estruturas contendo grafita em veios são indesejáveis sob o ponto de vista de algumas propriedades mecânicas. A adição de pequenos teores de elementos como Mg, Ca, Ce a um ferro fundido comum produz grafita em forma de nódulos quase esféricos. O magnésio retarda a formação inicial de grafita, o ferro fundido branco solidifica com a formação de cementita. Depois da adição do magnésio, a cementita se decompõe e a grafita se desenvolve por igual em todas as direções. Estes materiais caracterizados pela ductilidade, tenacidade, e resistência mecânica, destacando o elevado limite de escoamento.

### Influência de Elementos de Liga

Alguns elementos de liga, tais como o Si, Ni, Cu, favorecem a formação de estrutura grafítica (estável), sendo destes o Silício o mais importante, pois aumenta a velocidade de decomposição da cementita. Na figura 2 observa-se a influência do Silício nas propriedades dos ferros fundidos.



Influence of silicon on the room temperature mechanical properties of ferritic Ductile Iron.

Figura 2. Influência do Silício nas propriedades dos ferros fundidos

O Silício influencia nas propriedades mecânicas do ferro fundido dúctil à temperatura ambiente através da formação de solução sólida e endurecimento da matriz ferrítica.

Elementos como H, B, N, S, Cr, Mo, Mn mesmo em pequenas quantidades favorecem a obtenção de carbonetos, resultando numa estrutura metaestável típica dos ferros fundidos brancos

O Silício influencia nas propriedades mecânicas do ferro fundido dúctil à temperatura ambiente através da formação de solução sólida e endurecimento da matriz ferrítica.

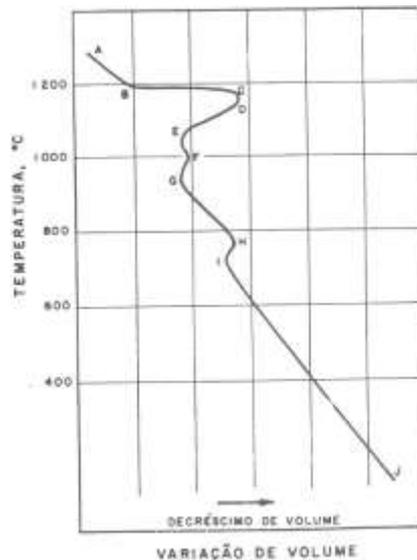
O **enxofre** quando combinado com o ferro formando o FeS tende a ser muito prejudicial devido ao seu baixo pontos de fusão. Seu efeito pode ser controlado através da adição de Mn, que favorecerá a formação do MnS, muito estável e com elevado ponto de fusão.

O Cromo é forte estabilizador de carboneto; porcentualmente em pêso, favorece a obtenção de um ferro fundido branco com o mesmo poder que o silício favorece a de um cinzento. Altos teores de Si combinados com o Mo tendem a elevar significativamente os limites de resistência dos ferros fundidos dúcteis e cinzentos, bem como melhorar seu comportamento à fluência

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. Tratamentos Térmicos

O Tratamento Térmico mais generalizado é o alívio de tensões, aplicado em peças fundidas as quais, durante o resfriamento desde a solidificação no interior dos moldes até a temperatura ambiente, estão sujeitas a constantes mudanças de volume (ver figura 3 abaixo), o que constitui, juntamente com a forma geométrica e volumes das peças, uma das principais causas de tensões internas.



Onde:

- AB – contração no estado líquido;
- BC – contração na mudança do estado líquido para o sólido;
- CD – contração pela mudança da austenita em ledeburita;
- DE – expansão pela grafitação;
- EF – contração pela queda de temperatura;
- FG – expansão pela mudança da steadita ternária à forma binária;
- GH – contração contínua pela queda da temperatura;
- HI – expansão pela transformação da fase gama a alfa e da austenita em perlita
- IJ – contração continuada pelo resfriamento até a temperatura ambiente.

Figura 3. Variação de volume em função da temperature na solidificaçõ dos ferros fundidos.

O “alívio de tensões” ou “envelhecimento” das peças de ferro fundido foi durante muito tempo, executado de forma natural, deixando-se as peças fundidas ao relento durante meses, para posterior usinagem e/ou colocação em serviço. Todavia, estudos comprovaram que por meio desta técnica apenas 10% das tensões residuais eram eliminadas.

O alívio de tensões “induzido” consiste basicamente no aquecimento das peças preferencialmente em forno numa temperatura entre 550° e 650°C durante um período de tempo que poderá variar entre 1,0 e 48,0 horas a depender do objetivo e aplicação da peça, seguido de resfriamento lento normalmente dentro do próprio forno.

Na figura 4 ao lado pode-se observar que basta-se manter as peças durante 1,0h para que cerca de 80% das tensões residuais sejam aliviadas sem que ocorra qualquer transformação estrutural. Aplicando-se entre 10 e 48hs praticamente 100% das tensões são aliviadas.

Ferros fundidos ligados, com baixo teor em ligas (Cr, Mo, Ni e V) exigem temperaturas mais altas devido a tendência destes elementos aumentarem a resistência à fluência.

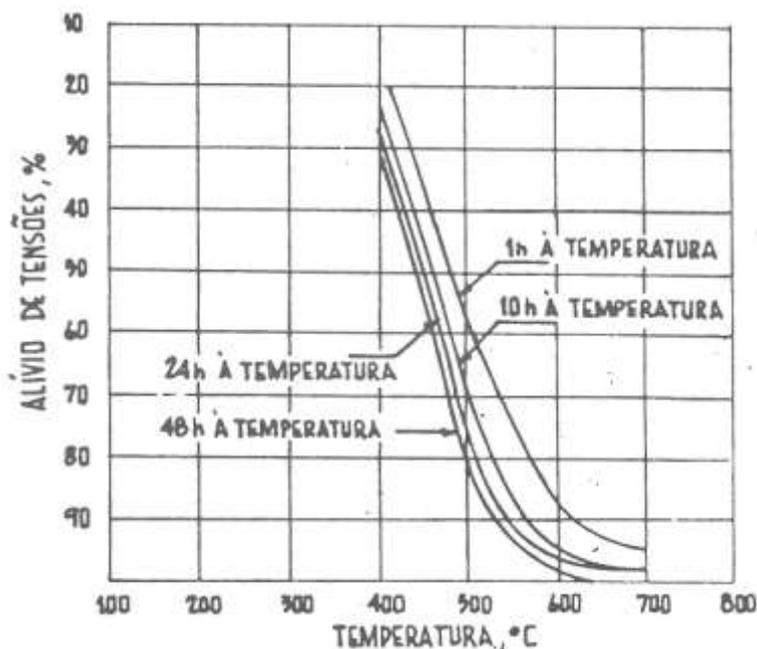


Figura 4. Efeito da temperatura no alívio de tensões dos ferros fundidos.

O Recozimento objetiva melhorar ainda mais a usinabilidade dos ferros fundidos, e muitas vezes faz-se necessário para eliminar ou amolecer zonas coquilhadas que podem ter surgido durante a solidificação, especialmente em seções mais finas. Isto muitas vezes implica na queda das suas propriedades relacionadas com a resistência mecânica. Diferentes técnicas de recozimento podem ser adotadas, em função do material e da sua aplicação, como observado na figura 5.

O recozimento completo ou pleno ocorre numa faixa de temperatura entre 780°C a 900°C e é recomendado quando o ferro fundido apresenta os elementos de liga em teores mais elevados, objetivando-se a eliminação de pequenas quantidades de carbonetos dispersos.

- O recozimento a baixas temperaturas, entre 700°C e 760°C, chamado de recozimento de ferritização, objetiva a transformação dos carbonetos perlíticos em ferrita e grafita, de modo a melhorar a usinabilidade. Normalmente destinado a ferros fundidos não ligados ou com baixos teores de liga. O tempo de encharque depende da quantidade de grafitização desejada.

- O recozimento grafitizante, destinam-se a ferros fundidos que apresentam carbonetos maciços (em geral brancos ou mesclados), requerendo temperaturas entre 900°C a 950°C. Cuidado especial deve ser tomado quanto ao percentual de fósforo na liga, pois o eutético de fósforo pode fundir nestas temperaturas.

A Normalização dos ferros fundidos visa obter uma matriz homogênea, com eliminação dos carbonetos maciços, totalmente perlítica, de granulação fina e propriedades correspondentes a uma maior resistência mecânica, aliada a boa tenacidade.

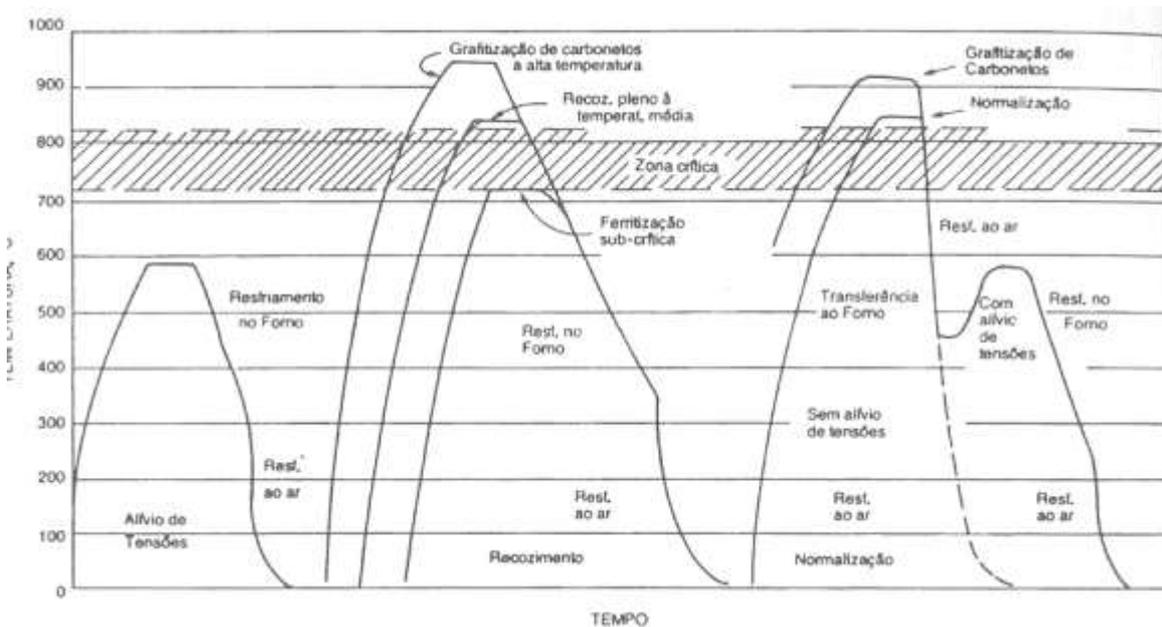


Figura 5. Diferentes técnicas de tratamentos térmicos. A figura ilustra os ciclos de alívio de tensões, dos diversos tipos de recozimento e normalização aplicáveis em ferros fundidos.

Nota: A etapa de aquecimento é idêntica aos diferentes tratamentos, devendo o tempo de encharque ser de no mínimo 24min/centímetro de seção da peça, seguido de resfriamento ao ar, numa velocidade tal que evite o início da ferritização em torno dos veios de grafita, mas não deve ser tão rápida que possibilite a formação de bainita ou mertensita.

**Austêmpera**, é uma forma de tratamento térmico de têmpera indicada para aços de alto teor de C (Carbono), obtendo-se ao final do processo um material com dureza mais baixa do que a da martensita, denominado bainita.

O material é aquecido acima da zona crítica, assumindo a fase de austenita, e depois resfriado em duas etapas. A primeira etapa é um resfriamento rápido até uma temperatura ligeiramente acima da temperatura da mudança de fase da martensita ↔ austenita (normalmente o material é mergulhado em sal fundido). O material permanece nesta temperatura pelo tempo necessário a completar a mudança de fase austenita → bainita. Depois é resfriado até a temperatura ambiente.

Aços austemperados tem, como principal característica, a associação de elevada dureza com uma maior tenacidade, quando comparados com os aços temperados e revenidos. A austêmpera é frequentemente aplicada em anéis elásticos, pinos elásticos, alguns tipos de molas e peças pequenas, que necessitem de boa tenacidade.

Tratamento isotérmico especial utilizado para materiais que não podem sofrer alterações dimensionais e necessitam de efeito mola. O **processo consiste em aquecer o material até a sua temperatura de austenitização**, seguido de um resfriamento rápido em banho de sal fundido até a faixa de formação de bainita, é necessário permanência nessa temperatura até completa transformação. Indicado para peças que necessitam de alta tenacidade – efeito mola. Nas seguintes figuras 6,7 e 8 observa-se diferentes tratamentos de austempera para o mesmo objetivo.

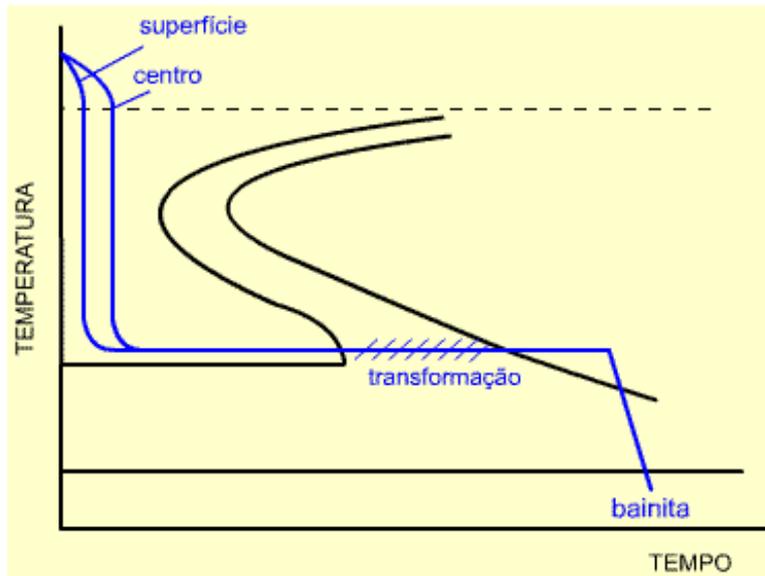


Figura 6. Tratamento térmico de Austempera.

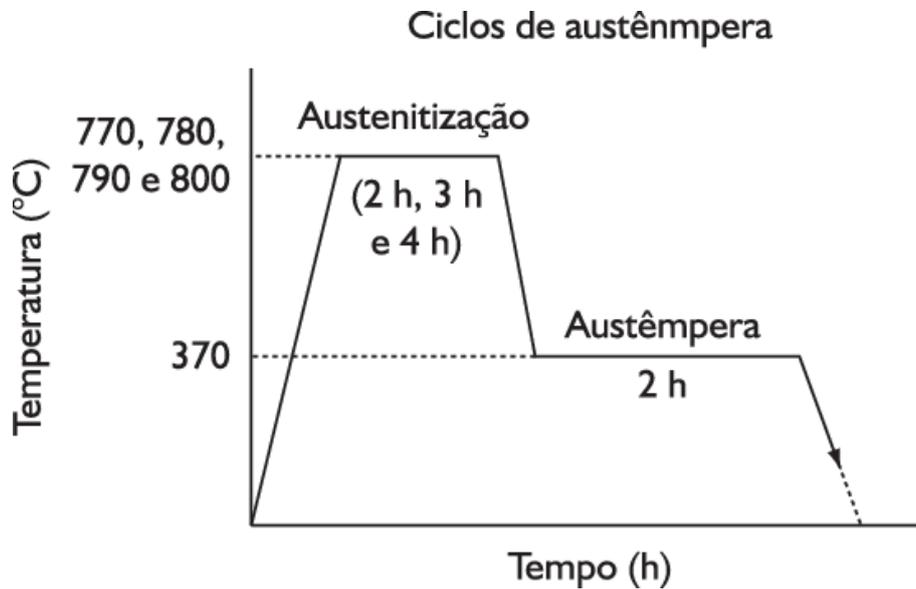


Figura 7. Tratamento térmico de Austempera – Temperaturas e tempos.

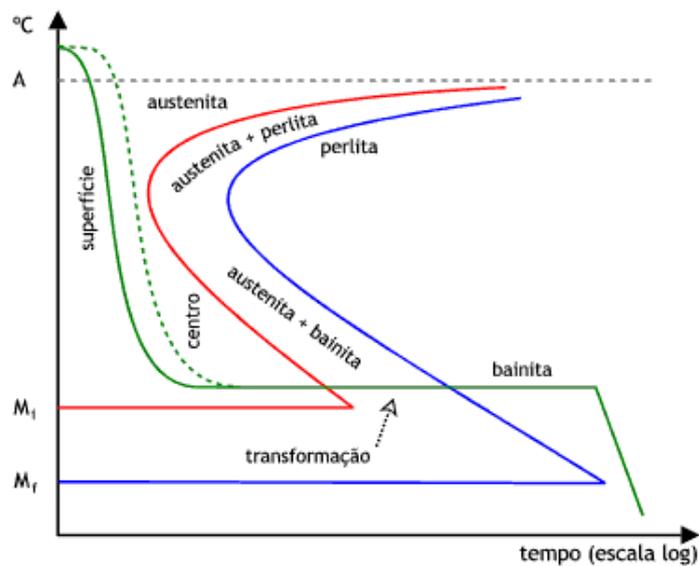


Figura 8. Transformação durante o Tratamento Térmico de Austempera.

### 3) APLICAÇÕES A ALTAS TEMPERATURAS

O uso de ferros fundidos nodulares ferríticos, contendo Si e Mo como elementos de liga, tem se confirmado em aplicações para altas temperaturas, tais como coletores de exaustão e carcaças de turbo compressores (1, 2) (figura 9). A tabela 2 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 3), porém diminuem a ductilidade e a usinabilidade, de modo que o teor deste elemento é geralmente ajustado para cada aplicação específica.

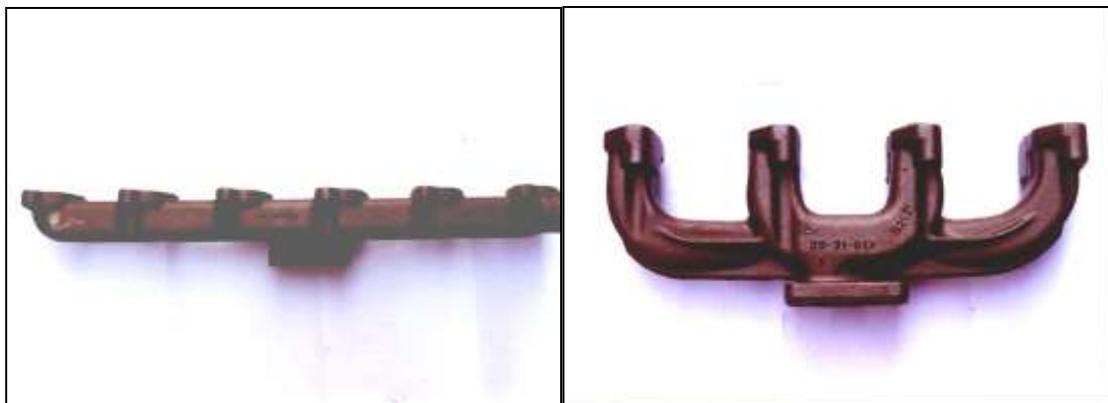


Figura 9- Coletores de exaustão de motores diesel. Ferro fundido nodular SiMo.

Tabela 2 - 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 3 - 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 (figura 10). O seu uso em coletores de escapamento já é consagrado (5), normalmente ligado com Si e Mo (figura 11), mencionando-se também o seu potencial em discos e tambores de freio (7,9).

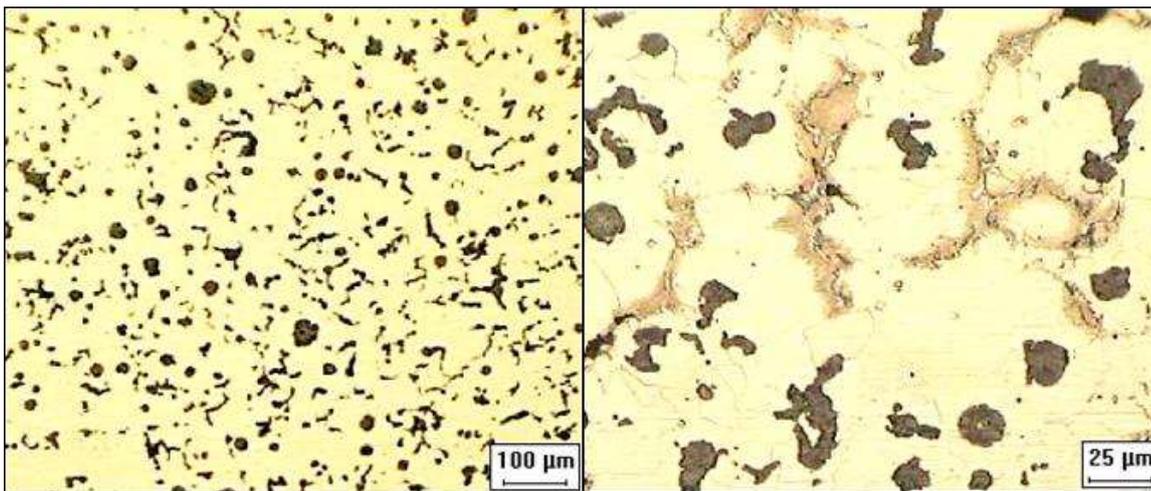


Figura 10 - Microestrutura típica de ferro fundido vermicular ligado ao Si e Mo. Grafita em forma de vermes, com algumas partículas nodulares. Carbonetos intercelulares de Mo, associados a perlita. Matriz predominantemente ferrítica.



Figura 11 – 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).

## 4) APLICAÇÕES DOS FERROS FUNDIDOS ESPECIAIS

### 4.1. 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 virabrequins 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.

### 4.2. 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 (figuras 12 e 13). 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).

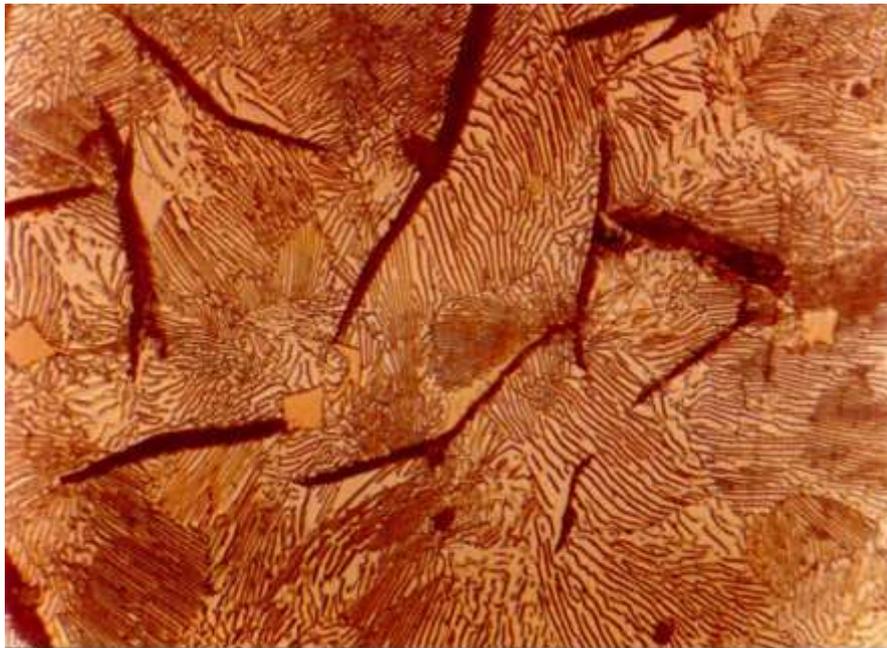


Figura 12 - Microestrutura de camisa de cilindro. Ferro fundido cinzento resistente ao desgaste, ligado ao Nb e P. Grafita em veios, partículas de carbonetos de nióbio e de fosfetos, matriz perlítica.



Figura 13 - Microestrutura de ferro fundido cinzento ligado ao titânio. Grafita em veios, partículas de carbonitretos de titânio, matriz perlítica.

#### 4.3. 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 boa resistência mecânica e 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).

#### 4.4. 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 (figura14), envolvendo solicitações de impacto e de fadiga.



Figura 14 - Peças em diversas classes de ferros fundidos nodulares. Componentes de freio (FE-50007), biela (FE-60003), braço de suspensão (FE-40015).

#### 5) TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

Modernos tratamentos superficiais tem sido aplicados a componentes de fofo, como refusão superficial de eixos comando pelo processo de soldagem TIG, deposição de camadas empregando laser (27) ou ainda nitretação de diferentes classes de fofo 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 virabrequins de ferro fundido nodular de matriz perlítica.

## **6) 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 (figura 15). 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 15 - Capas de mancal em ferros fundidos cinzento e nodular, obtidas por fundição contínua.

## 7) 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 erhoelten 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 expèrience industrielle. Fonderie - Fondateur 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. 15º Congresso Anual ABM, Rio de Janeiro, 1985.
- 15) Mannes, W. et all. Erprobung von Zahnraedern aus unlegiertem bainitischen 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 Werksotoff 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 Widmansttaeten 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 Nitrocarburiereen. 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.