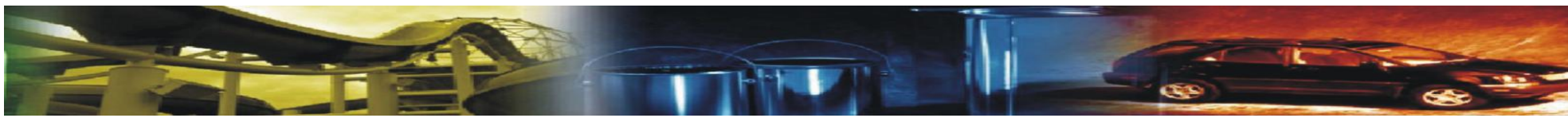


Ferros Fundidos

Scheid, A.
DEMEC-UFPR



Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

Etapas básicas:

- 1- Fusão
- 2- Inoculação
- 3- Adição de elementos de liga
- 4- Vazamento

1- Fusão:

“o processo de fusão consiste de uma transformação física do estado sólido para o líquido, acompanhado de uma série de reações de oxidação-redução”.

Os materiais que formam a carga determinarão a **composição química** da liga de ferro e da escória formada. Uma vez que a composição afeta a microestrutura e as propriedades mecânicas do ferro fundido, deve ser controlado o teor de elementos de liga e impurezas na composição inicial da carga.

Pode ser realizado em: forno cubilô, indução coreless ou indução a canal e forno elétrico a arco.



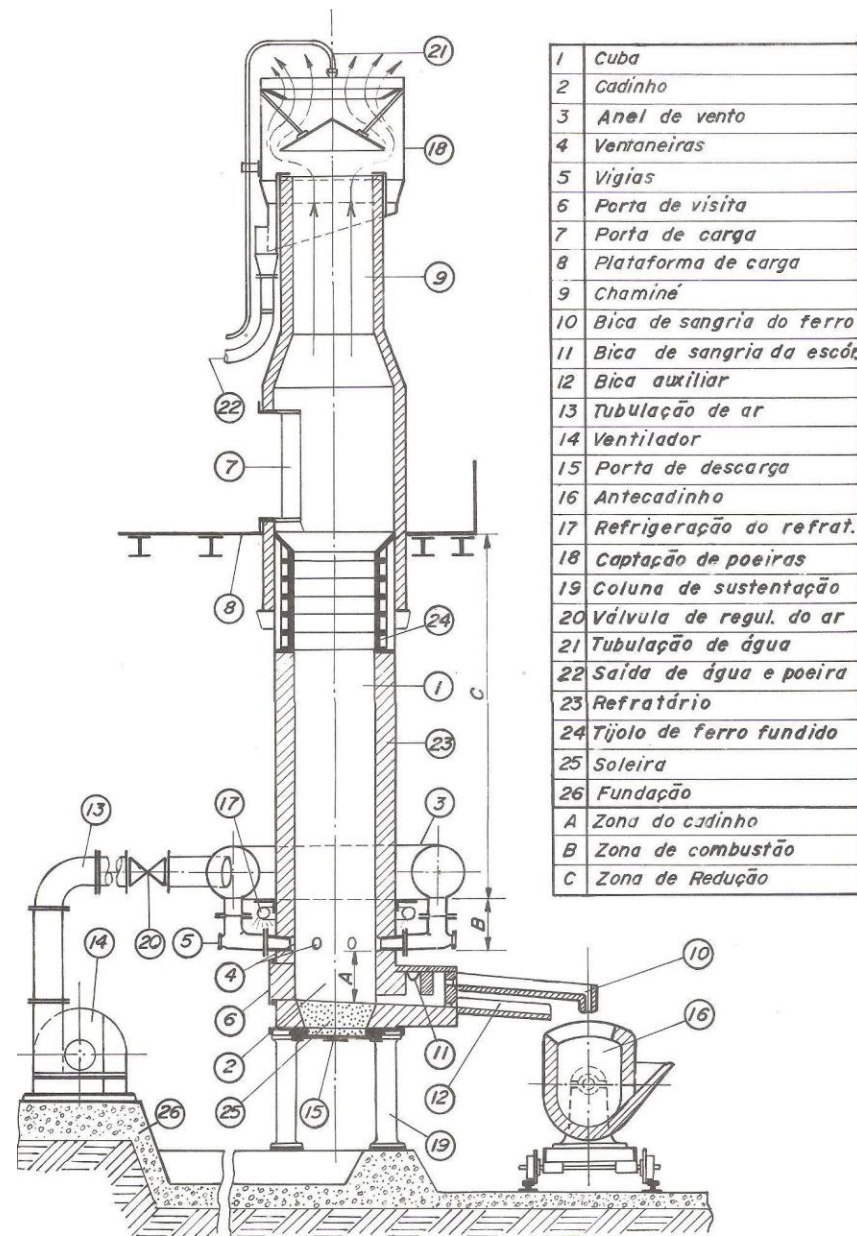
Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

Forno cubilô

A combustão se processa mais intensamente na região situada logo acima do cadinho, onde a oxidação do coque é efetuada pelo oxigênio do ar soprado. Nesta zona, chamada de **zona de oxidação**, os gases são altamente oxidantes e nela ocorre também a oxidação do silício e manganês, que também é acompanhada pela liberação adicional de calor, superaquecendo o ferro fundido que goteja no cadinho (**detalhe B**).

Abaixo da zona de oxidação está localizado o cadinho que, em condições normais apresenta gases em equilíbrio com o carbono do coque e consiste quase exclusivamente de CO (**detalhe A**).

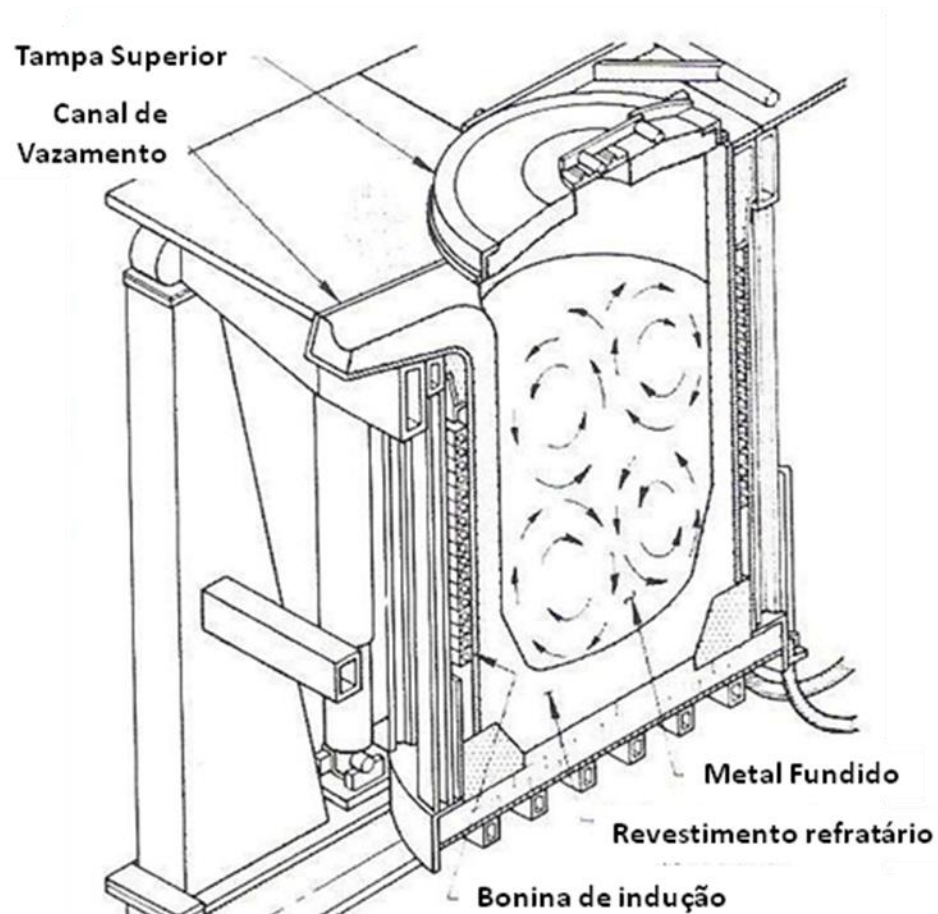
Acima da zona de oxidação está situada a zona de redução e nela ocorre a redução do CO_2 para CO, havendo uma queda de temperatura (**detalhe C**). Dentro desta zona que, em geral, a fusão inicia e termina (zona de fusão).



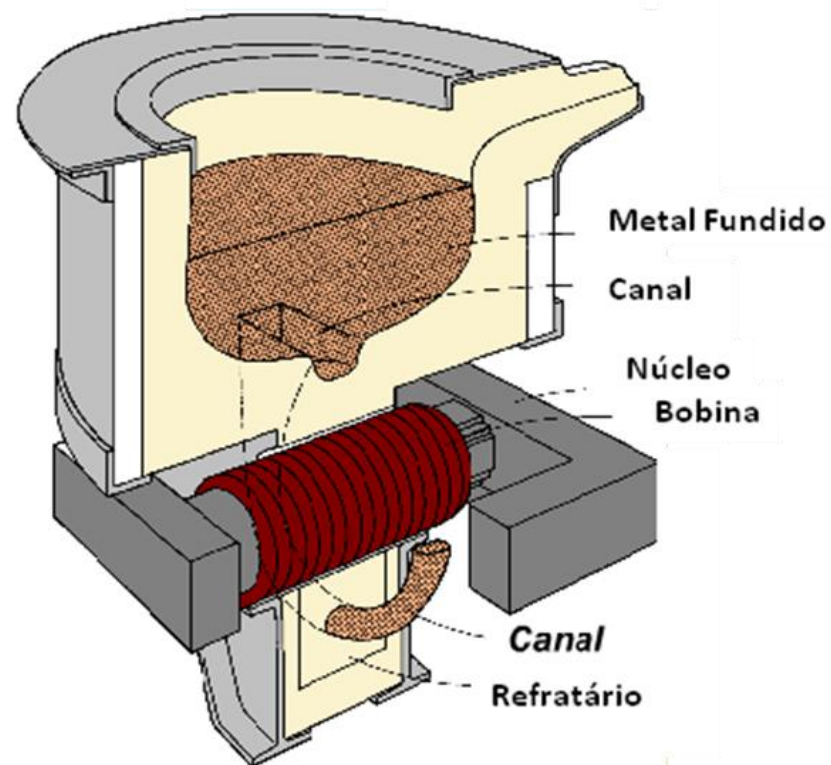


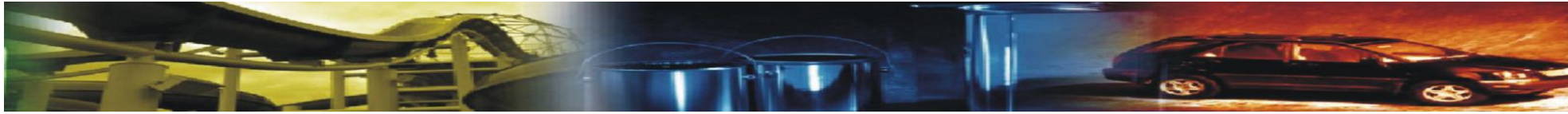
Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

Forno Indução coreless ou indução a canal



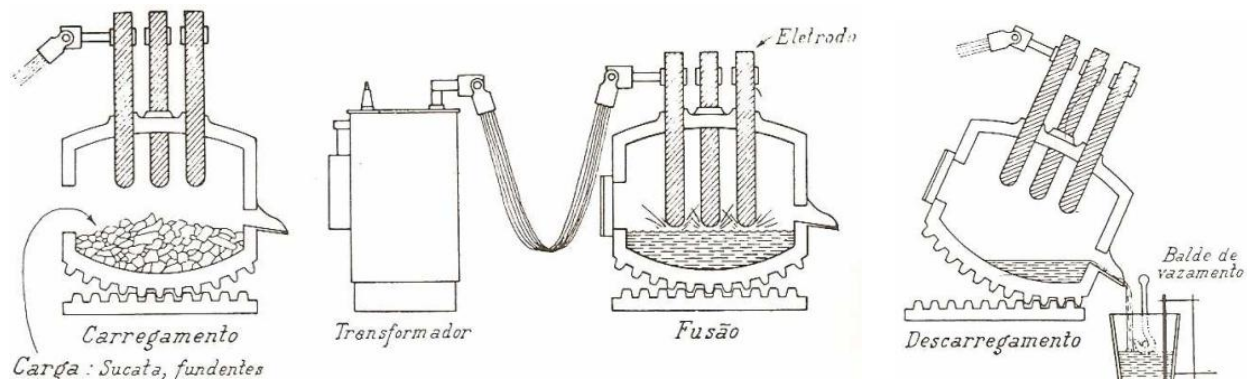
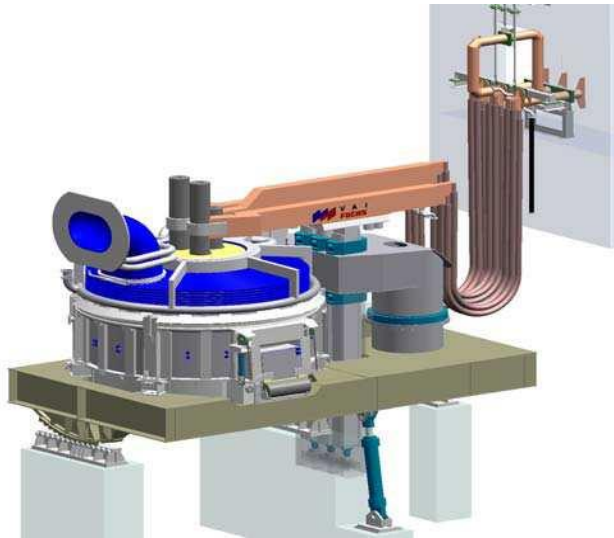
(a)

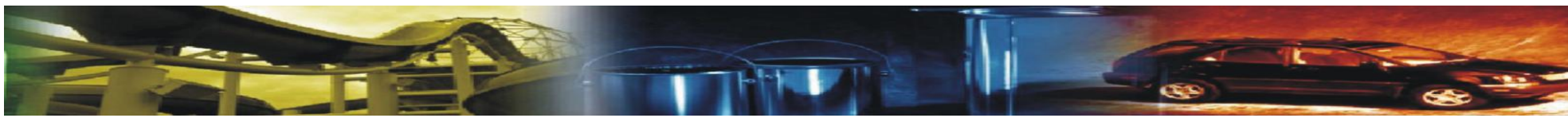




Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

Forno Elétrico a Arco





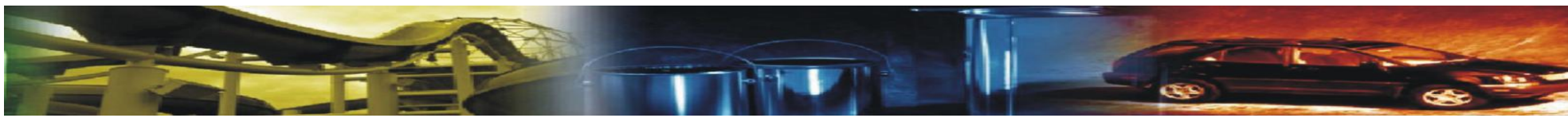
Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

Dessulfuração

O Carbureto de Cálcio é utilizado para a produção de ferros fundidos de baixo teor de enxofre, e maior valor agregado. Pode ser aplicado diretamente na carga de fornos cubilô substituindo, parcialmente, o coque metalúrgico e calcário e permitindo o uso de coque metalúrgico nacional de maior teor de cinzas, além de uma maior participação de sucata na carga metálica, implicando "maiores temperaturas de bica", aumento de produtividade e do rendimento de ligas metálicas.

Na produção de ferro fundido nodular, é fundamental que o ferro fundido esteja dessulfurado, de modo a aumentar-se o potencial de nodularização das ligas de magnésio.

É comum também a utilização em fornos de indução e, como agente dessulfurante, pode ser realizada a injeção de CaC_2 através de lança refratária usando-se o nitrogênio como gás de transporte, ou ainda em processos de plug poroso, através da adição direta.



Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

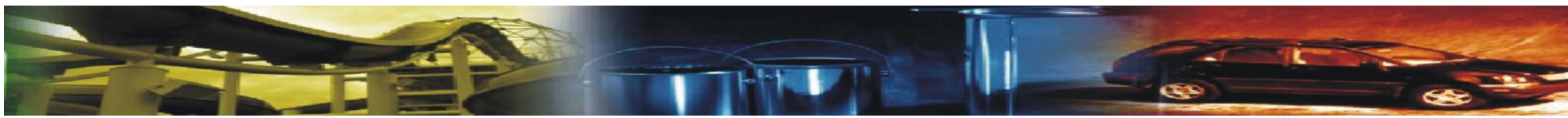
Matérias-primas na produção de ferros cinzentos:

As principais matérias-primas usadas na produção de ferros fundidos cinzentos são o **ferro-gusa, a sucata de aço e ferros fundidos, retornos de processo e ferro ligas.**

O **ferro-gusa** é uma das principais fontes de ferro utilizadas na produção dos ferros fundidos e apresenta teor de carbono entre 3,2 e 4,6% e teor de silício entre 0,5 e 3,0%, podendo apresentar variações de lote para lote.

Controles usualmente adotados na produção de ferros fundidos cinzentos:

- Análise Química
- Pirometria
- Metalografia
- Ensaio Mecânicos
- Prova de Coquilhamento

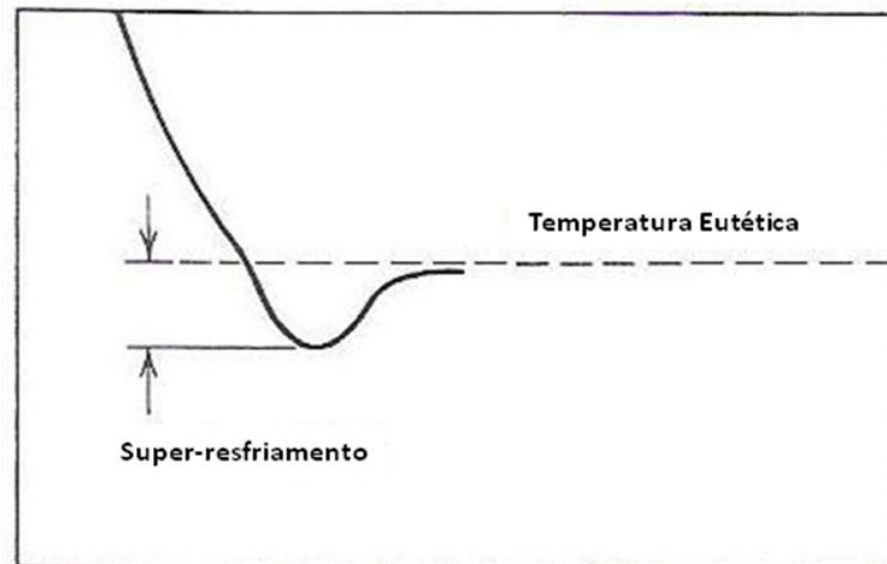


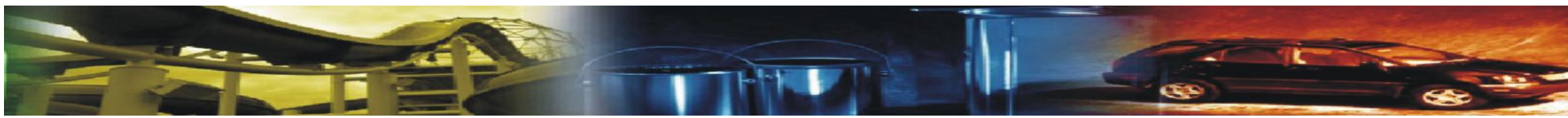
Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

Inoculação:

A inoculação é definida com o a última adição de silício ligas ao metal fundido a fim de produzir mudanças na distribuição da grafita, melhorias nas propriedades mecânicas e **redução da tendência ao coquilhamento**.

O propósito central da inoculação é aumentar o número de núcleos no metal fundido de tal maneira que a solidificação eutética, especialmente precipitação de grafita, possa iniciar com uma mínima quantidade de super-resfriamento.

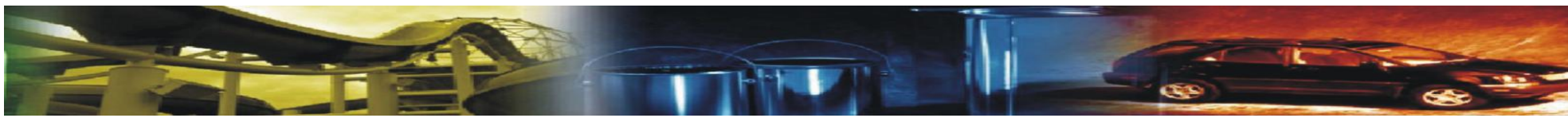




Processo de Fabricação de Ferros Fundidos Inoculação:

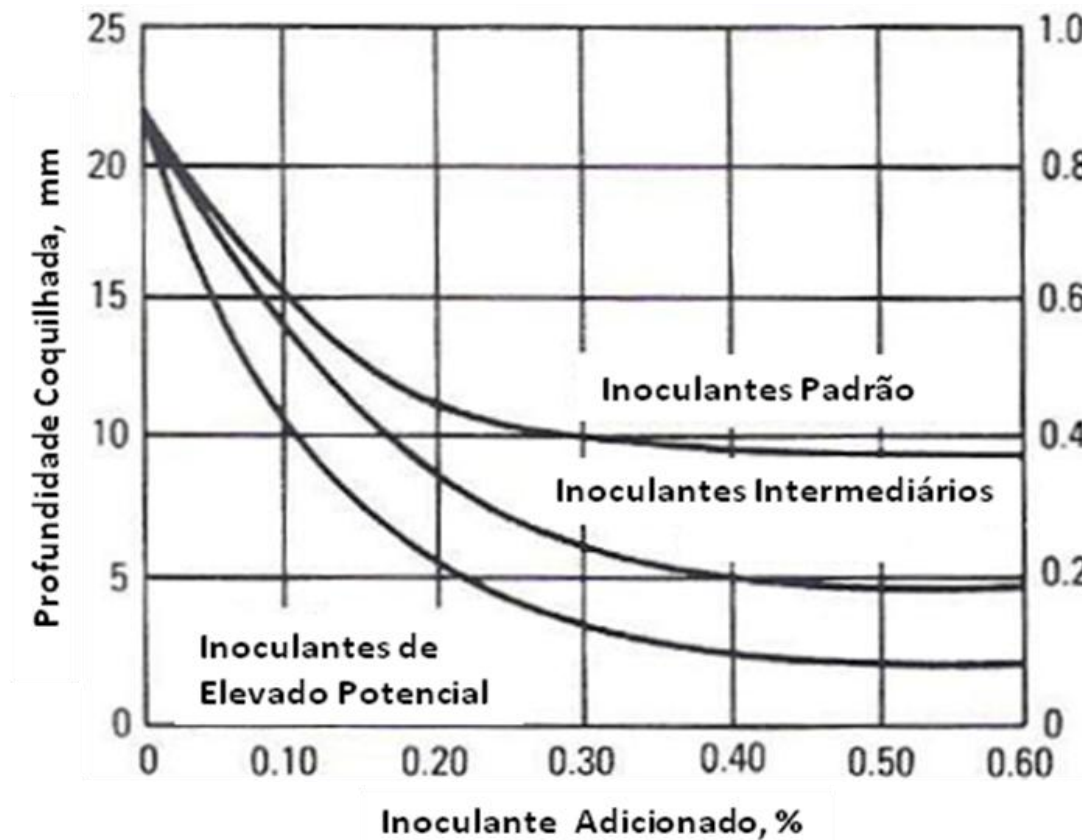
Desempenho	Si	Al	Ca	Ba	Ce	TER	Ti	Mn	Sr	Outros
Padrão	46-50	0,5-1,25	0,6-0,9	---	---	---	---	---	---	---
	74-79	1,25m	0,5-1,0	---	---	---	---	---	---	---
	74-79	0,75-1,5	1,0-1,5	---	---	---	---	---	---	---
Intermediário	46-50	1,25m	0,75-1,25	0,75-1,25	---	---	---	1,25m	---	---
	60-65	0,8-1,5	1,5-3,0	4-6	---	---	---	7-12	---	---
	70-74	0,8-1,5	0,8-1,5	0,7-1,3	---	---	---	---	---	---
	70-74	0,8-1,5	0,8-1,5	0,75-1,25	---	---	---	---	---	---
	42-44	---	0,75-1,25	---	---	---	9-11	---	---	---
	50-55	---	5-7	---	---	---	9-11	---	---	---
	50-55	---	0,5-1,5	---	---	---	9-11	---	---	---
Elevado	36-40	---	---	---	9-11	10,5-15	---	---	---	---
	46-50	0,50m	0,10m	---	---	---	---	---	0,6-1,0	---
	73-78	0,50m	0,10m	---	---	---	---	---	0,6-1,0	---
Estabilizante	6-11	0,50m	0,50m	---	---	---	---	---	---	48-52 Cr

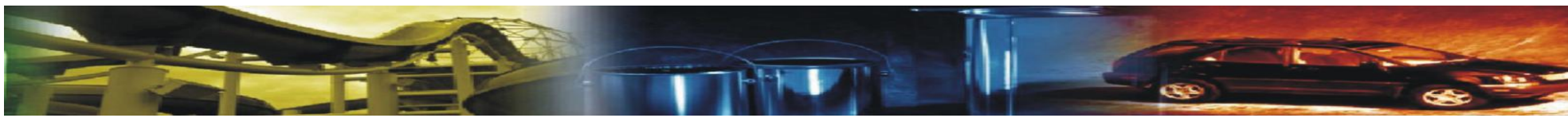
O balanço é de ferro / m = máximo valor.



Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

Inoculação: Influência do inoculante sobre o coquilhamento.





Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

Elementos de Liga:

Na maioria dos casos, os **elementos de liga** adicionados aos ferros fundidos cinzentos **elevam a resistência mecânica e promovem a formação de matriz perlítica**.

- Cromo

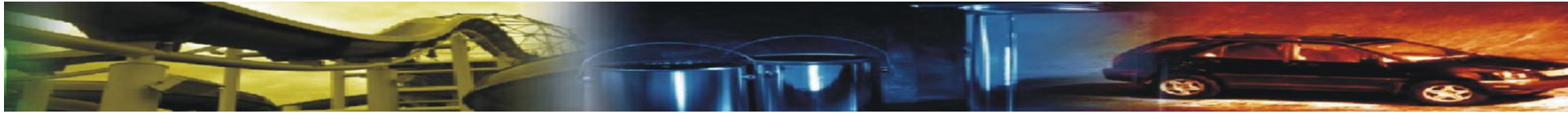
Pequenas adições de cromo (0,5 – 0,75% em peso) elevam a resistência mecânica de ferros cinzentos. Também promove a formação de matriz perlítica, elevando a dureza. Por ser elemento formador de carbonetos, pode levar ao coquilhamento de seções delgadas.

- Cobre

Eleva a resistência mecânica dos ferros cinzentos, por meio da promoção de matriz perlítica, em teores entre 0,25 a 0,5% em peso. Cobre apresenta um efeito médio de grafitização, não promovendo o coquilhamento de seções pouco espessas. Deve ser de elevada pureza a fim de evitar adição de chumbo como contaminante.

- Níquel

Adição de até 2% induz pequeno aumento na resistência mecânica, não promove a formação de carbonetos e tem efeito grafitizante mínimo. Não tem sido relatados problemas de dissolução durante a sua adição.



Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

Elementos de Liga:

Na maioria dos casos, os elementos de liga adicionados aos ferros fundidos cinzentos elevam a resistência mecânica e promovem a formação de matriz perlítica.

- Molibdênio

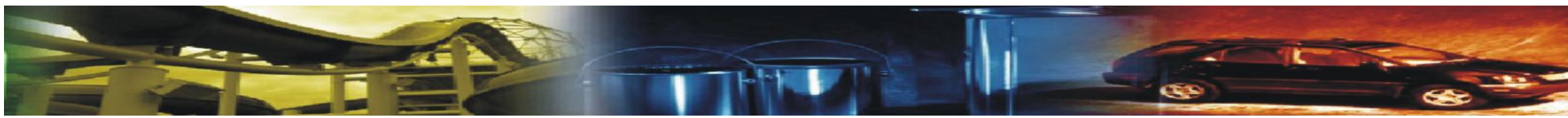
Na faixa de 0,25 a 0,75% em peso induz significativamente uma elevação da resistência mecânica como resultado do refinamento da grafita em veios e do endurecimento da matriz. Não promove a formação de carbonetos.

- Estanho

Na faixa entre 0,025 e 0,10% em peso é um elemento estabilizador do microconstituente perlita. Promove aumento da resistência em ferros fundidos que contém ferrita na matriz, por meio do aumento da fração de perlita. Deve-se cuidar com contaminações de antimônio, bismuto e chumbo que podem vir com este elemento. Portanto, deve ser preferido o estanho puro.

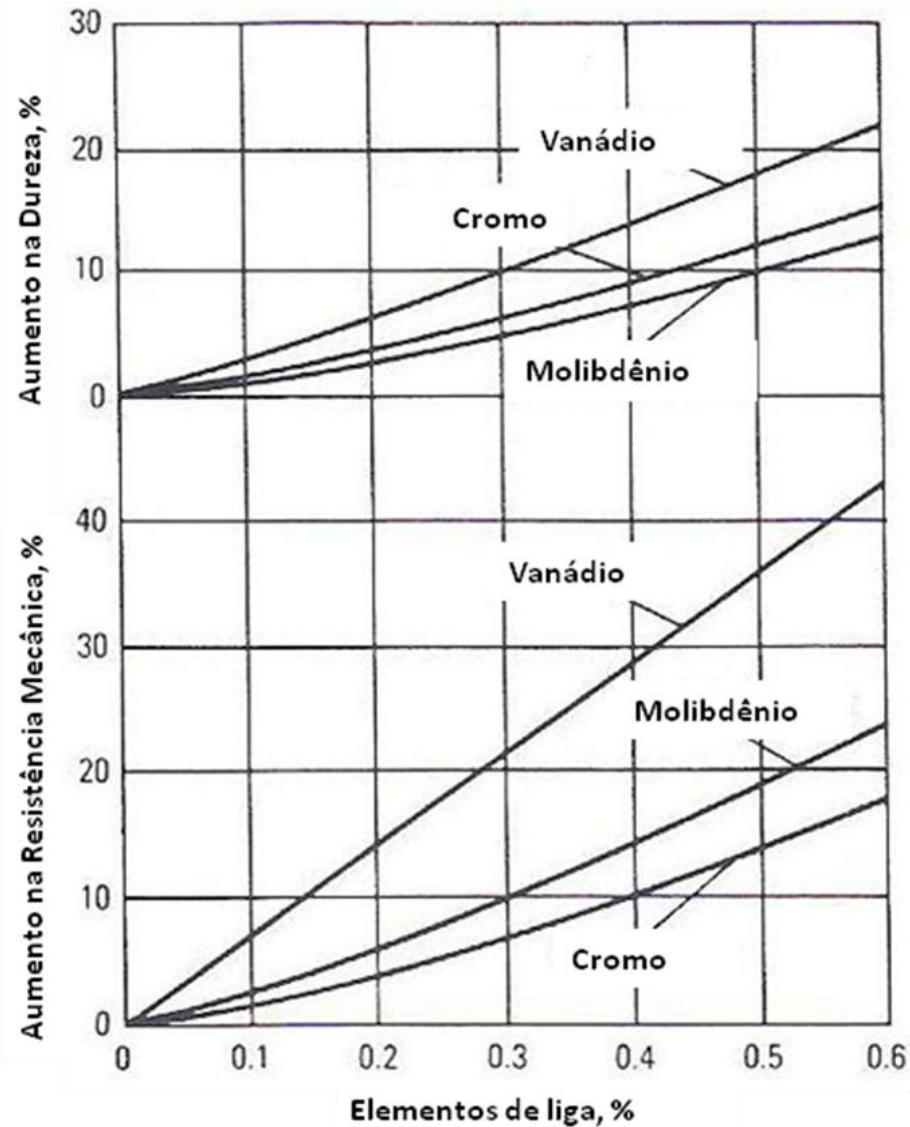
- Vanádio

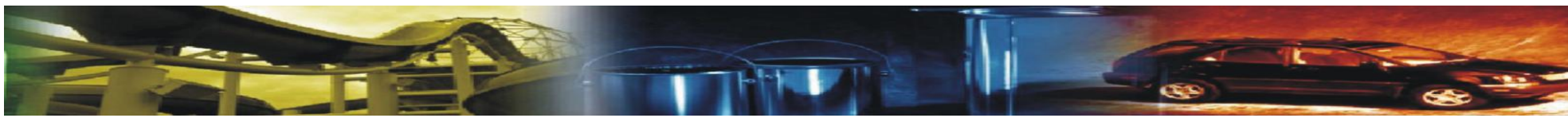
Adicionado em pequenas quantidades, o vanádio eleva a dureza e a resistência mecânica. Este elemento adicionado promove a manutenção da dureza durante recozimento.



Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

Elementos de Liga





Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

- Vazamento:

A temperatura do metal fundido, a limpeza e as técnicas de vazamento são variáveis essenciais no controle do vazamento de ferros fundidos cinzentos.

Primeiramente, a **remoção da escória e da borra** (dross) da superfície do banho de metal líquido reduz o potencial de formação de defeitos tipo inclusões.

Cada técnica de vazamento deve permitir que o operador mantenha um **fluxo constante de metal**, suficiente para assegurar que os canais estejam cheios até o fim do vazamento.

O metal fundido deve apresentar suficiente **superaquecimento a fim de permitir o completo enchimento do molde**, evitando assim a geração de defeitos relacionados à temperatura. A **fluidez** do ferro fundido é diretamente relacionada ao superaquecimento, assim finas seções precisam de maior superaquecimento em relação a seções espessas para um adequado preenchimento.

Ferros fundidos vazados com insuficiente superaquecimento apresentam cavidades parcialmente preenchidas, enchimento incompleto do molde, bolhas de gás e coquilhamento.



Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

Defeitos:

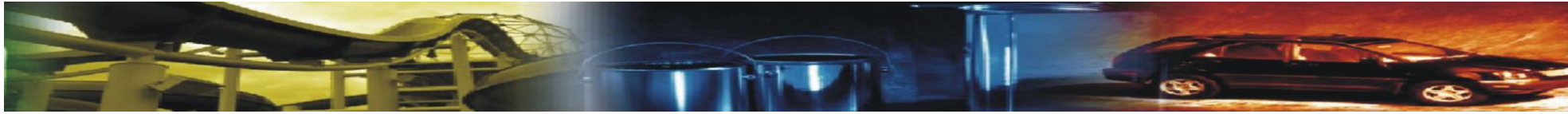
Rechupes podem ser isolados ou interconectados. Em muitos casos, podem ser vistas dendritas de solidificação.



Fatores que levam a rechupes

- 1- falta de rigidez do molde (alargamento do molde levando a falta de alimentação)*
- 2- Composição inadequada (carbono baixo, fósforo)*
- 3- temperatura de vazamento incorreta (muito elevada, uma vez que haverá maior contração e alterará dimensionalmente os moldes de areia)*
- 4- elevado grau de nucleação (uma vez que a expansão da grafita é maior, levando a alteração dimensional dos moldes)*





Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

Porosidades:

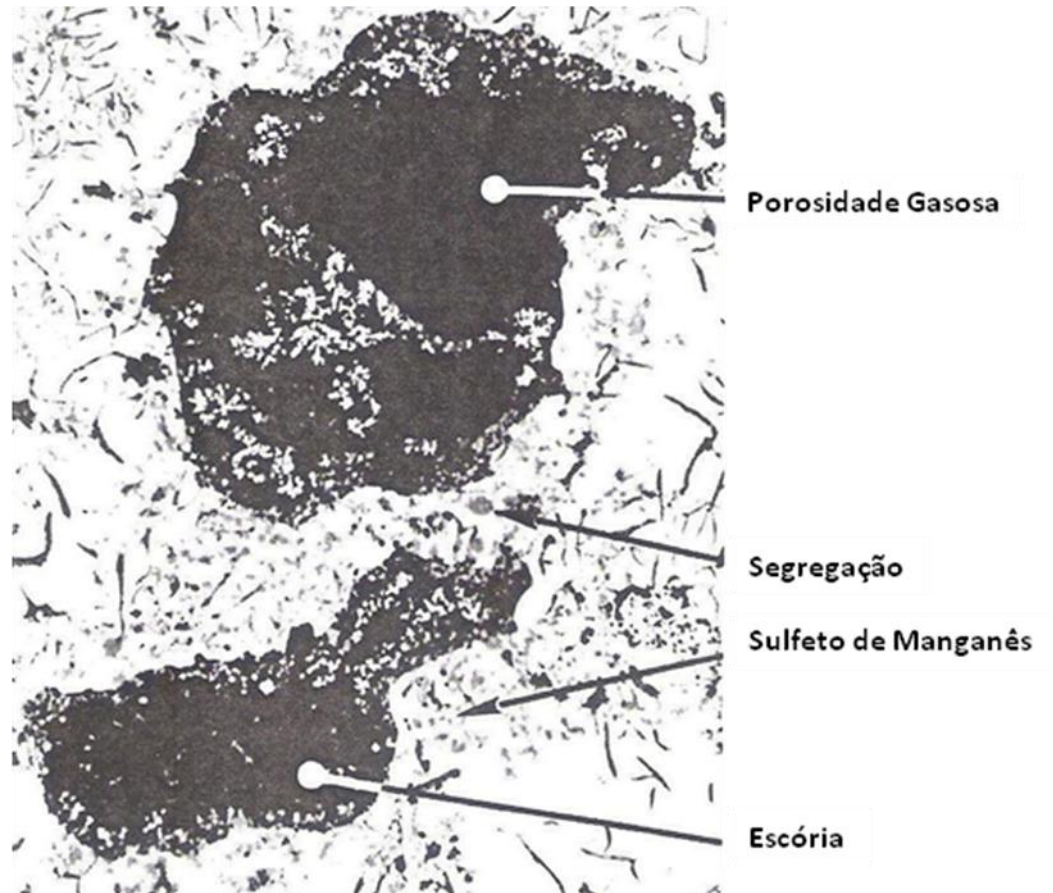
Surge da temperatura baixa de vazamento, sendo mais encontrados nas últimas peças vazadas na corrida da panela. Teor excessivo de manganês e enxofre promove a formação do defeito.

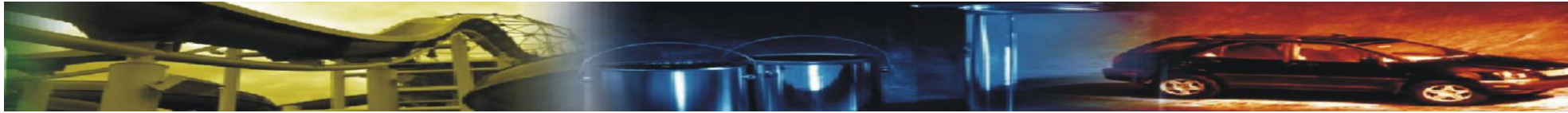
Sequência de formação:

1- à medida que a temperatura do metal diminui, sulfeto de manganês se forma no metal,

2- o sulfeto então flota para a superfície onde se mistura à escória (silicato de ferro e manganês) da panela, criando uma escória de elevada fluidez,

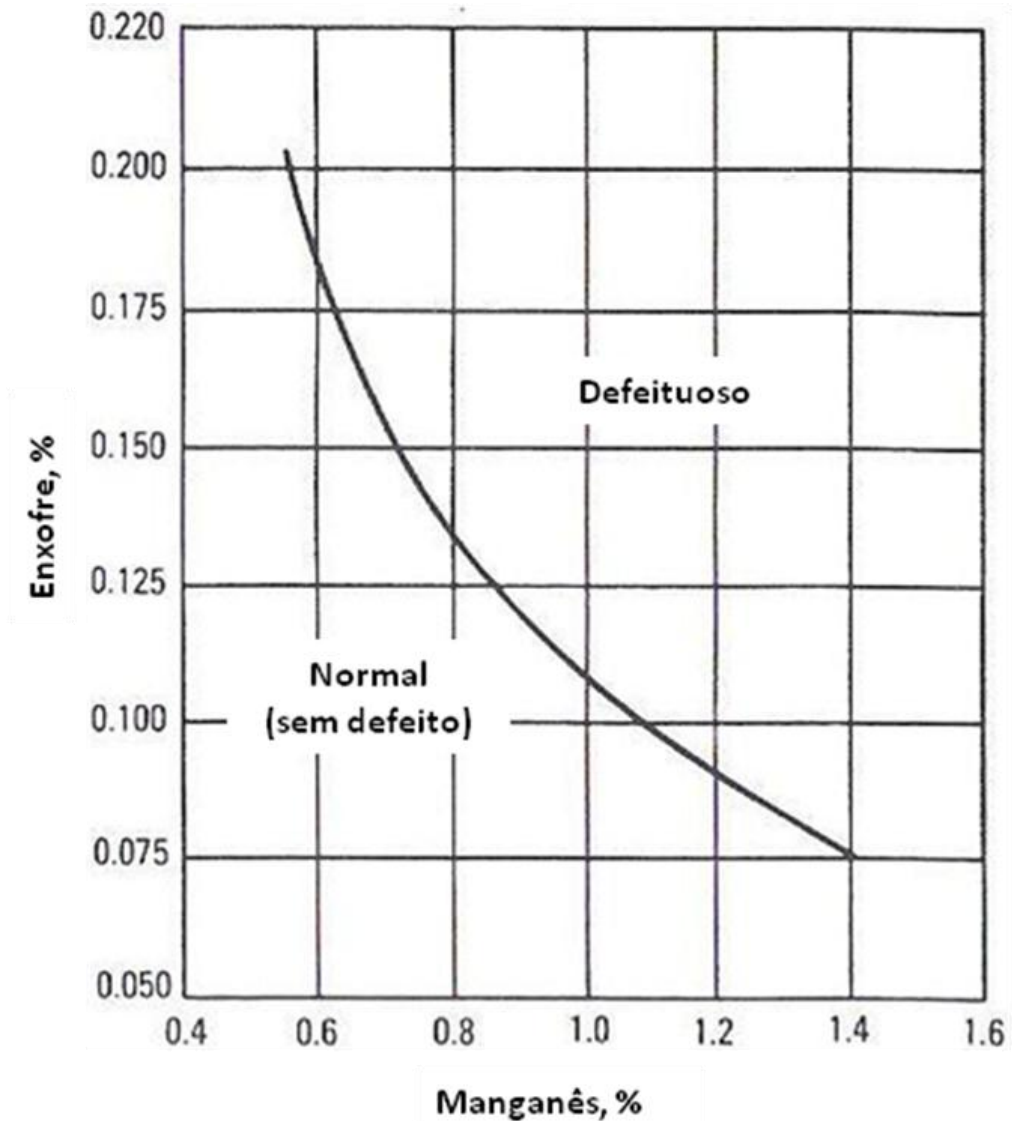
3- Esta escória entra na cavidade do molde, reage com a grafita que precipita na reação eutética e resulta na evolução de monóxido de carbono (CO), formando a porosidade.





Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

Porosidades:



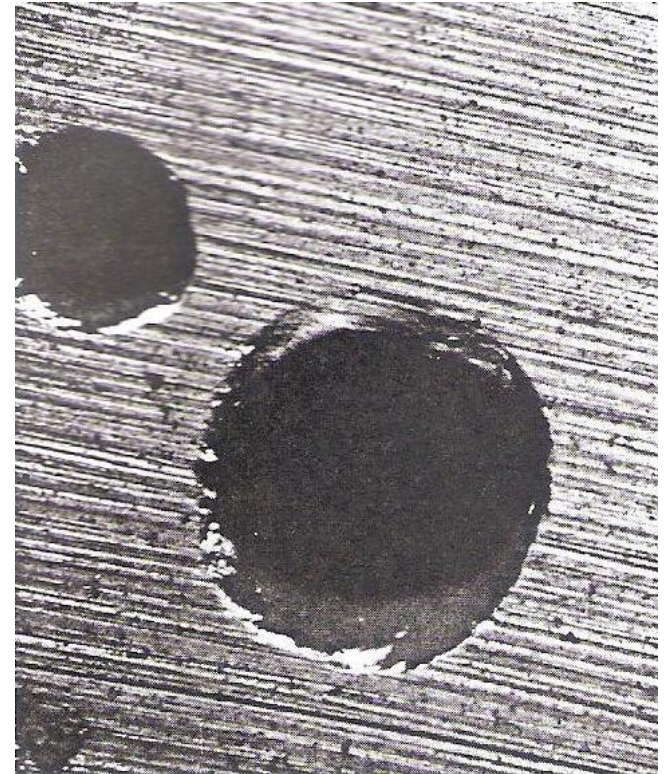


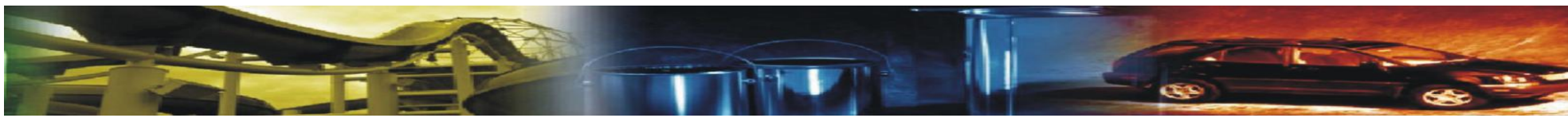
Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

Porosidades:

Porosidades de **hidrogênio** são menores e esféricas, com 3 mm ou menos em diâmetro. Este defeito é **associado à presença de alumínio** que promove a dissociação do vapor de água, elevando o teor de hidrogênio do metal líquido. Umidade excessiva no molde e falta de elementos ativos com base em carbono, favorecem a porosidade por hidrogênio.

Forno e panela úmidos, longo tempo de vazamento e contato com o molde através de canais de ataque, bem como vazamento turbulento contribuem para a geração deste defeito.





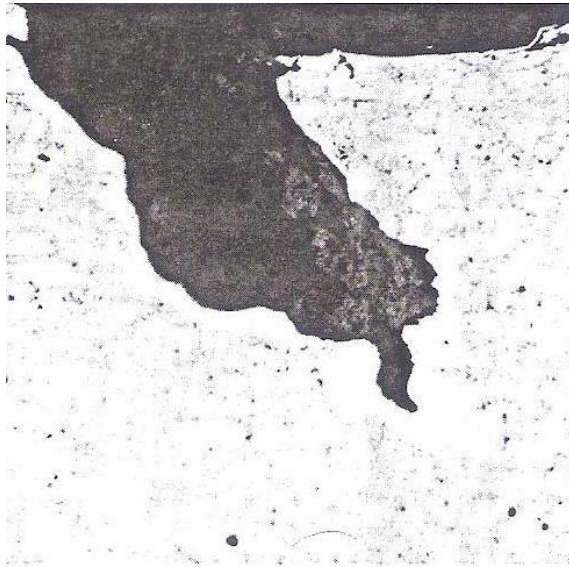
Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

Porosidades:

Nitrogênio em teor acima de 80 ppm (20 a 80 ppm são teores normais), resulta na sua liberação durante a solidificação, causando a formação de bolhas interdendríticas e rechupes.

As fontes mais comuns de nitrogênio são moldes e machos que contêm resinas com elevado teor de nitrogênio e carbono.

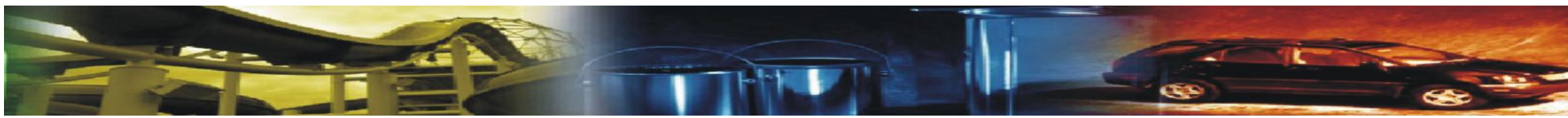
O efeito do nitrogênio pode ser neutralizado pela adição de titânio entre 0,02 e 0,03 % em peso.



(a)



(b)

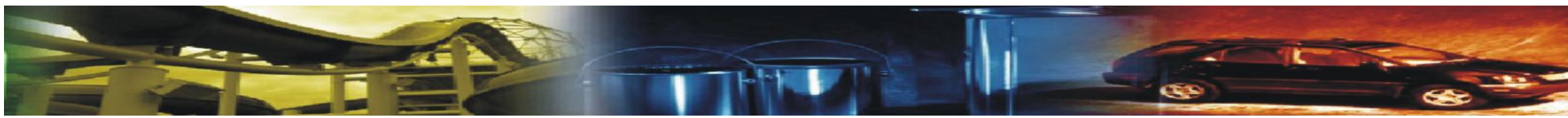


Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

Porosidades:

A presença do **chumbo** é associada à alteração na morfologia da grafita. Em geral, contaminação com chumbo resulta em grafita fina e ramificada (spiky) sobre os veios normais de grafita.





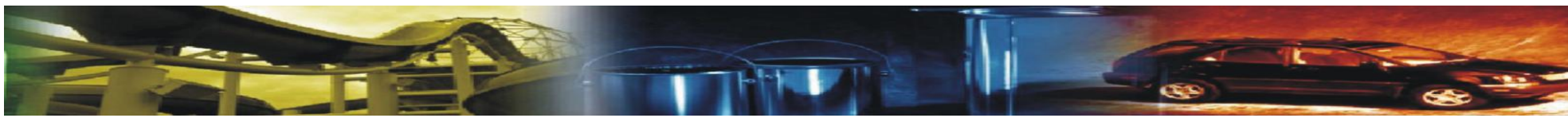
Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

Matérias-primas na produção de **ferros fundidos nodulares**

A **grafita esferoidal** é obtida pelo controle do teor de magnésio entre 0,04 e 0,06% em peso. Magnésio é um elemento altamente reativo, combinando prontamente com oxigênio e enxofre.

Para obtenção de economia de magnésio e limpeza do metal, o **teor de enxofre do ferro tratado deve ser baixo (preferencialmente < 0,02%)**. Isto pode ser obtido em fornos elétricos, pela fusão de cargas compostas por sucata de aço ou ferro gusa de qualidade especial, fornecido para a produção de ferros fundidos nodulares, juntamente com sucata de ferro fundido nodular ou retornos de processo.

A **fusão em forno cubilô** também é possível, entretanto, o tratamento de dessulfuração deverá ser realizado de forma contínua ou em bateladas, antes de realizar o tratamento com magnésio. Isso evita o excesso de consumo de magnésio e de formação de escória de difícil remoção e que pode gerar defeitos no produto fundido.



Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

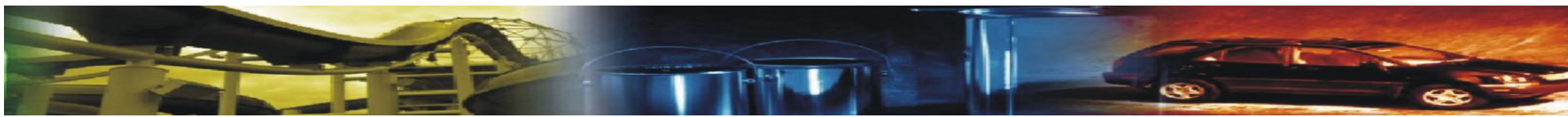
Matérias-primas na produção de ferros fundidos nodulares

Quando o objetivo for produzir um ferro fundido nodular com otimizada resistência mecânica, ductilidade e tenacidade, os materiais da carga deverão ser escolhidos com baixos teores de elementos residuais, especialmente os que promovem a formação de matriz perlítica.

Baixo teor de manganês é necessário para alcançar ductilidade no estado como fundido e facilitar o tratamento térmico de produção de matriz ferrítica. Nestes casos, é necessário usar sucata de aços de estampagem profunda e ferro gusa de qualidade especial para a produção de ferros fundidos nodulares.

A norma ISO 9147 especifica dois graus de ferro gusa adequados à produção de nodulares, grau 3.1 (base para nodular – grafita esferoidal) e grau 3.2 (base para nodular – grafita esferoidal com alto manganês).

Grau	%C	%Si	%Mn	%P	%S
3.1	3,5 – 4,6	<3,0	<0,1	<0,08	0,03 máx.

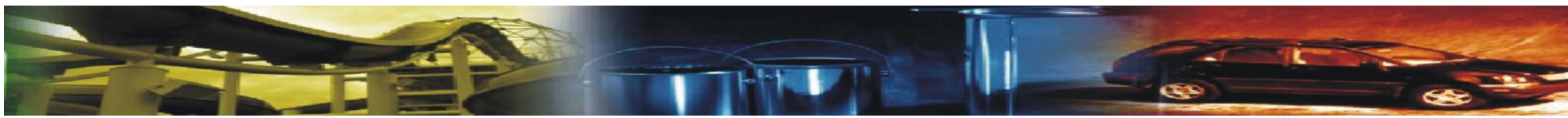


Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

Matérias-primas na produção de ferros fundidos nodulares

Valores típicos de elementos contaminantes presentes nas cargas usadas na produção de ferros fundidos nodulares.

<i> Materiais da Carga</i>	<i> Elementos Contaminantes, %</i>											
	Mn	S	P	Ni	Cr	Cu	Mo	Al	Sn	As	B	V
<i> Ferro Gusa de alta pureza</i>	0.04	0.015	0.013	0.06	0.01	0.02	0.01	<0.005	<0.01	<0.01	<0.0005	<0.01
<i> Aço estampagem profunda</i>	0.26	0.015	0.016	0.01	0.01	0.02	0.01	<0.005	<0.01	<0.01	<0.0006	0.01



Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

Composição Química em Ferros Fundidos Nodulares

- Carbono

Nas práticas de fusão com forno elétrico, o carbono é **oriundo do ferro gusa, carburizantes e sucata de ferros fundidos**. A carburização de sucatas de aço é realizada por meio da adição de grafita de baixo enxofre ou coque grafitizado, sendo a taxa de dissolução e recuperação dependente da pureza da fonte.

Em fornos cubilô, o carbono também é derivado do coque da carga. Valores ótimos de carbono estão **na faixa de 3,4 a 3,8%** em peso, dependendo do teor de silício.

Acima desta faixa **existe o risco de flotação da grafita**, especialmente em seções espessas e aumento da expansão térmica do fundido na solidificação, levando a defeitos especialmente na fundição em areia verde.

Abaixo do limite inferior da faixa, podem ocorrer **defeitos de falta de preenchimento adequado do molde e também tendência a formar carbonetos em seções finas**.



Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

- Composição Química em Ferros Fundidos Nodulares

- Silício

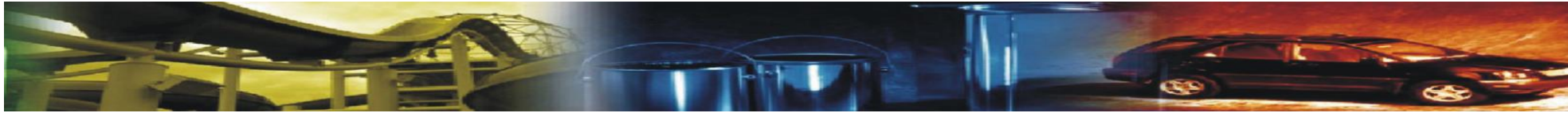
É adicionado pelos materiais da carga, como sucata de ferros fundidos, ferro gusa e ferro ligas. Um pequeno teor é adicionado durante a inoculação na forma de ferro-silício. A faixa visada está entre 2,0 e 2,8% e **teores abaixo do limite mínimo induzem maior ductilidade nos ferros tratados termicamente, mas risco de formação de carbonetos no estado como fundido.**

Elevado teor de silício reduz a tendência a formar carbonetos em seções finas, mas eleva a temperatura de transição dúctil-frágil.

- Carbono Equivalente (CE)

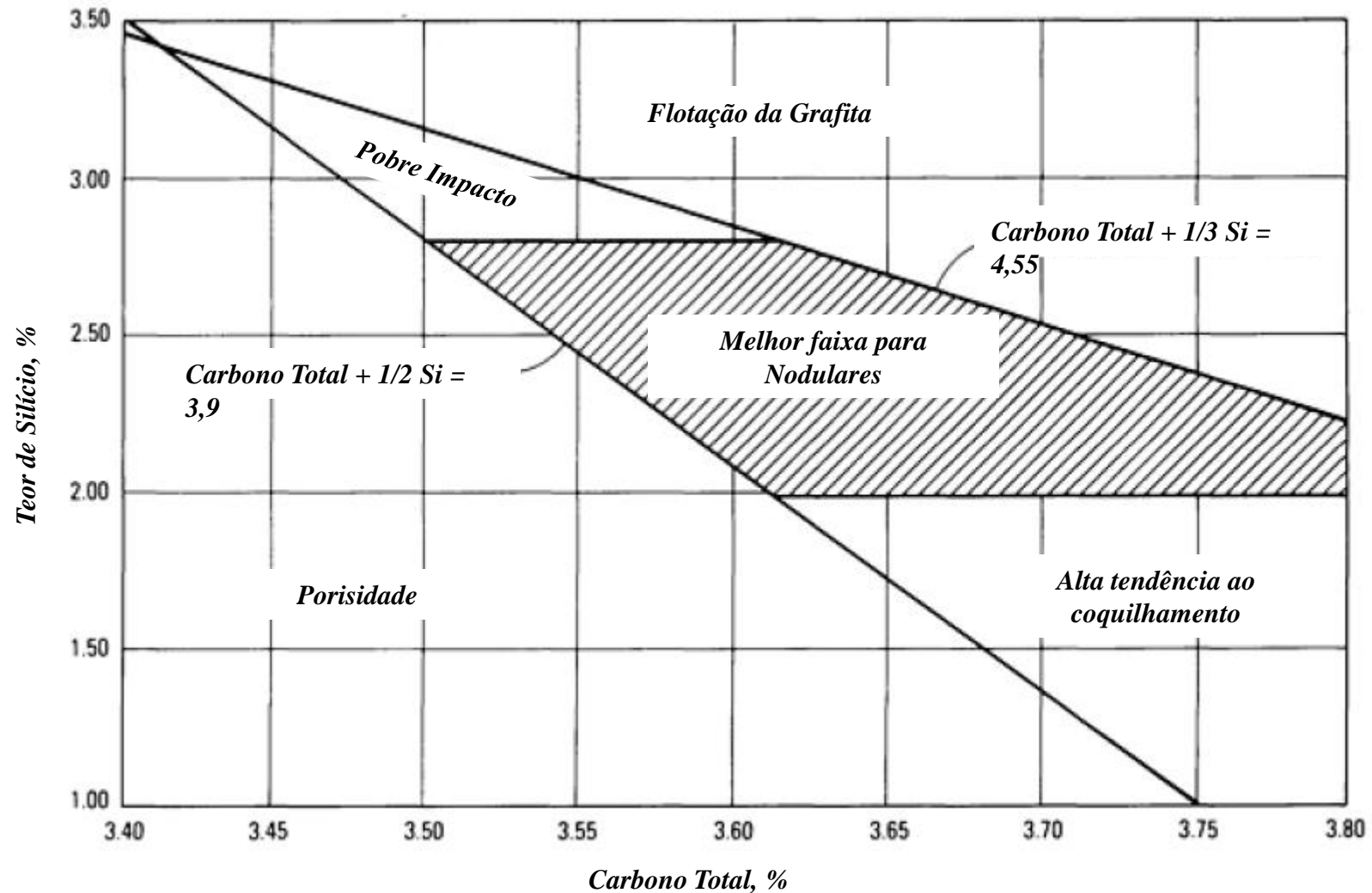
Carbono, silício e fósforo considerados em conjunto determinam o Carbono Equivalente (CE) do ferro fundido, sendo dado por: $CE = \%C + (Si + P)/3$

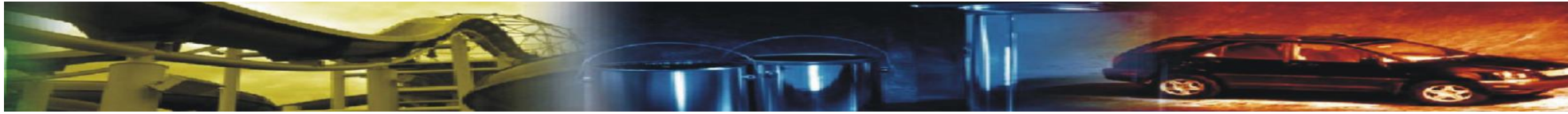
Quando CE é igual a 4.3, o ferro fundido terá composição e estrutura de solidificação eutética, sendo o desvio deste valor um indicativo do teor do eutético presente. Quando CE é menor que 4.3, haverá uma quantidade de dendritas de solidificação formadas e, quando for maior, haverá nódulos primários de grafita na estrutura.



Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

- Composição Química em Ferros Fundidos Nodulares





Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

- Composição Química em Ferros Fundidos Nodulares

- Manganês

A principal fonte de manganês é a sucata de aço adicionada à carga. Este elemento deverá ser limitado de forma a obter a máxima ductilidade.

- Para ferros fundidos **nodulares ferríticos no estado como fundido**, o teor deverá ser menor que 0,2% em peso.
- Para os casos em que o **ferro fundido será tratado termicamente para a geração de matriz ferrítica**, o teor deverá ser menor que 0,5 % em peso.
- Para ferros fundidos **com matriz perlítica**, o teor poderá chegar a 1% em peso.

Em teores mais elevados, pode levar a microsegregação, podendo levar (em seções espessas) à formação de carbonetos em contornos de grão, que promove baixa ductilidade, baixa tenacidade e microestrutura perlítica.

- Magnésio

O teor de magnésio requerido para produzir grafita esferoidal está na faixa de 0,04 a 0,06% em peso. Se o teor de enxofre inicial for menor que 0,015%, teor de magnésio entre 0,035 e 0,04% será suficiente. Baixo magnésio levará à formação de grafita compacta e elevado teor à formação de defeitos de borra (dross).



Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

- Composição Química em Ferros Fundidos Nodulares

- Enxofre

Em fornos cubilô o enxofre é oriundo do coque, **devendo ser mantido em teor abaixo de 0,02% em peso antes do tratamento com magnésio**. O teor final é, normalmente, menor que 0,015%, com exceção dos ferros contendo cério, que leva à formação de sulfeto de cério e eleva o teor de enxofre da liga. Teor de **enxofre elevado** é prejudicial pela formação de escória e borra (dross), devendo ser dessulfurado com carbeto de cálcio até atingir o valor máximo recomendado ou menos.

- Cério

Pode ser adicionado a fim de **neutralizar elementos que prejudicam a esferoidização** da grafita, por meio da inoculação, sendo normalmente desejado entre 0,003 a 0,01% em peso. Em **alguns casos é indesejado por induzir a formação de grafita “Chunky”** não esferoidal (anômala), especialmente em seções espessas. Cério é adicionado na forma de elementos de liga com magnésio ou em elementos inoculantes.



Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

- Composição Química em Ferros Fundidos Nodulares

- Elementos anti-esferoidização:

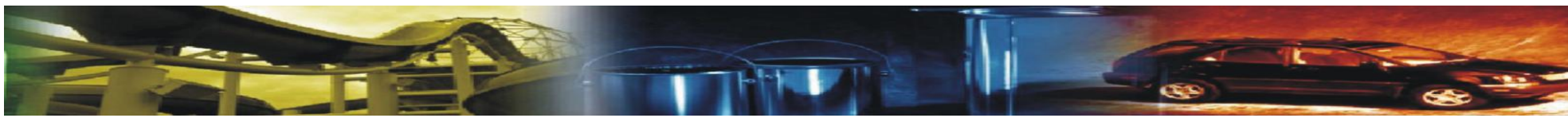
Chumbo, antimônio, bismuto e titânio são elementos indesejáveis introduzidos como elementos residuais da composição da carga e seus elementos podem ser neutralizados pela adição de cério.

- Elementos que promovem a formação de perlita:

Níquel, cobre, manganês, estanho, arsênio e antimônio promovem a formação de perlita em ordem crescente de potencial deste efeito. Cobre até 0,3% e estanho até 0,1% podem ser adicionados quando a matriz perlítica for desejada.

- Alumínio

Deve ser evitado por **induzir a formação de porosidades de hidrogênio subsuperficiais e borra** (dross). Este elemento é adicionado pela sucata de aço e ferro fundido, principalmente quando pistões de motores descartados acompanham a sucata. Teor de 0,01% é suficiente para causar porosidade de hidrogênio.



Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

- Composição Química em Ferros Fundidos Nodulares

- Fósforo

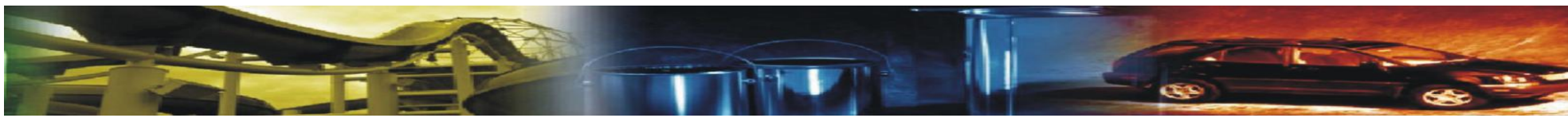
Normalmente mantido em teor inferior a 0,05% em peso, uma vez que promove a formação de defeitos e reduz a ductilidade.

- Elementos que formam carbonetos

Cromo, vanádio e boro são formadores de carbonetos. Manganês pode acentuar este efeito em seções espessas, promovendo maior estabilidade de carbonetos.

- Elementos que promovem a elevação da dureza

Níquel até 2% e molibdênio até 0,75% em peso elevam a habilidade de endurecimento (temperabilidade) em tratamentos térmicos.

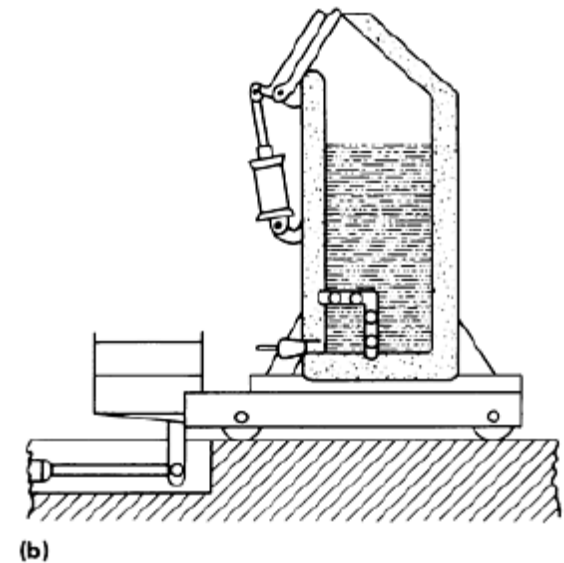
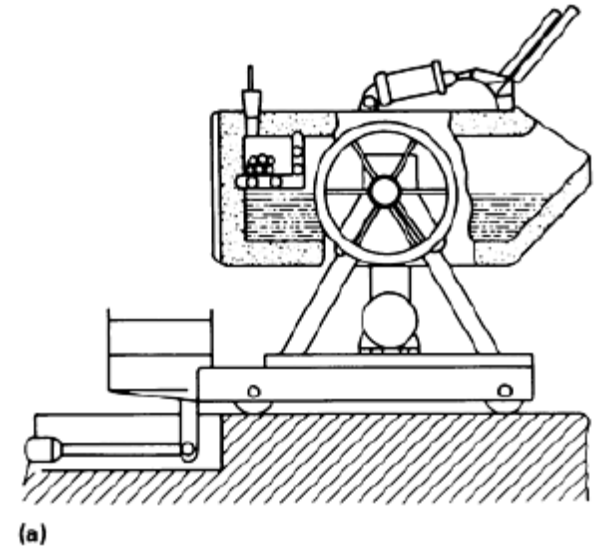


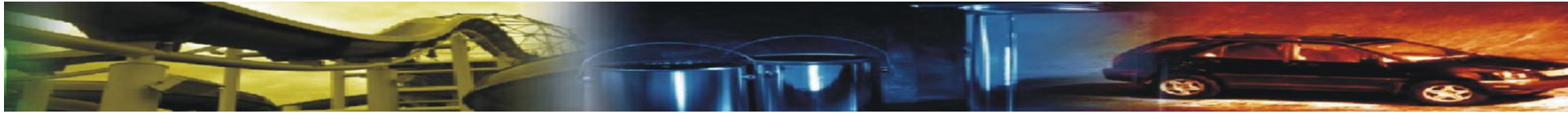
Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

- Tratamento do ferro líquido

- Tratamento com Magnésio Metálico

A reação do magnésio metálico com o ferro líquido é violenta. O magnésio é vaporizado e queima fortemente ao ar. São necessárias válvulas apropriadas para enclausuramento e um dos processos mais usados adota um convertedor.





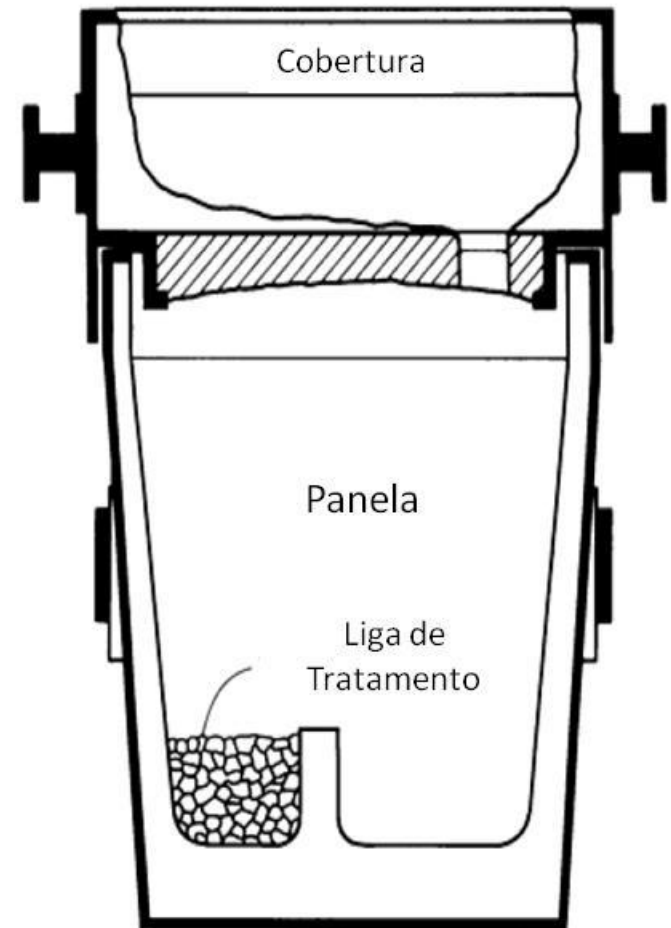
Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

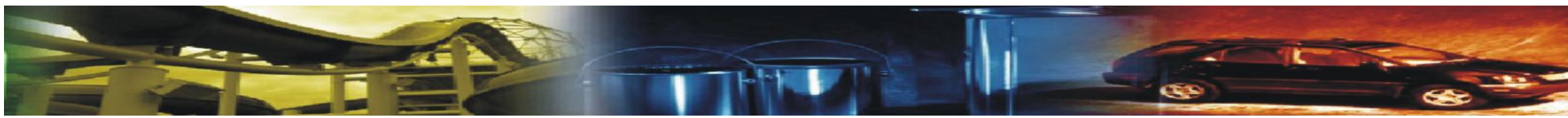
- Tratamento do ferro líquido

- Adição de Magnésio Ligas

A adição de **liga de níquel contendo 14 a 16% de magnésio** pode ser adicionada durante a transferência do metal para a panela ou pela imersão, não apresentando reação violenta (certos casos especiais usam teor de magnésio de até 4%).

Uma desvantagem é o aumento do custo devido ao níquel e elevação do teor deste elemento. A maioria das **ligas ferro-silício adicionadas apresentam 3 a 10%** em peso de magnésio, apresentando reação leve a forte, dependendo do teor de magnésio. A **adição** pode ser feita por meio de um **sino refratário ou adicionada por meio do vazamento do ferro líquido sobre a liga localizada no fundo da panela**. Neste caso, a liga é posicionada em um reservatório e coberto por uma camada de pedaços de aço, sendo mais usado quando a razão da altura da panela e do diâmetro é de 2:1 a fim de conter a projeção de metal líquido.





Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

- Tratamento do ferro líquido

- Tratamento no Molde (processo em molde)

A adição de magnésio ligas **pode ser realizada no molde**. A liga é, em geral, ferro-silício contendo magnésio, que é colocado em uma câmara especial ou **colocado no sistema de alimentação e a liga dissolve conforme o ferro fundido é vazado**. Nesta técnica **a reação ocorre dentro do molde e evita produção de fumos**. Ligas com baixo enxofre ($<0,01\% \text{ S}$) são usadas, a fim de evitar a formação de sulfetos e inclusões no fundido.

Controle do teor de magnésio

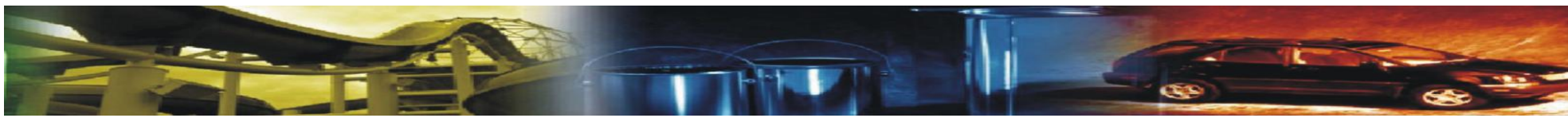
O controle rígido da quantidade de metal líquido e de aditivo adicionado é necessário. Além disso, o teor de enxofre e a temperatura devem ser controlados, uma vez que afetam o teor final do elemento. O **rendimento de magnésio** pode ser expresso por:

$$\text{Rendimento} = ((\% \text{ Mg}_{\text{final}}) / (\% \text{ Mg}_{\text{adicionado}} - (3/4) \% \text{ S})) * 100$$

O sulfeto de magnésio formado deve ser removido da escória gerada na superfície do banho.

Valores típicos de rendimento são:

- 50% para liga com 16% Ni-Mg adicionado na panela,
- 40% para liga com 9% Fe-Si-Mg adicionado com cobertura de ferro,
- 60% para liga com 5% Fe-Si-Mg adicionado com cobertura de ferro,
- 50% para Mg puro adicionado em convertedor,
- 45% para processo em molde.



Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

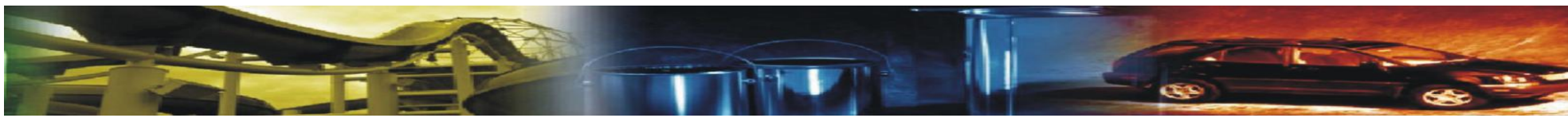
- Inoculação

Logo após o tratamento do ferro líquido com magnésio, o ferro é submetido a inoculação final, algumas vezes chamada de pós-inoculação.

É normalmente **realizado na panela com um inoculante granulado de ferro-silício** com 75% Si ou, de forma mais geral, uma larga gama de ferro-silício ligas que contém de 60 a 80% de Si. A quantidade de inoculante adicionada está entre 0,25 e 1,0%.

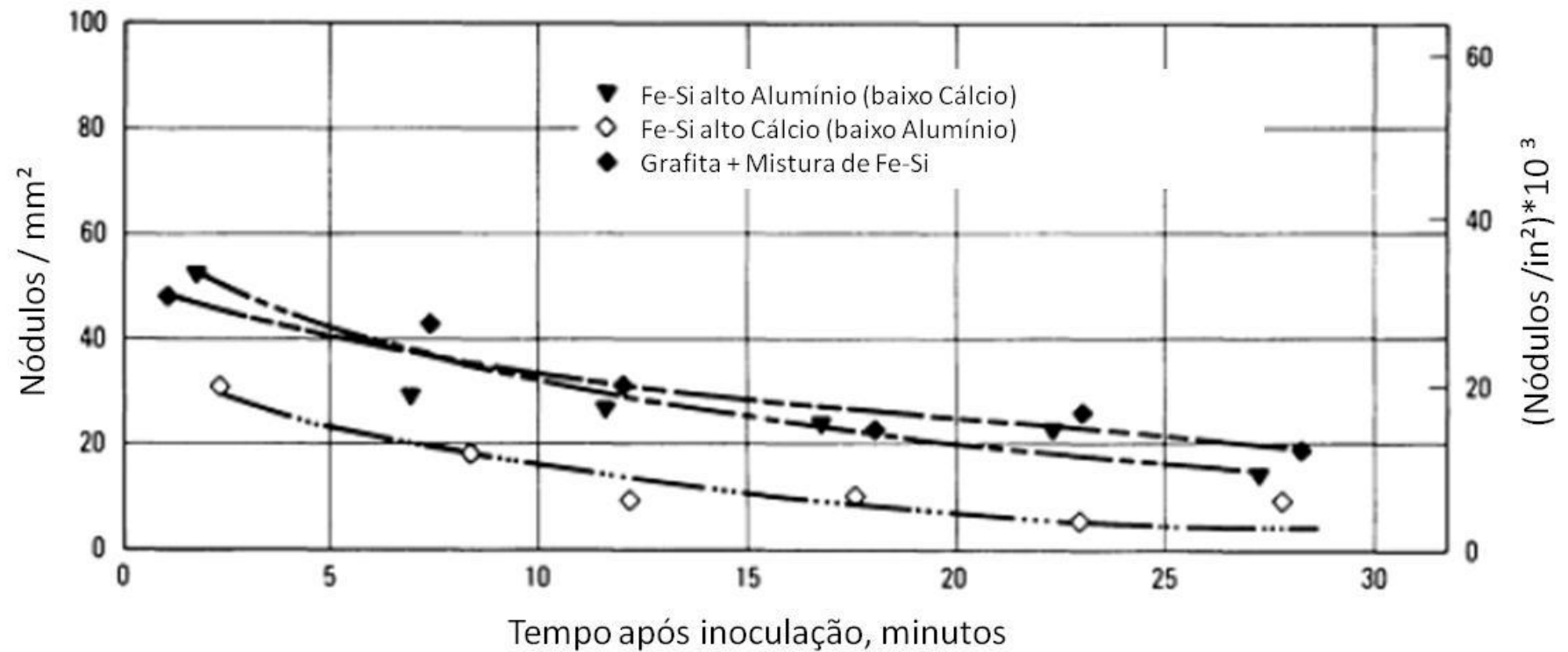
O inoculante **pode ser adicionado no fundo da panela antes do vazamento ou através de um silo refratário**, o mais próximo quanto for possível do momento do vazamento do metal nos moldes. A agitação é necessária e pode ser conseguida por meio da injeção de nitrogênio por meio de um plug poroso no fundo da panela.

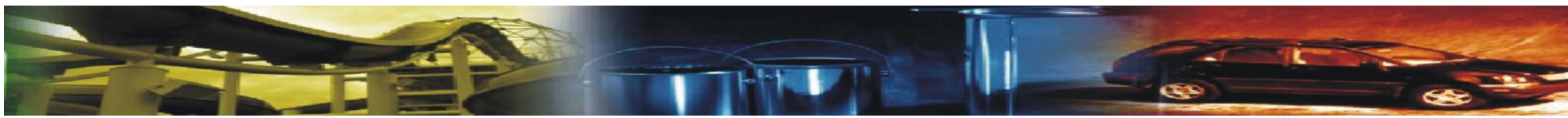
A **inoculação reduz o super-resfriamento na solidificação e auxilia a evitar a formação de carbonetos na estrutura, especialmente em seções mais finas**. Ela aumenta o número de nódulos de grafita, aumentando a homogeneidade, auxiliando a formação de ferrita e elevando a ductilidade. O efeito do inoculante é forte logo após a sua dissolução, **perdendo o potencial ao longo de 20 a 30 minutos**. A taxa de perda de efeito é dependente de elementos residuais, como cálcio, cério, alumínio, estrôncio, bário e bismuto.



Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

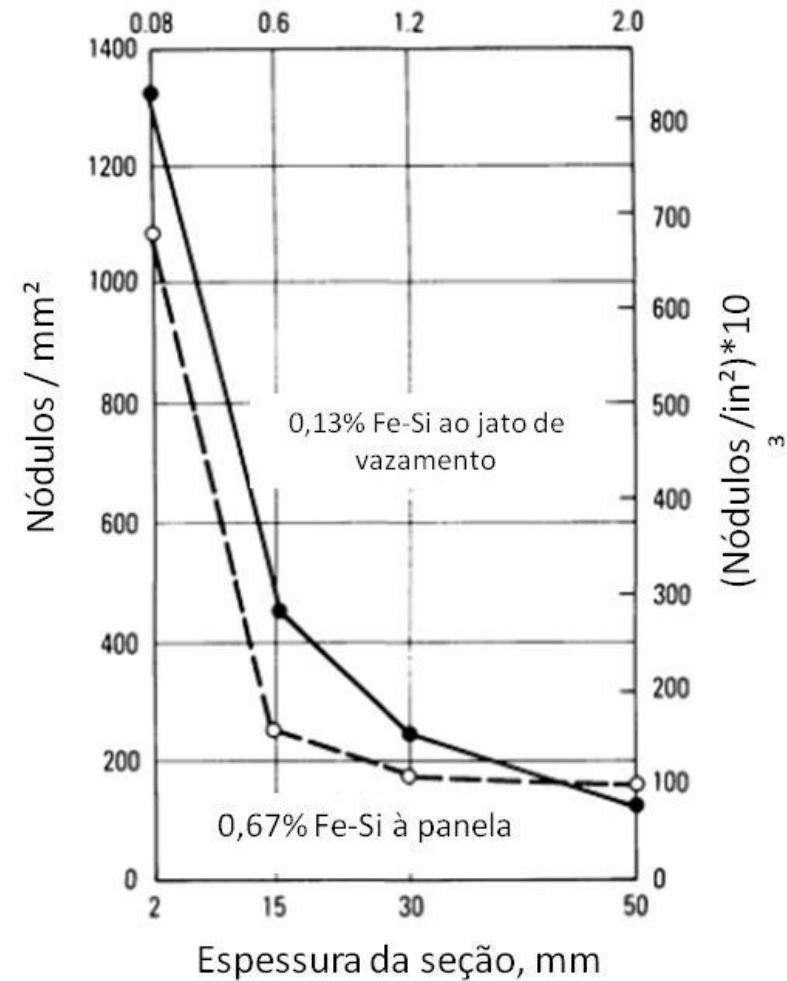
- Inoculação

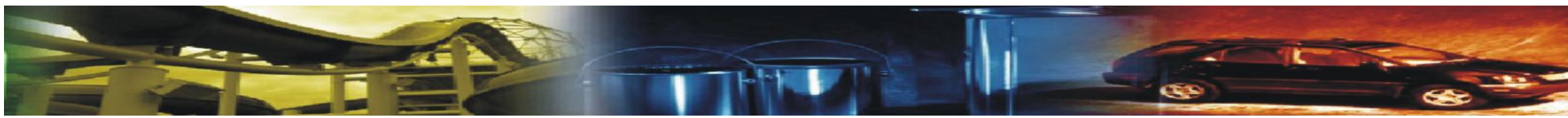




Processo de Fabricação de Ferros Fundidos - Inoculação

Inoculação no jato de vazamento
(mais eficaz).





Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

- Vazamento

Recomendações:

- O metal da panela deverá ter a escória removida,
- O teor de magnésio deve ser mantido baixo, preferencialmente abaixo de 0,06%
- Canais de alimentação devem ser adequadamente dimensionados, de forma a alimentar rapidamente o molde com mínima turbulência,
- Posicionar canais de alimentação o mais próximo da base do fundido,
- Adoção de filtros cerâmicos auxilia a reduzir inclusões e a proporcionar fluxo de metal menos turbulento.

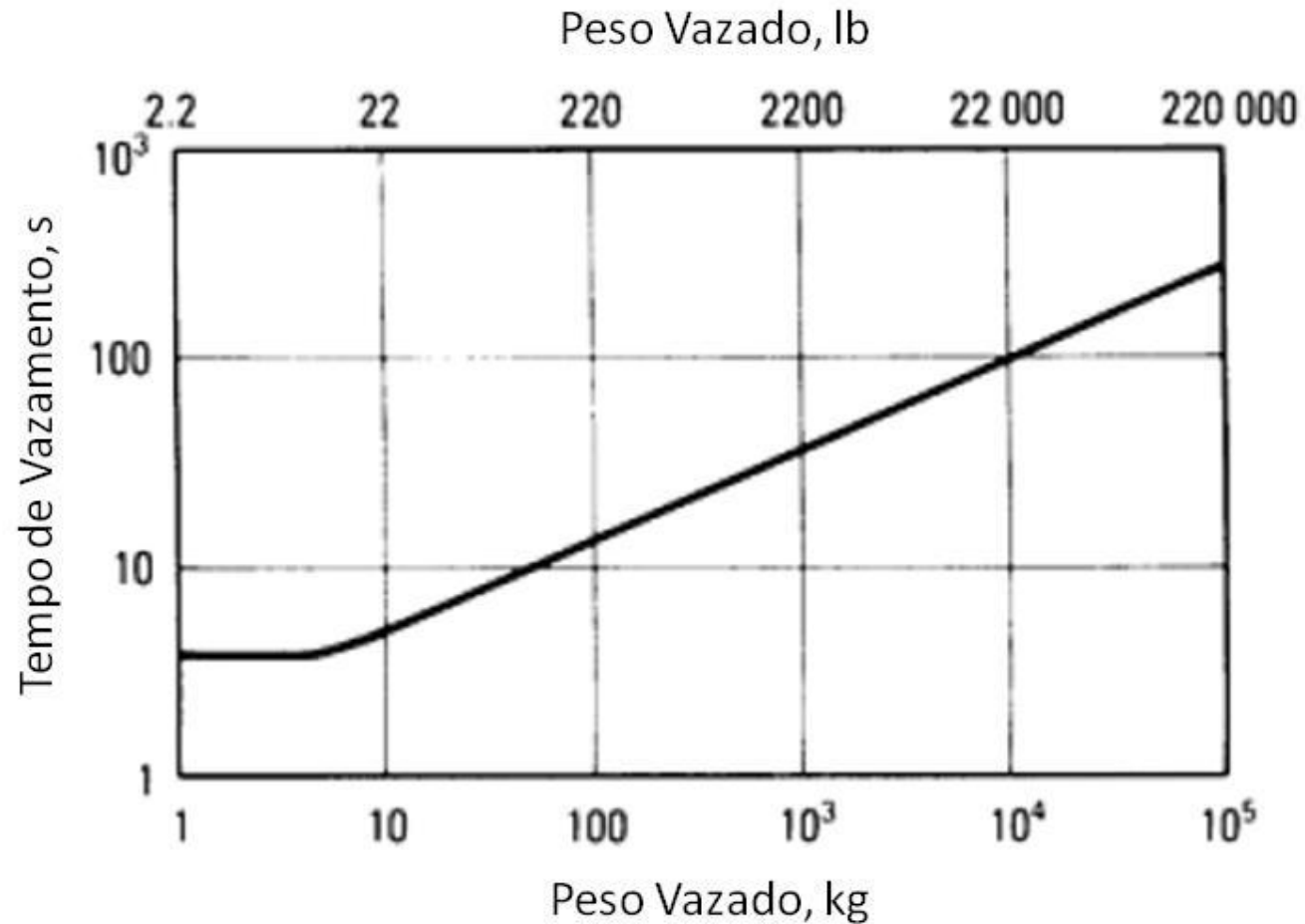
Temperatura e Velocidade de Vazamento

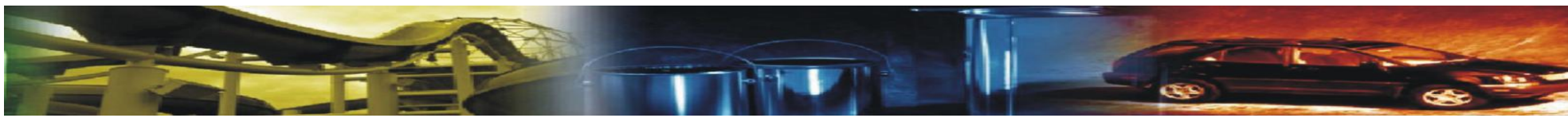
Gradientes de temperatura no fundido e vazamento de metal em temperatura baixa, leva à formação de carbonetos nas extremidades das peças fundidas. Isto pode ser evitado pelo vazamento em temperatura acima de 1315°C para seções de 25 mm e acima de 1425°C para fundidos com 6 mm de espessura de parede. Além disso, devem ser adotadas extensões para os canais de vazamento e respiradores nos moldes.



Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

- Vazamento





Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

- Controle Metalúrgico da Produção de Ferros Fundidos Nodulares

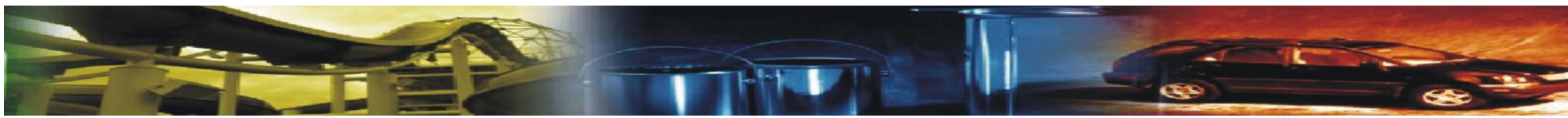
Composição Química do Metal

Antes do tratamento com magnésio, deverá ser verificado o teor de enxofre do ferro fundido (uma vez que é mais fácil coquilhar). O teor é facilmente determinado por meio de um corpo de prova coquilhado avaliado por espectrometria. Quando for necessário, carbono e enxofre poderão ser determinados com rapidez a partir da queima do material em pó.

Indiretamente, carbono poderá ser estimado por análise térmica, bem como o grau de super-resfriamento que indicará o nº de nódulos formados na solidificação.

Nodularidade e Número de Nódulos

O sucesso do tratamento com magnésio, teor de elementos indesejáveis e pós-inoculação visando a obtenção de uma boa estrutura da grafita nodular e adequado número de nódulos **é geralmente determinada a partir de um corpo de teste**, conforme recomendado pela AFS (American Foundrymen's Society), comitê 12K.

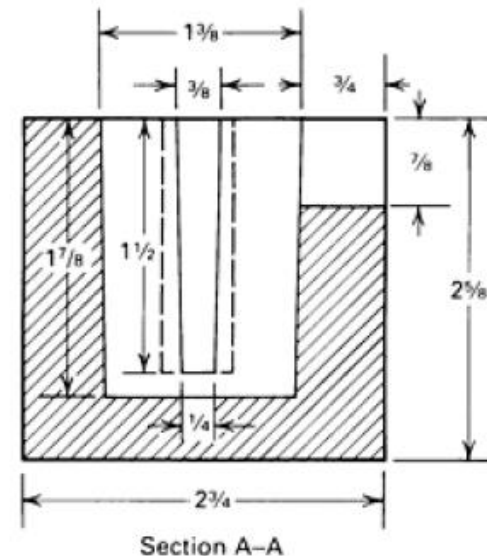
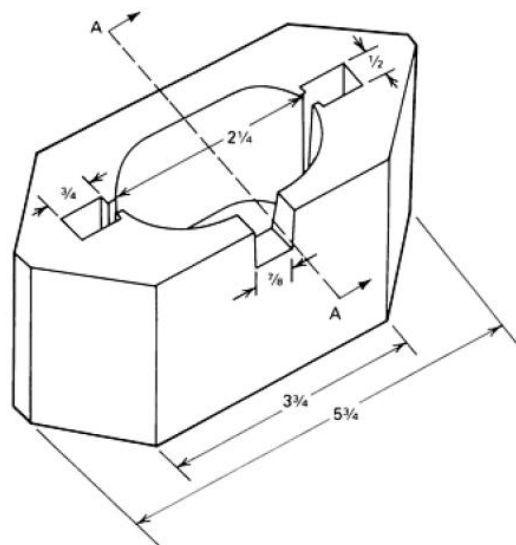


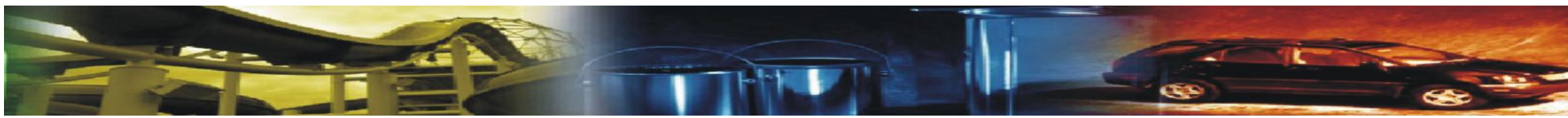
Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

- Controle Metalúrgico da Produção de Ferros Fundidos Nodulares

Nodularidade e Número de Nódulos

O molde é feito de areia endurecida, e consiste de um bloco central com duas orelhas que são quebradas assim que o metal solidifica e as orelhas tenham resfriado a uma cor vermelha opaca. Depois de resfriado até a temperatura ambiente, a orelha é cortada em dois e preparada por lixamento e polimento e então analisada em microscópio. O número de nódulos é contado em aumento de 100X em uma área (mm^2 ou pol^2). A forma dos nódulos é normalmente avaliada de acordo com a norma ISO 945 ou ASTM A247. O número de nódulos e a forma também podem ser avaliados por técnicas de análise de imagens, associadas ao microscópio ótico ou eletrônico.



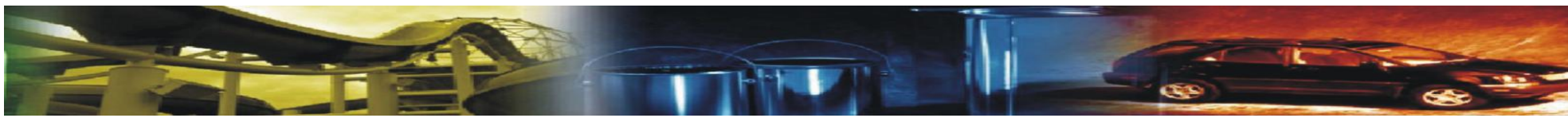


Processo de Fabricação de Ferros Fundidos

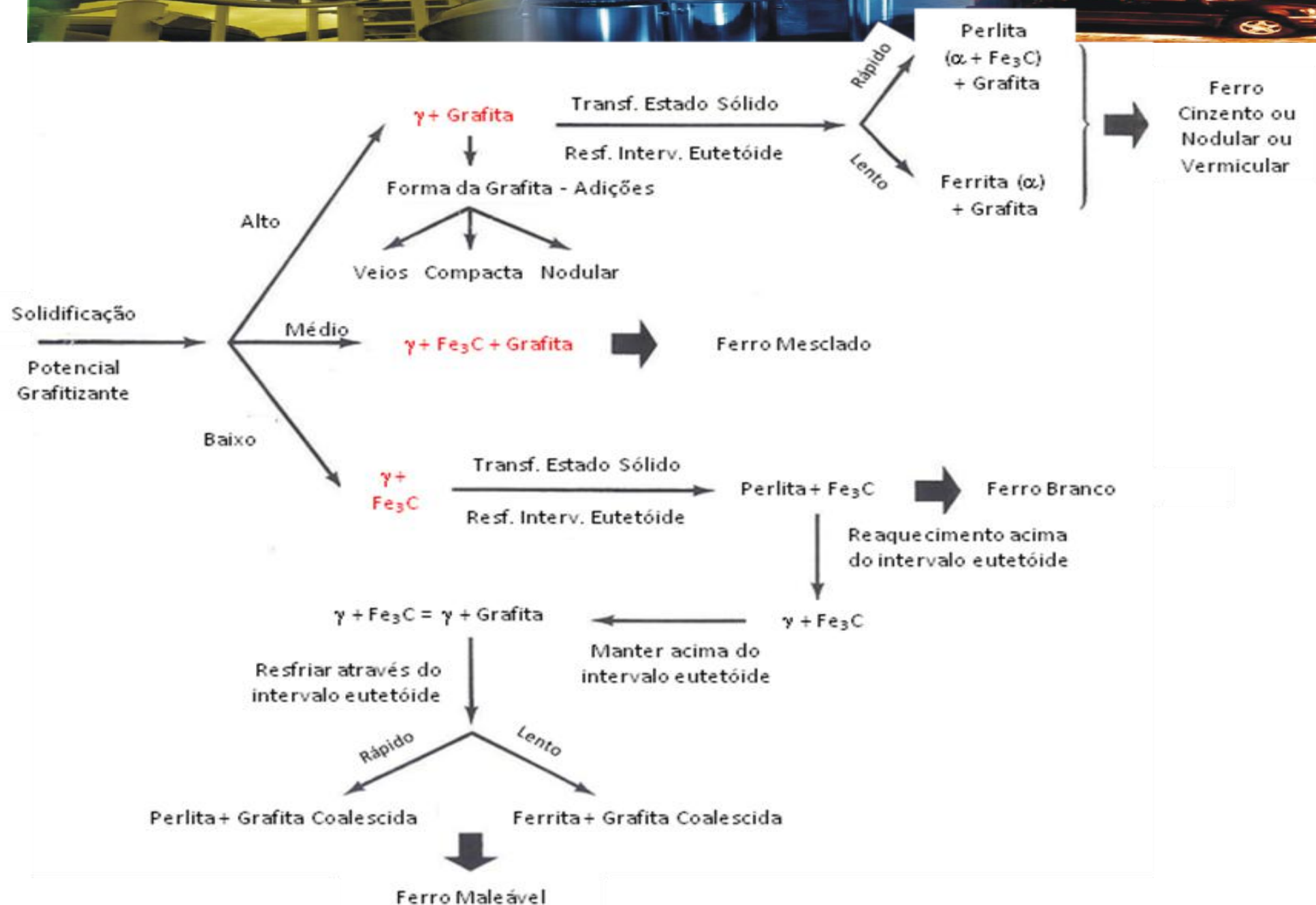
- Controle Metalúrgico da Produção de Ferros Fundidos Nodulares

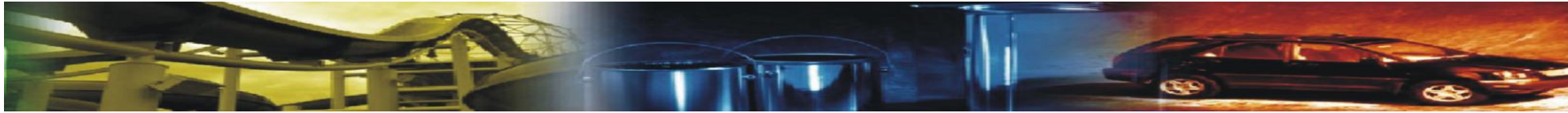
Corpos de prova para teste mecânico

Visando confirmar o atendimento aos requisitos de norma para as propriedades mecânicas, corpos de prova são usinados e ensaiados. **Corpos de prova fundidos a partir de barras de teste, fundidos em conjunto ou separados das peças, apresentam formato de blocos de quilha, blocos Y ou barras horizontais como corpo de prova apêndice.** Quando existe acordo entre fornecedor e cliente, os corpos de prova poderão ser retirados diretamente do fundido.



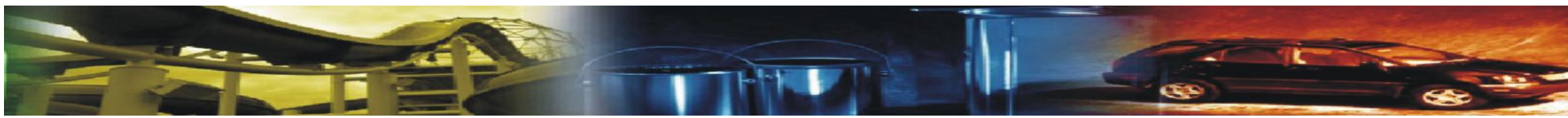
SOLIDIFICAÇÃO DOS DIFERENTES TIPOS DE FERROS FUNDIDOS





Classificação

Designação Comercial	Fase Rica em C	Matriz	Fratura	Estrutura Final
Cinzento	Grafita Lamelar	P	Cinza	Solidificação
Nodular	Grafita Esferoidal	P, F, A, M	Prata-Cinzenta	Solidificação + Tratamento Térmico
Grafia Compacta	Grafita Vermicular	F, P	Cinza	Solidificação
Branco	Cementita	P, M	Branca	Solidificação
Mesclado	Grafita lamelar e cementita	P	Mesclada	Solidificação
Maleável	Grafita Coalescida	F, P	Prata-cinzenta	Tratamento Térmico
Nodular Bainítico	Grafita Esferoidal	B	Prata-cinzenta	Solidificação + Tratamento Térmico



Metalurgia dos Ferros Fundidos

Os aspectos mais importantes da fabricação dos Ferros Fundidos (fófos) são:

- 1- Composição Química
- 2- Taxa de Resfriamento
- 3- Tratamento do Ferro Líquido
- 4- Tratamento Térmico

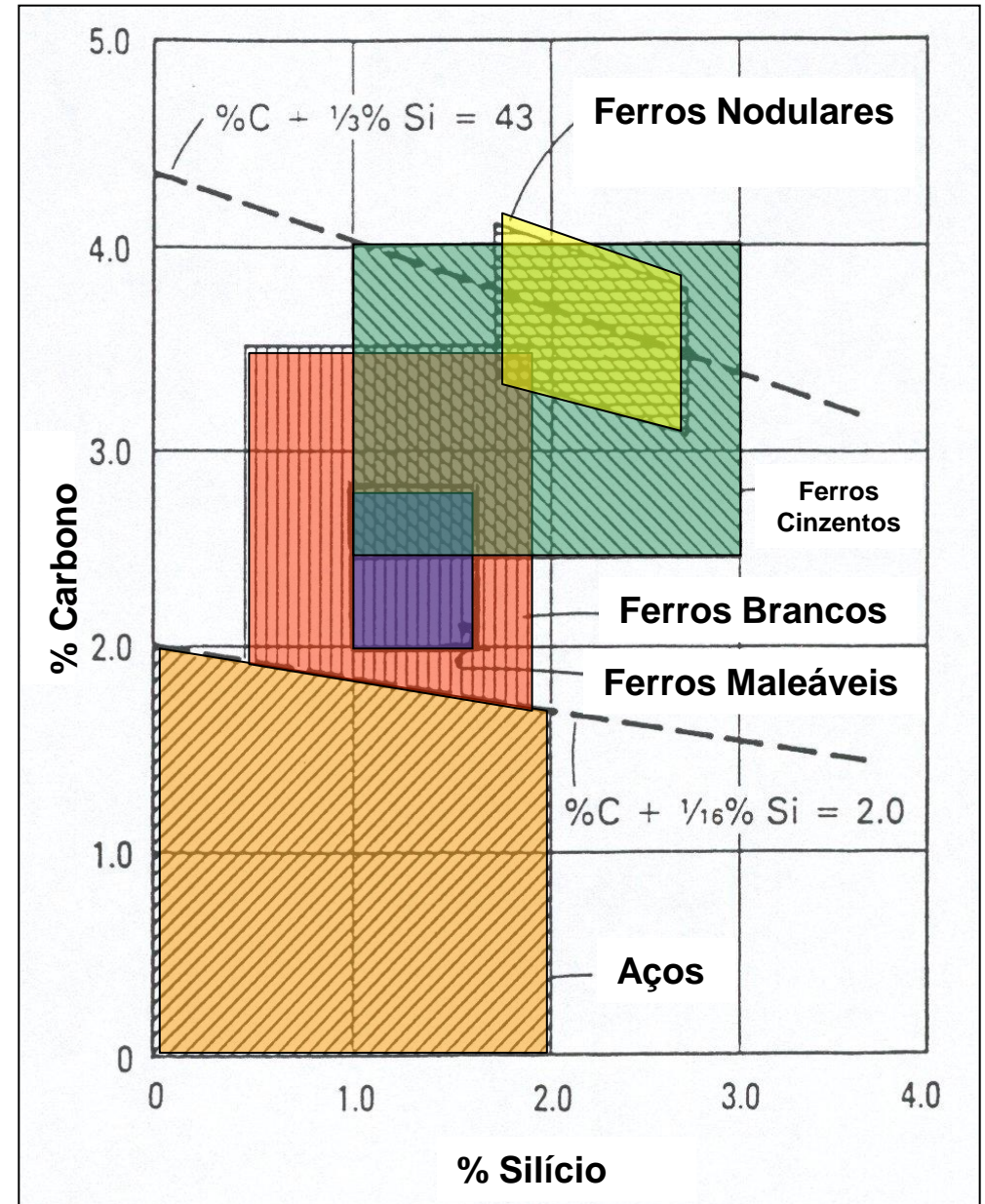


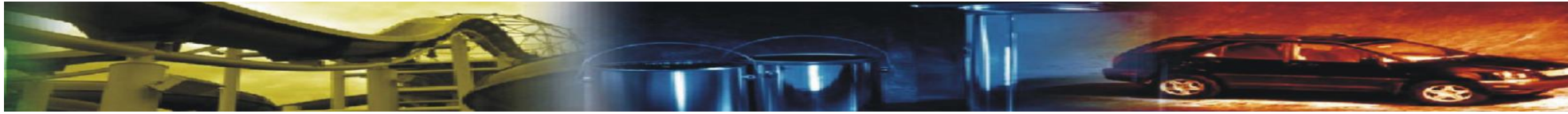
Ferros Fundidos

Ligas ternárias
Ferro-Carbono-Silício

Carbono Equivalente:
 $C.E. = \%C + 1/3 (\%Si)$

Exemplo:
%Carbono: 3,6
%Silício: 2,3
 $C.E. = 3,6 + 1/3 (2,3)$
 $C.E. = 4,3\%$
Liga Eutética!!!





Metalurgia dos Ferros Fundidos Brancos

Recebem este nome devido à sua superfície de fratura (branca). Não apresentam grafita em sua microestrutura. O Carbono está presente na forma de Carbonetos $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$ e $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$.

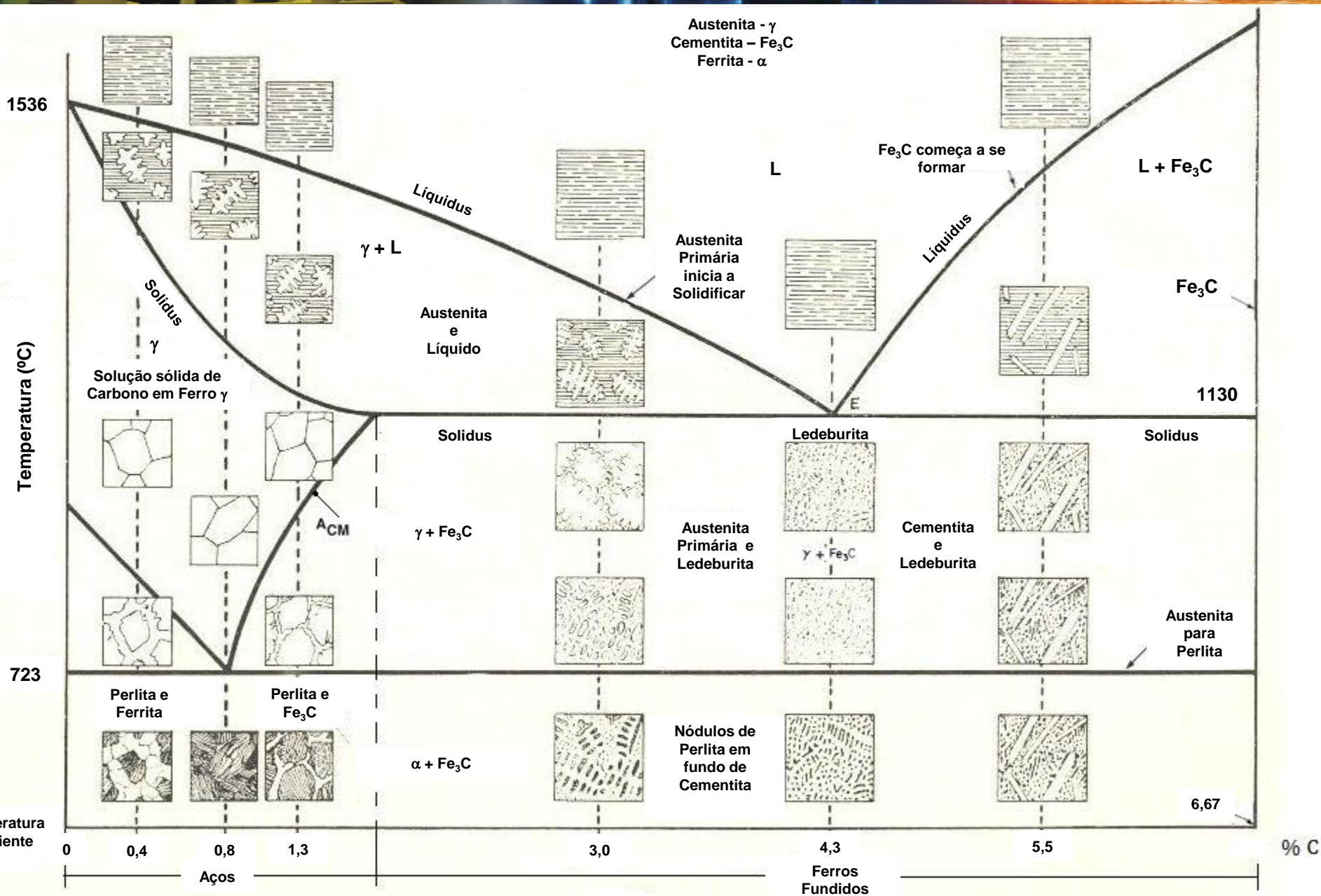
São usualmente muito duros, o que resulta na excelente resistência ao desgaste abrasivo.

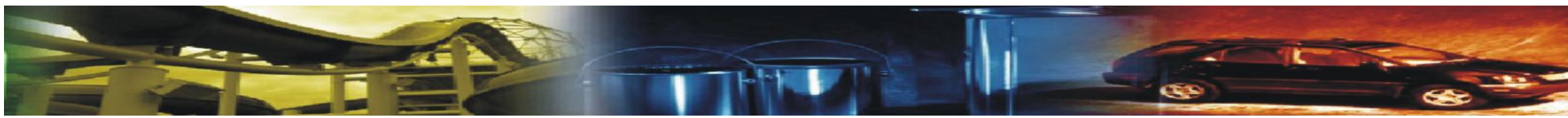
Podem ser ferros brancos em toda seção (obtidos assim por controle da composição) ou referidos como ferros coquilhados, ou de estrutura obtida por resfriamento rápido do tipo Martensita com carbonetos devido ao contato com o molde metálico ou de carbono.

Existem diferenças entre a estrutura e composição para os dois tipos.



Ledeburita: Ao solidificar no eutético, ocorre a formação de um fundo de carbonetos (Fe_3C) em dendritas de Austenita (com 2,0%C). Ao resfriar abaixo de 723°C, a austenita é transformada em Perlita, sendo a Ledeburita conceituada como: **Nódulos de Perlita em fundo de Cementita**.





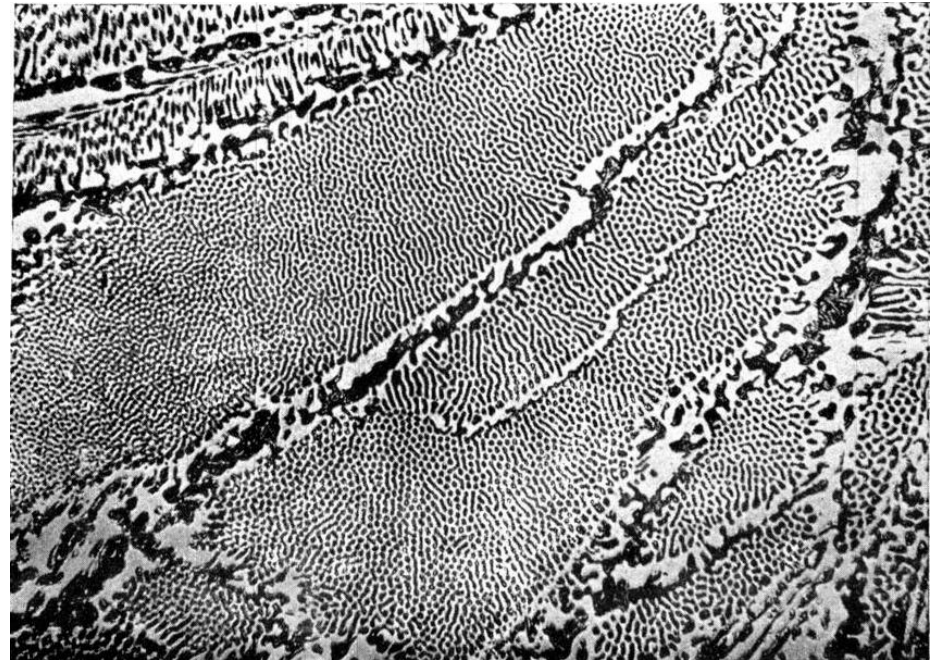
Ferros Fundidos Brancos

Aplicações

- Cilindros Coquilhados para Laminação de Polímeros
- Revestimentos de Moinhos
- Moinhos de bola
- Equipamentos de Mineração

- Características:

- Boa Fluidez (fundibilidade) e Baixo custo
- Elevada Resistência ao Desgaste Abrasivo
- Difícil Usinagem



Ferro Fundido Branco Eutético



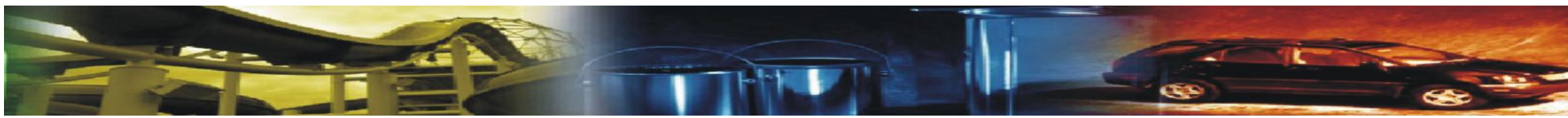
Ferros Fundidos Branco



Ferro Fundido Branco Hipoeutético



Ferro Fundido Branco Hipereutético



Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos

1- Composição Química

A escolha da composição do ferro fundido está baseada nos seguintes aspectos:

1- Forma e Distribuição requerida da Grafita

2- Estrutura de Carbonetos livres

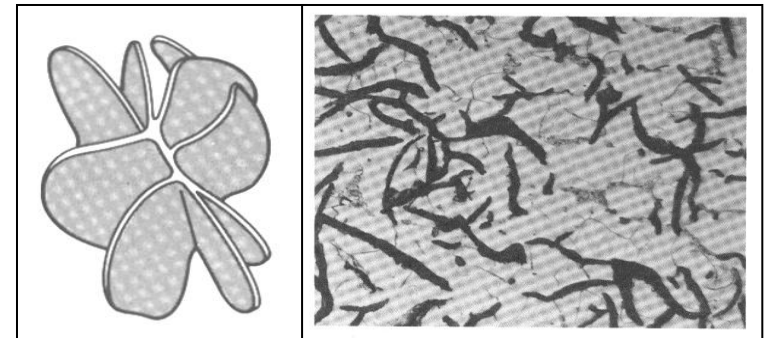
3- Matriz desejada

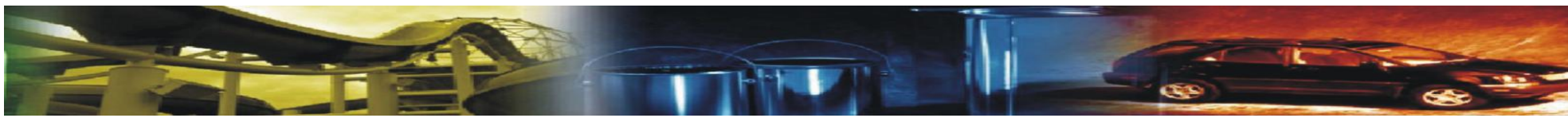
Efeito dos Elementos de Liga:

Potencial grafitizante altamente positivo: Carbono, Chumbo, Fósforo, Silício, Alumínio, Cobre e Níquel

Potencial grafitizante neutro: Ferro

Potencial grafitizante altamente negativo: Manganês, Cromo, Molibdênio e Vanádio.





Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos

2- Taxa de Resfriamento

O aumento da taxa de resfriamento resulta em:

- refino da grafita e da estrutura da matriz (maior dureza e resistência mecânica).
- eleva a tendência ao coquilhamento (maior dureza e resistência mecânica)

Deve-se acertar a composição química a fim de prover o adequado potencial grafitizante para uma dada taxa de resfriamento.

Se considerarmos uma composição fixa, à medida que aumentamos a seção do componente, maior o coalescimento da grafita e a razão perlita/ferrita diminui.



Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos

➤ Classificação dos Veios de Grafita

- Tipo A
- Tipo B
- Tipo C
- Tipo D
- Tipo E



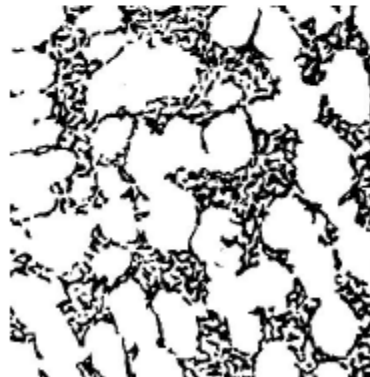
A – Irregular ao Acaso



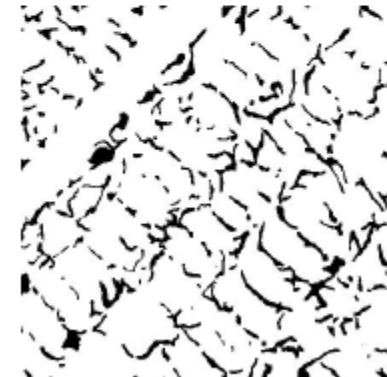
B – em Roseta



C – Irregular Desigual



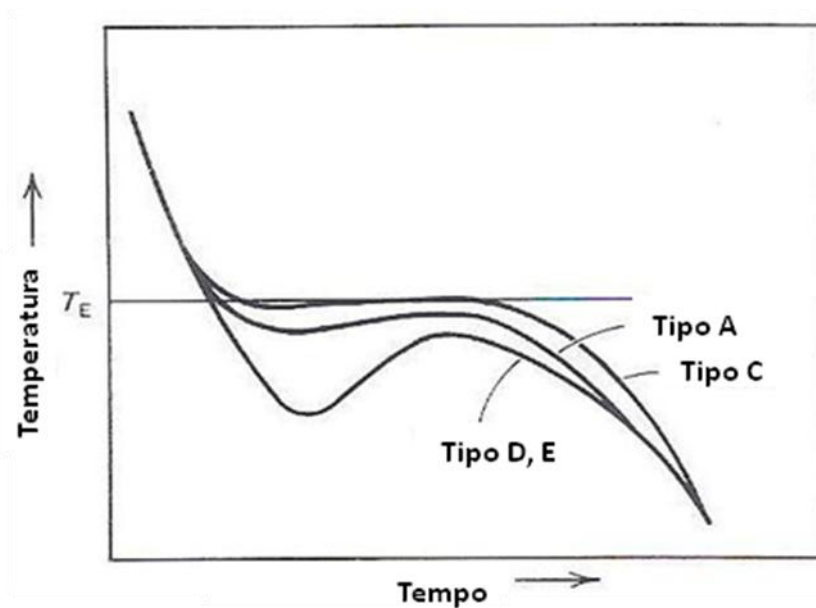
D – Interdendrítica ao Acaso



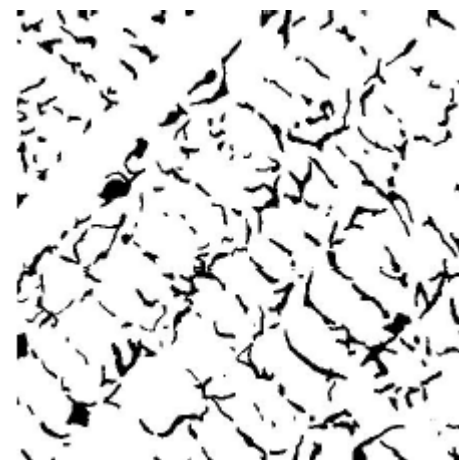
E – Interdendrítica Orientada



A



E



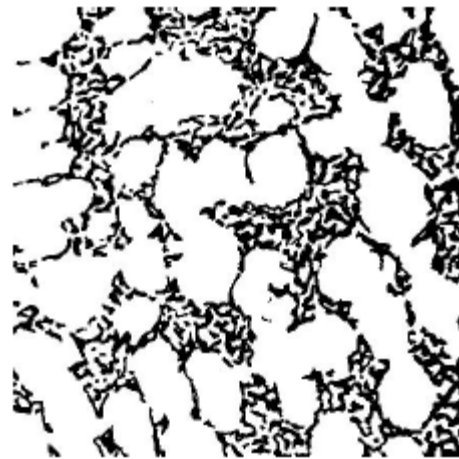
B



C



D





Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos

3- Tratamento do Ferro Líquido

O tratamento do Ferro líquido influencia as condições de nucleação e crescimento durante a solidificação. A consequência é a alteração da morfologia da grafita, resultando em diferentes propriedades.

Tratamento do Ferro Líquido

É realizado pela inoculação de mínimas adições de elementos de liga antes do vazamento. Os inoculantes são: Ferro-Silício, Alumínio e Cálcio. Como efeito observa-se:

- Aumento do potencial grafitizante, pela redução do super-resfriamento.
- Refino da estrutura pelo grande número de células eutéticas formadas, resultando em aumento da resistência.



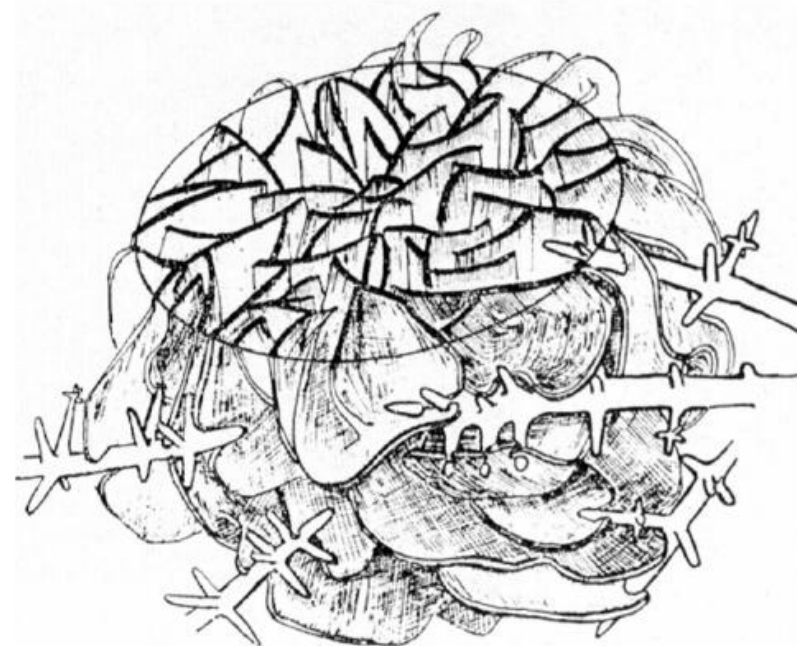
Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos

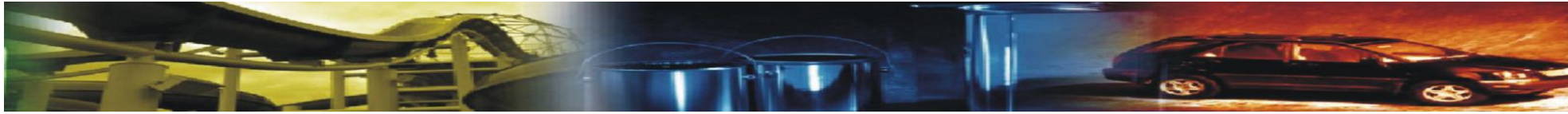
4- Tratamento Térmico

Altera consideravelmente a estrutura da matriz, embora a forma e o tamanho da grafita permaneça inalterado.

Poucos ferros Cinzentos são tratados termicamente, sendo os tratamentos mais usuais:

- Recozimento para Alívio de Tensões,
- Recozimento para Redução da dureza.





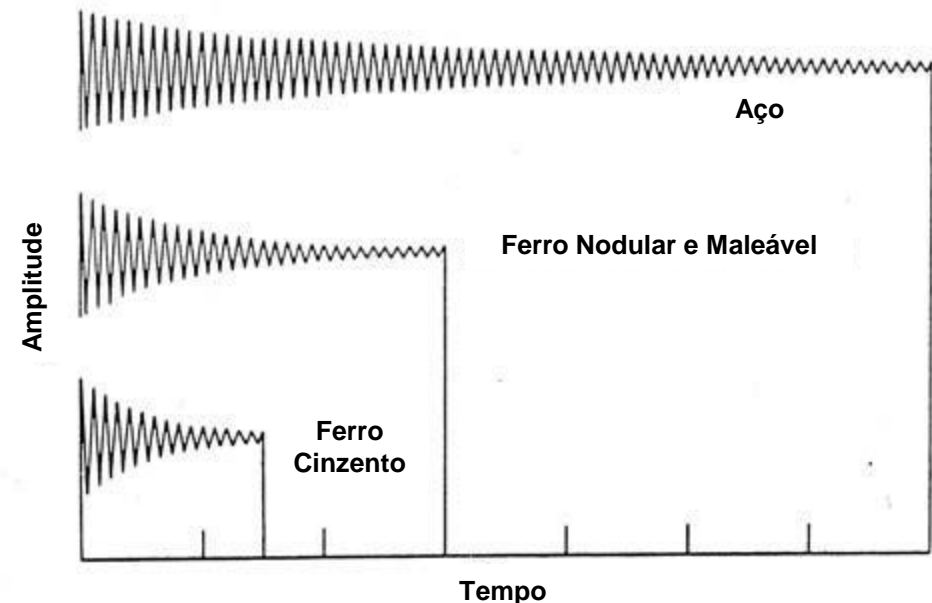
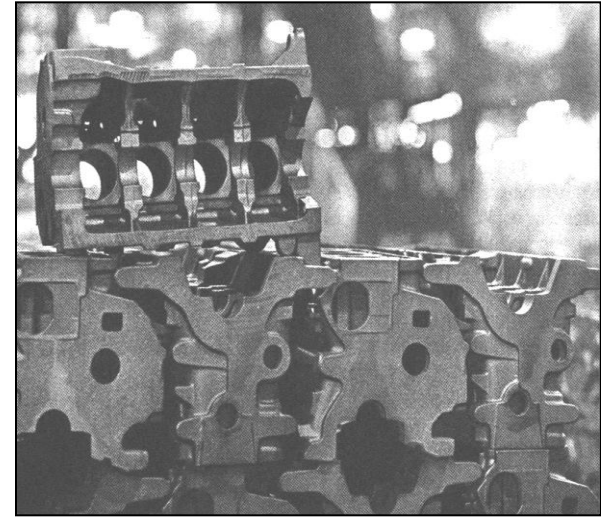
Ferros Fundidos Cinzentos

Aplicações

- Discos de Freio e Blocos de Motor
- Eixos de Comando de Válvulas
- Hidrantes de Bombeiro
- Carcaças de Bombas
- Bases de Máquinas

Características:

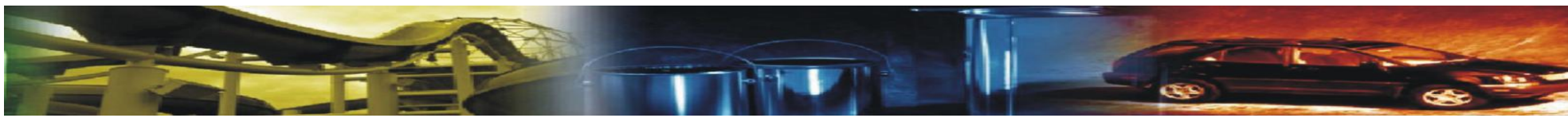
- Boa Fluidadez (fundibilidade) e Baixo custo
- Usinabilidade
- Resistência ao Desgaste (efeito da Grafita)
- Amortecedor de Vibrações
- Elevada resistência à compressão e baixa à tração



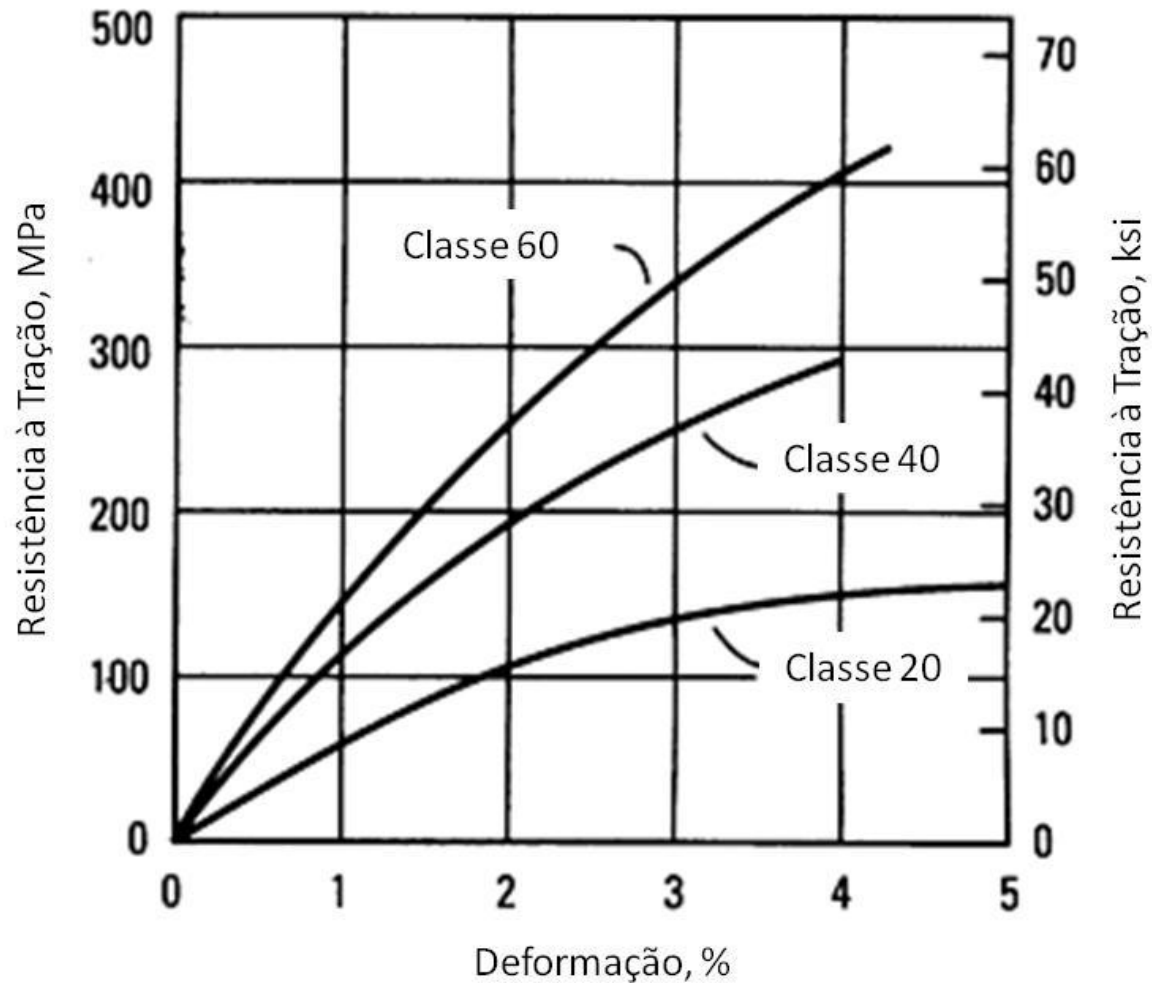
Ferros Fundidos Cinzentos - Classes

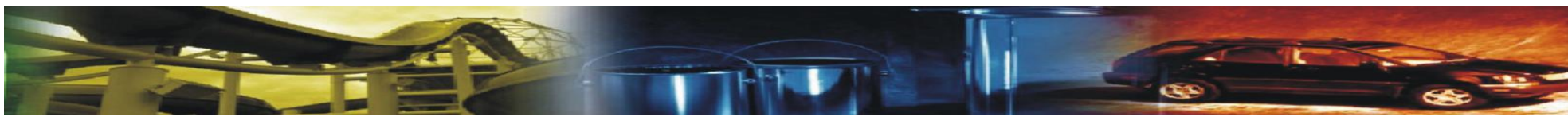
Classe	Resistência Mecânica		Resistência à torção		Resistência à Compressão		Limite de Fadiga por dobramento reverso		Carregamento Transversal à barra de teste		Dureza, HB
	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	kgf	lbf	
20	152	22	179	26	572	83	69	10	839	1850	156
25	179	26	220	32	669	97	79	11.5	987	2175	174
30	214	31	276	40	752	109	97	14	1145	2525	210
35	252	36.5	334	48.5	855	124	110	16	1293	2850	212
40	293	42.5	393	57	965	140	128	18.5	1440	3175	235
50	362	52.5	503	73	1130	164	148	21.5	1633	3600	262

Grau / Classe ASTM A48	Carbono Total (CT)	Si
20	3,40 – 3,60	2,30 – 2,50
30	3,10 – 3,30	2,10 – 2,30
40	2,95 – 3,15	1,70 – 2,00
50	2,70 – 3,00	1,70 – 2,00
60	2,50 – 2,85	1,90 – 2,10



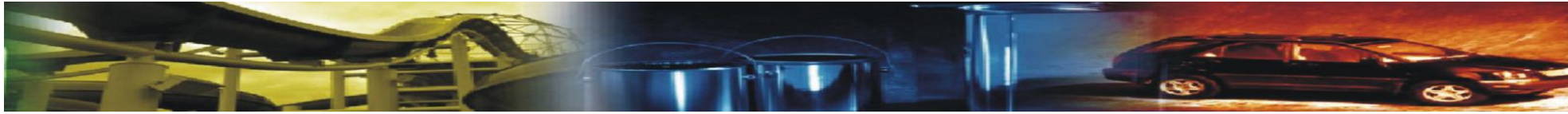
Ferros Fundidos Cinzentos - Classes





Ferros Fundidos Cinzentos - Propriedades

Resistência Mecânica		Densidade		Condutividade Térmica na temperatura indicada, W/m.K		
MPa	ksi	g/cm ³	lb/in. ³	100 °C (212 °F)	300 °C (572 °F)	500 °C (932 °F)
150	22.0	7.05	0.255	65.7	53.3	40.9
180	26.0	7.10	0.257	59.5	50.3	40.0
220	32.0	7.15	0.258	53.6	47.3	38.9
260	38.0	7.20	0.260	50.2	45.2	38.0
300	43.5	7.25	0.262	47.7	43.8	37.4
350	51.0	7.30	0.264	45.3	42.3	36.7



Metalurgia dos Ferros Fundidos Nodulares

Em 1940 foi descoberto que a adição de elementos como Magnésio, Níquel-Magnésio e Fe-Si-Mg poderiam esferoidizar a Grafita.

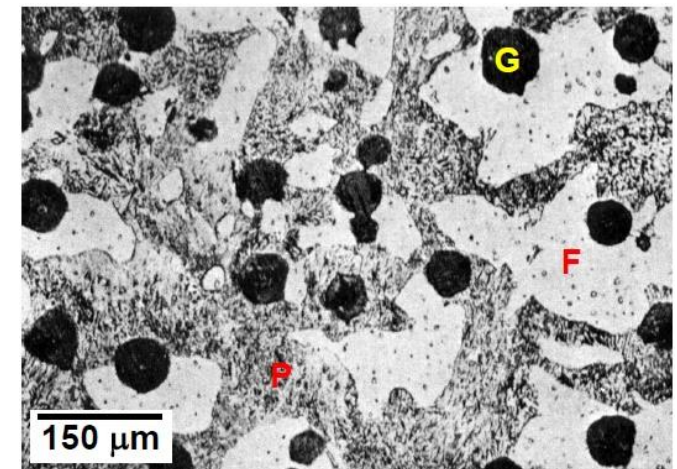
Entre 20 e 30% da produção mundial de Ferros Fundidos é de Nodular.

Os inoculantes utilizados são diferentes em relação aos Ferros Cinzentos, apresentando Magnésio na composição.

Nº Células/cm² na solidificação:

Ferro Cinzento: 8 - 10

Ferro Nodular: 200 – 600





Metalurgia dos Ferros Fundidos Nodulares

1- Composição Química

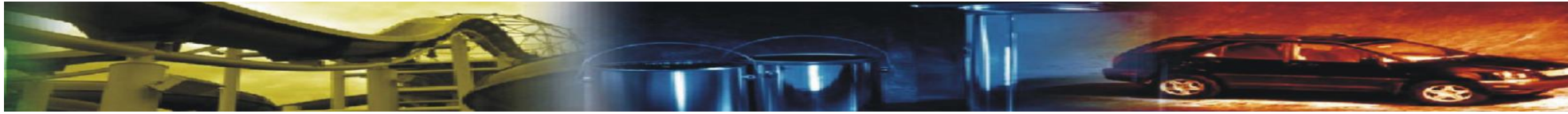
A escolha da composição do ferro fundido está baseada nos mesmos aspectos apresentados para os Cinzentos, entretanto, o efeito da composição sobre a formação da Grafita é menor, haja visto que o tratamento do ferro líquido é dominante nesta classe de Ferros Fundidos.

Efeito dos Elementos de Liga:

Elementos que promovem a Esferoidização: Magnésio, Cálcio, Terras Raras, (Cério e Lantânio).

Neutros: Ferro, Carbono e Ligas

Elementos Degeneradores da Grafita (Antiesferoidização): Alumínio, Arsênio, Bismuto, Telúrio, Titânio, Estanho, Enxofre, Antimônio.



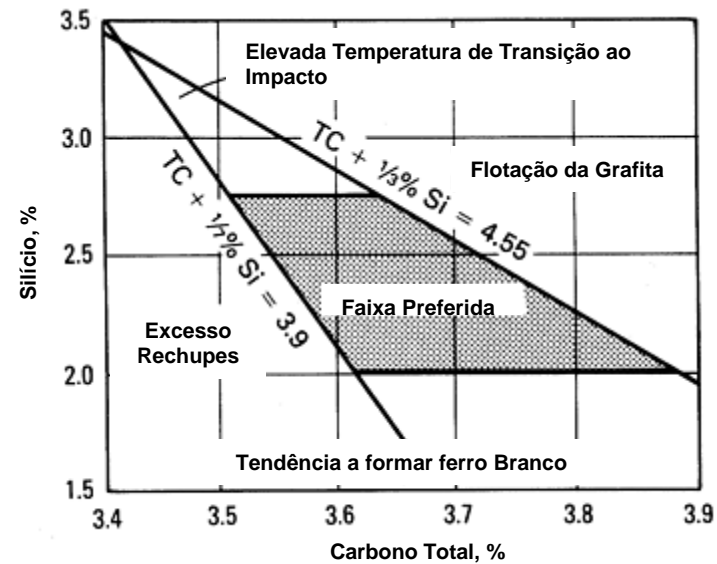
Metalurgia dos Ferros Fundidos Nodulares

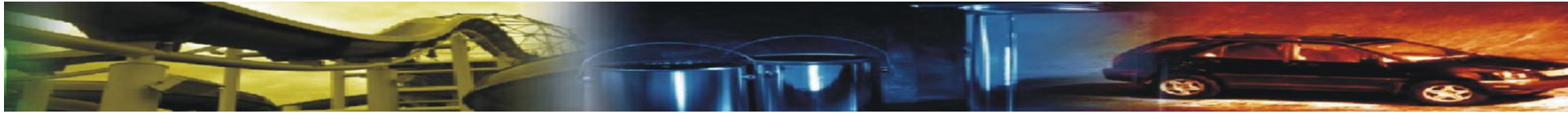
1- Composição Química

Grafita Esferoidal



Teores ideais de Carbono e Silício

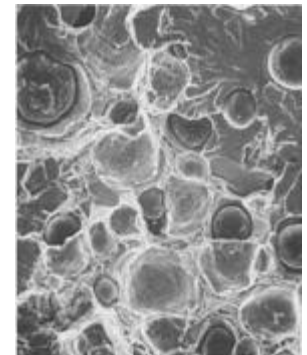
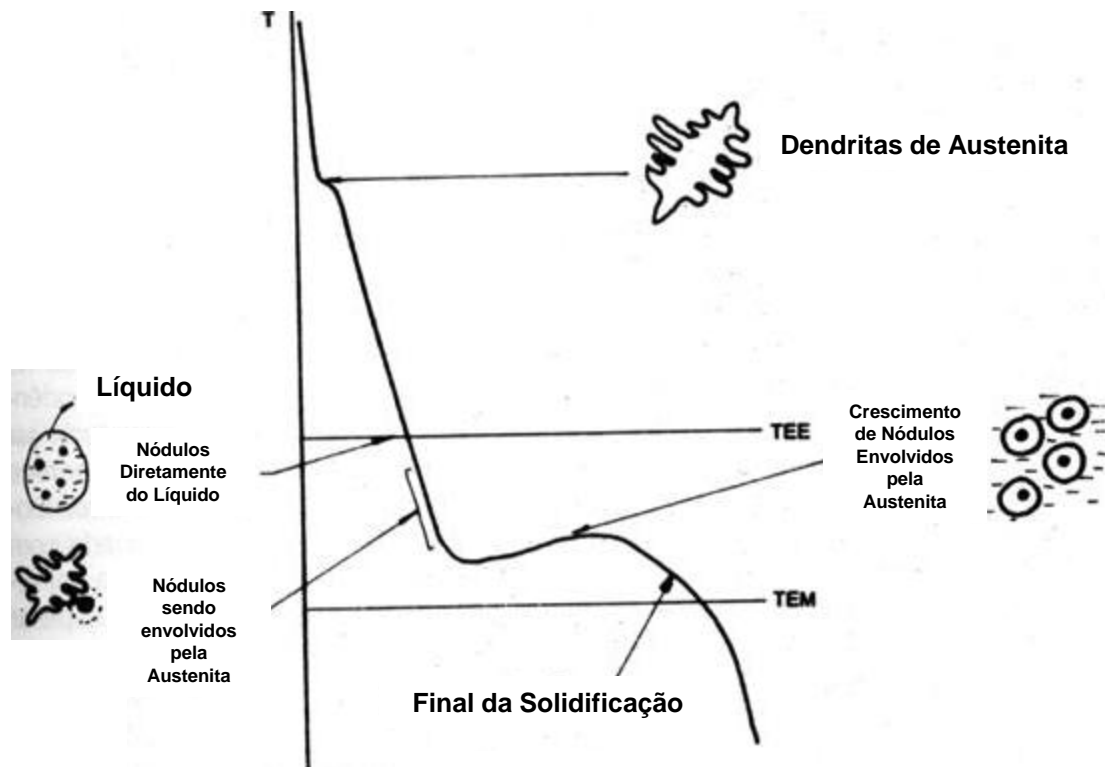




Metalurgia dos Ferros Fundidos Nodulares

2- Taxa de Resfriamento

Os ferros Nodulares são menos sensíveis ao coquilhamento, tendo em vista o forte *Tratamento do Ferro Líquido* realizado para estas ligas.





Metalurgia dos Ferros Fundidos Nodulares

3- Tratamento do Ferro Líquido

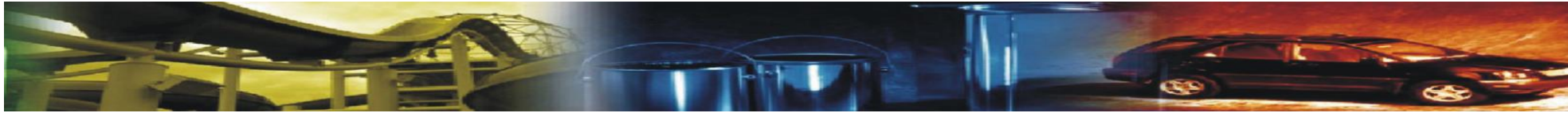
É realizado em dois estágios:

1- Modificação: consiste no tratamento do líquido com Magnésio ou Magnésio-ligas antes do vazamento.

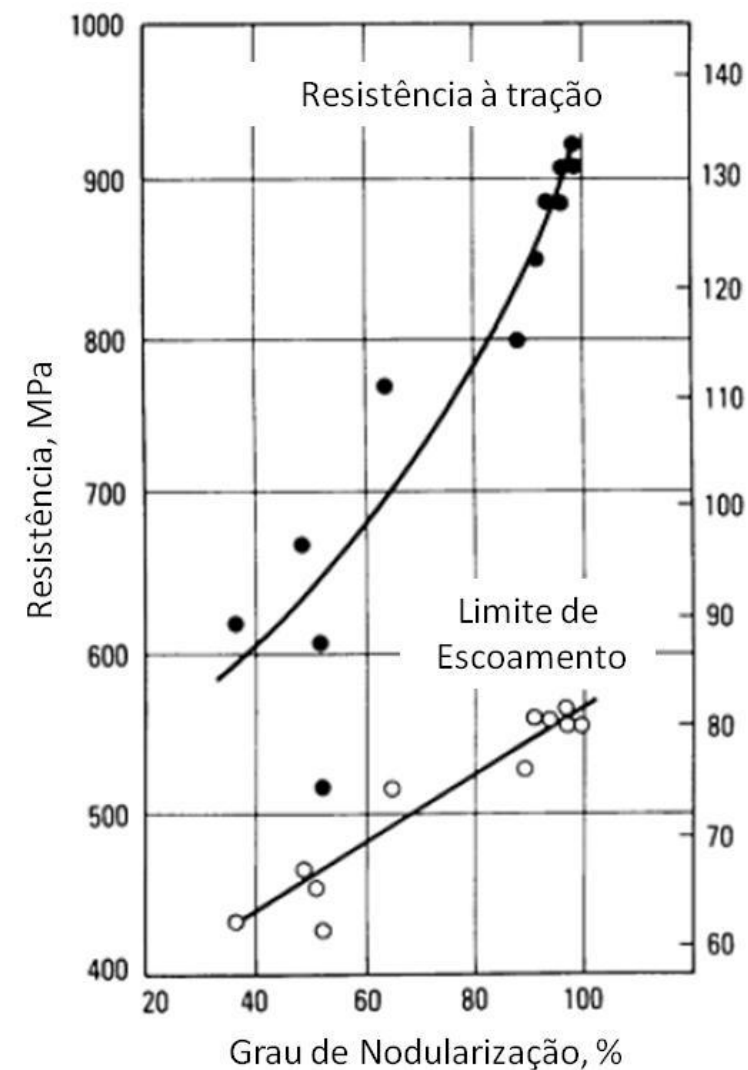
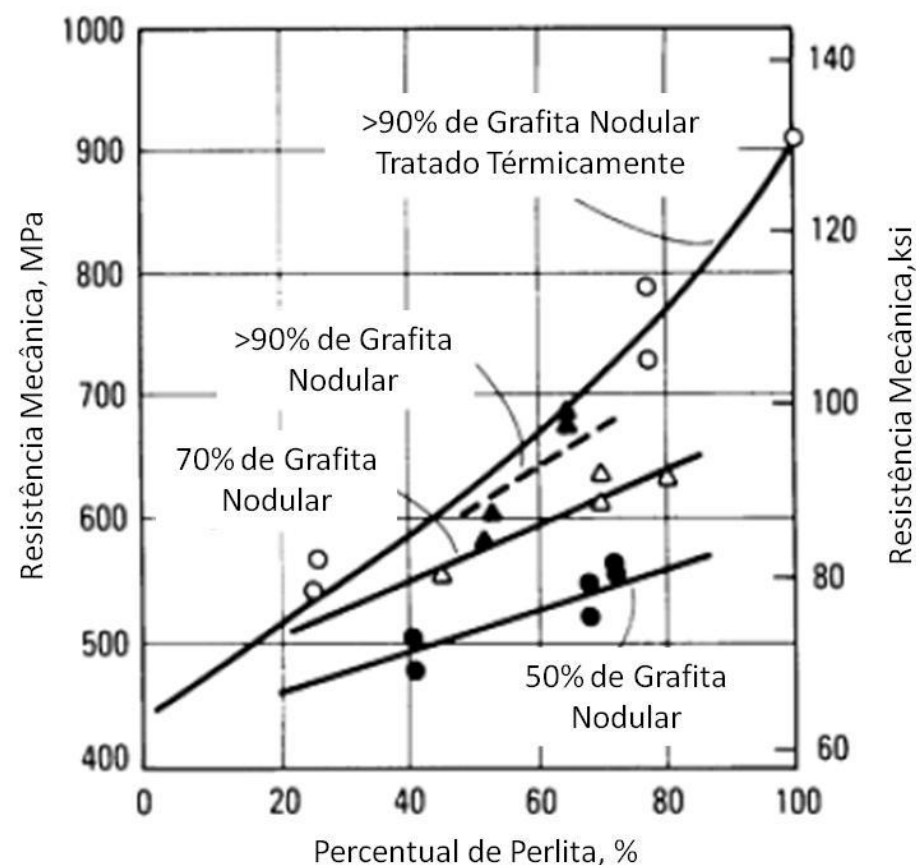
2- Inoculação: consiste em induzir a formação de grande nº de núcleos de solidificação, promovendo a formação de inúmeros nódulos de grafita. Os inoculantes são: Mg, Fe-Si-Mg, Ni-Mg.

Parâmetros Importantes do controle da Grafita:

Forma (grau de nodularização), Tamanho dos nódulos, Distribuição e N° nódulos/cm².



Metalurgia dos Ferros Fundidos Nodulares





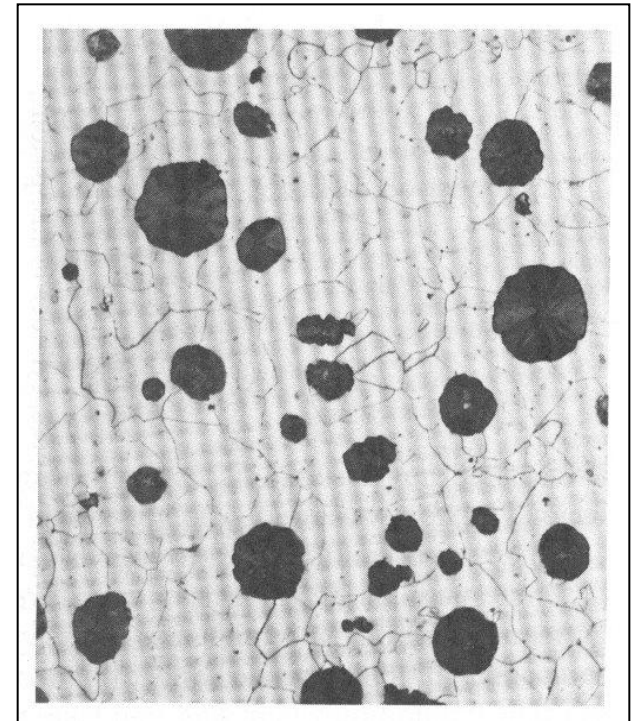
Metalurgia dos Ferros Fundidos Nodulares

4- Tratamento Térmico

São extensamente aplicados aos ferros nodulares e alteram a estrutura da matriz.

Os tratamentos mais usuais:

- Recozimento para Alívio de Tensões
- Recozimento para gerar matriz Ferrítica
- Normalização para gerar matriz Perlítica
- Têmpera e Revenimento
- Austêmpera
- Têmpera Superficial.





Ferros Fundidos Nodulares

Aplicações

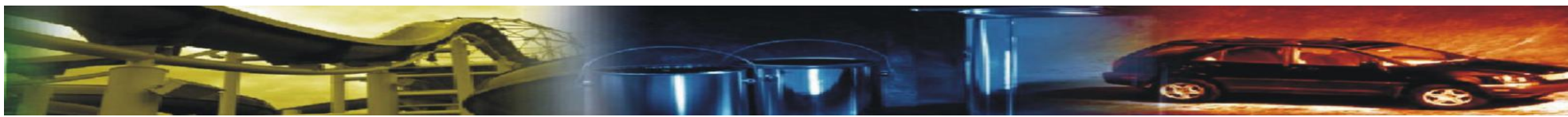
- Girabrequins e Mangas de Eixo
- Coletores de Escapamento
- Anéis de Pistão
- Rodas Dentadas
- Componentes de Bombas



Características:

- Alta resistência, tenacidade e ductilidade
- Boa Usinabilidade
- Alta Resistência ao Desgaste
- Fluidez boa
- Soldabilidade melhorada
- Baixo custo (superior ao cinzento)





Ferros Fundidos Nodulares - Classes

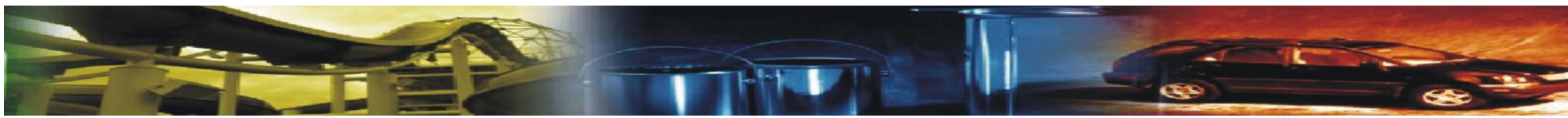
Grau	Resistência Mecânica		Limite Escoam.		A (%) Mín.	Energia Impacto				Dureza, HB	Microestrutura
						Média		Indiv.			
	MPa	ksi	MPa	ksi		J	ft · lbf	J	ft · lbf		
Norma ISO 1083 / 1976											
800-2	800	116	480	70	2	...	...	...	...	248-352	Perlita
700-2	700	102	420	61	2	...	...	...	...	229-302	Perlita
600-3	600	87	370	54	3	...	...	...	...	192-269	Perlita + Ferrita
500-7	500	73	320	46	7	...	...	...	...	170-241	Ferrita + Perlita
400-12	400	58	250	36	12	...	...	...	...	<201	Ferrita
370-17	370	54	230	33	17	13	9.5	11	8.1	<179	Ferrita



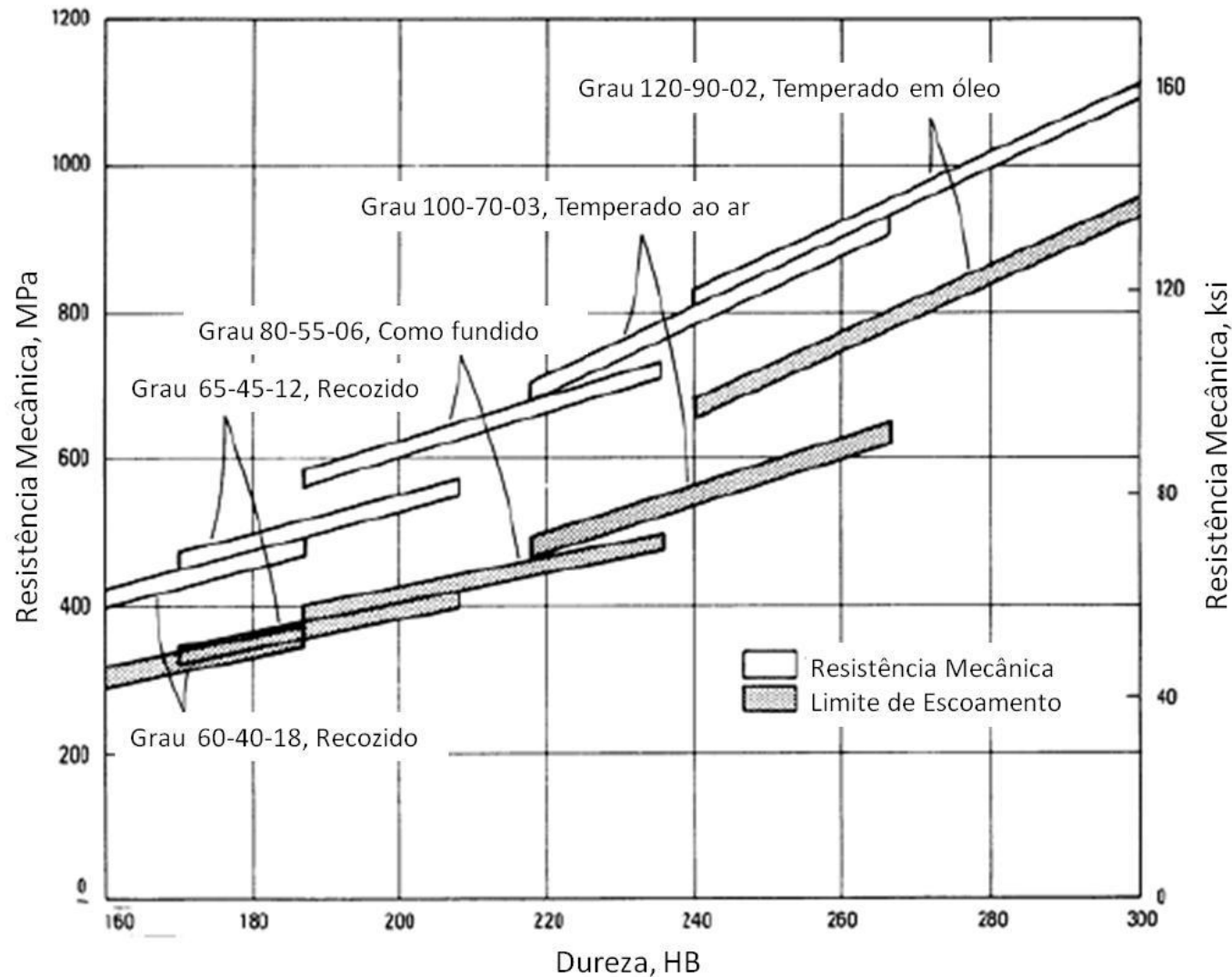
Ferros Fundidos Nodulares - Classes

Grau	Resistência Mecânica		Limite Escoam.		A (%) Mín.	Energia Impacto				Dureza, HB	Microestrutura
						Média		Indiv.			
	MPa	ksi	MPa	ksi		J	ft · lbf	J	ft · lbf		
Norma ASTM A536											
60-40-18	414	60	276	40	18	...	...	...	...	...	...
60-42-10	414	60	290	42	10	...	...	...	...	...	...
65-45-12	448	65	310	45	12	...	...	...	...	...	...
70-50-05	485	70	345	50	5	...	...	...	...	...	...
80-55-06	552	80	379	55	6	...	...	...	...	...	...
80-60-03	552	80	414	60	3	...	...	...	...	...	...
100-70-03	690	100	483	70	3	...	...	...	...	...	...

[illegible]



Ferros Fundidos Nodulares - Classes



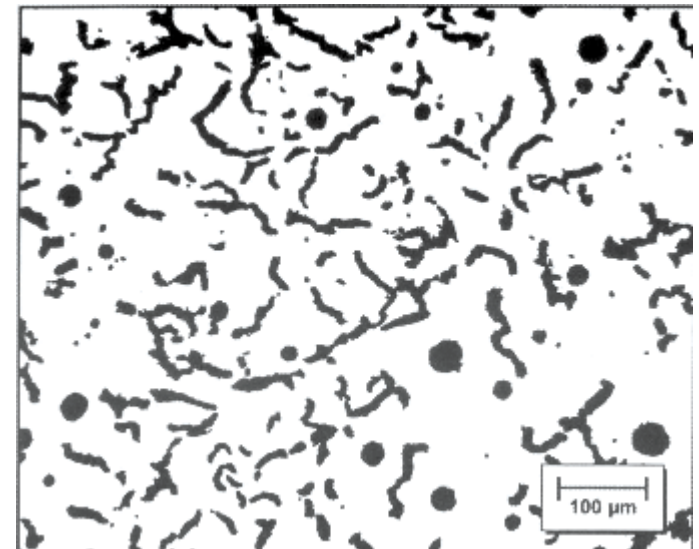


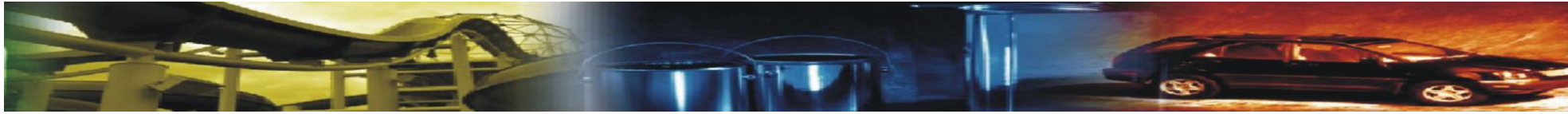
Metalurgia dos Ferros Fundidos Vermiculares

Os Ferros Vermiculares (ou de Grafita Compacta) possuem a Grafita intermediária entre os ferros Cinzentos e Nodulares. Desta forma, as propriedades são também intermediárias entre os dois anteriores.

Desenvolvimento de motores Diesel de alto desempenho (mais eficientes e menos poluentes) indicam necessidade de altas pressões e temperaturas de trabalho, podendo levar os materiais normais (Cinzento) a falhas prematuras.

Ferro de Grafita Compacta ou Vermicular.

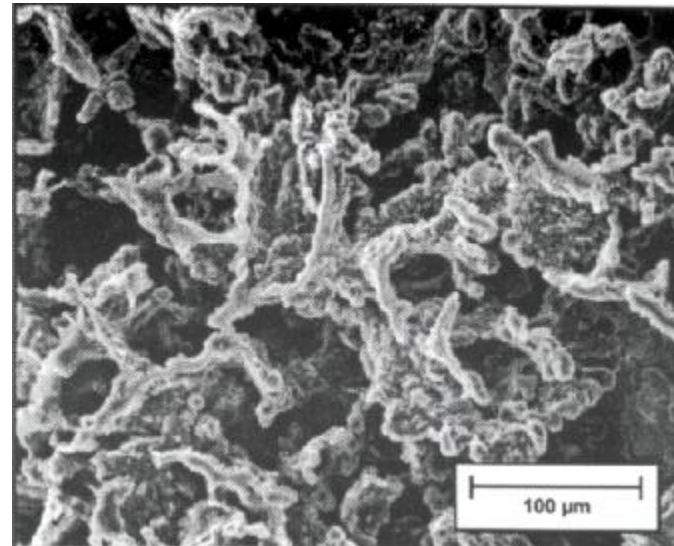


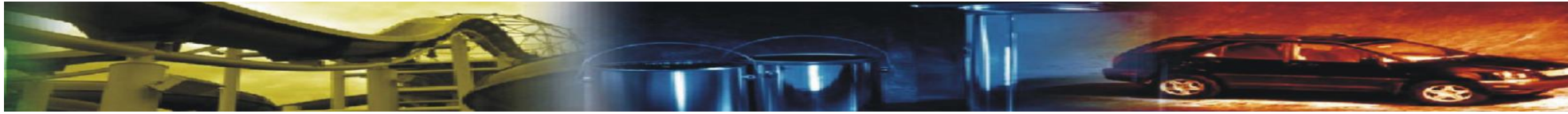


Metalurgia dos Ferros Fundidos Vermiculares

1- Composição Química

A escolha da composição do ferro fundido está baseada nos mesmos aspectos apresentados para Cinzentos e Nodulares, entretanto, para a obtenção dos ferros Vermiculares é necessário combinar a adição de elementos Esferoidizantes (Magnésio, Cálcio e Terras Raras) com elementos Degeneradores da Grafita (Titânio e Alumínio).





Metalurgia dos Ferros Fundidos Vermiculares

2- Taxa de Resfriamento

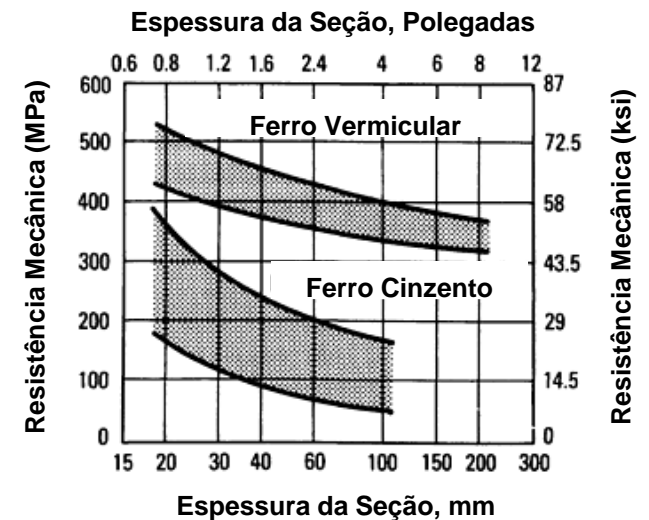
Elevadas taxas de resfriamento devem ser evitadas, pois há tendência ao coquilhamento.

3- Tratamento do Ferro Líquido

É realizado em dois estágios:

1- Modificação: consiste no tratamento do líquido com Magnésio ou Magnésio-Titânio ou Cálcio-Cério antes do vazamento.

2- Inoculação: Deve ser menos intensa que nos nodulares, de maneira a evitar a excessiva nodularização.





Metalurgia dos Ferros Fundidos Vermiculares

4- Tratamento Térmico

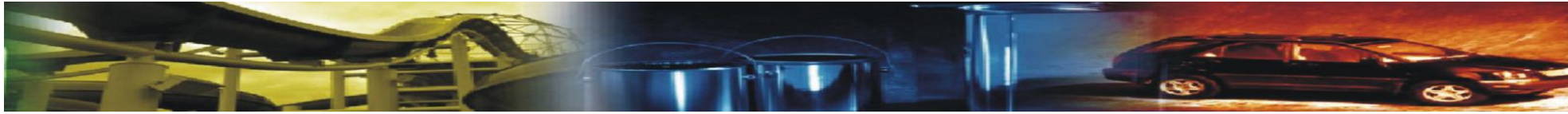
Não são comuns tratamentos térmicos nos ferros Vermiculares.

Aplicações

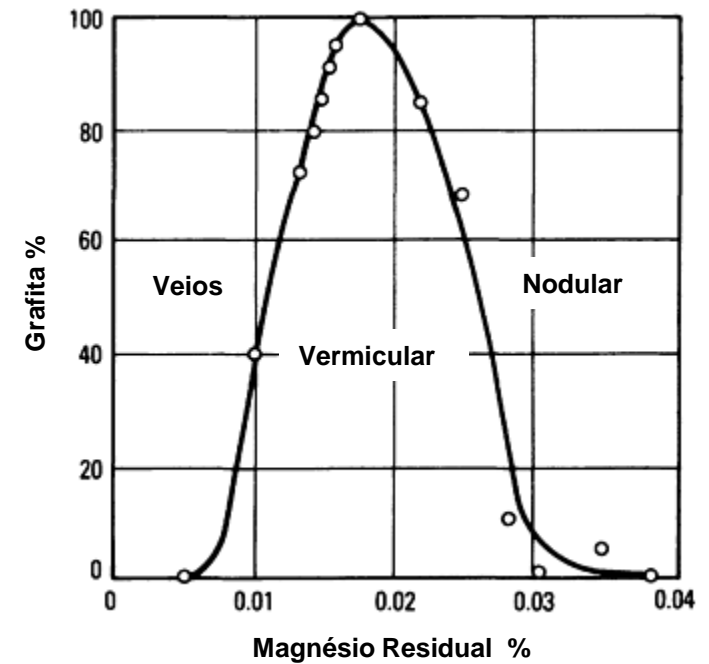
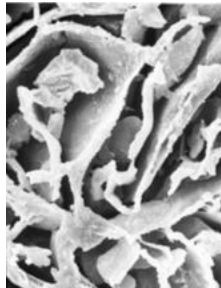
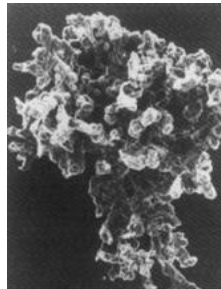
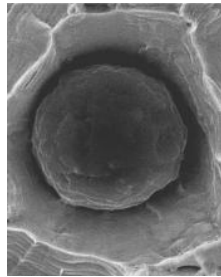
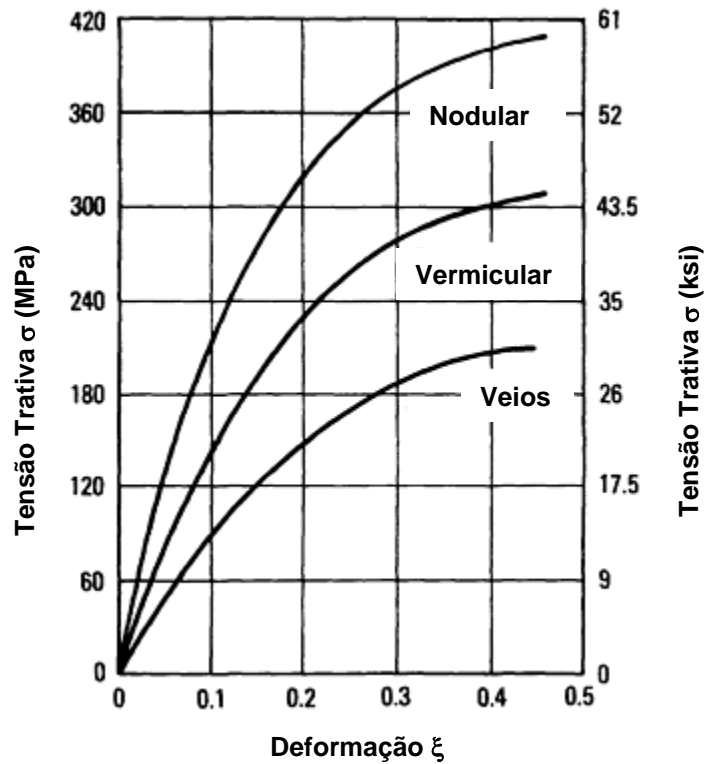
- Peças para Motores Diesel, Carcaças de Caixas de Câmbio, Eixos Excêntricos, Rodas Dentadas, Blocos de Motor, Moldes de Ligoteiras, Coletores de Escapamento e Exaustores.

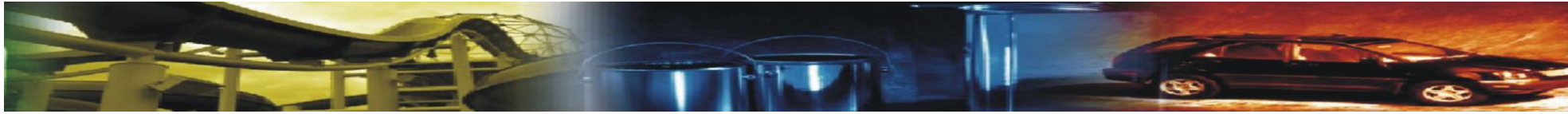
Características:

- Alta resistência,
- Tenacidade e Ductilidade superior aos Cinzentos
- Boa Usinabilidade
- Alta Resistência ao Desgaste
- Melhor resistência à Fadiga (em relação aos Cinzentos)

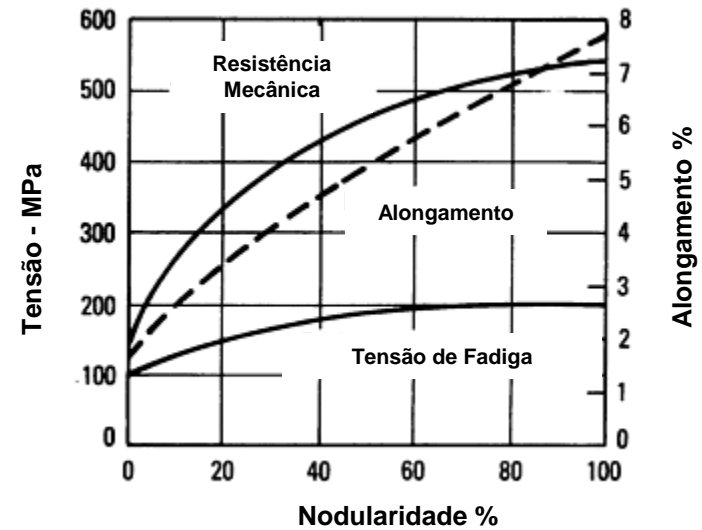
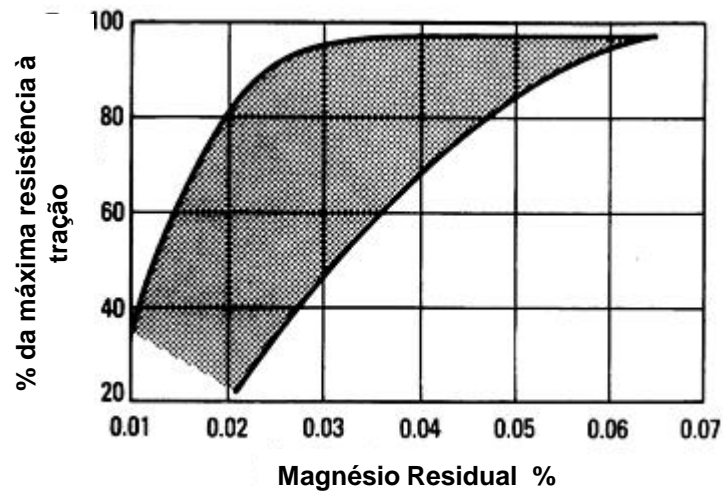


Comparação entre Ferros Fundidos





Comparação entre Ferros Fundidos

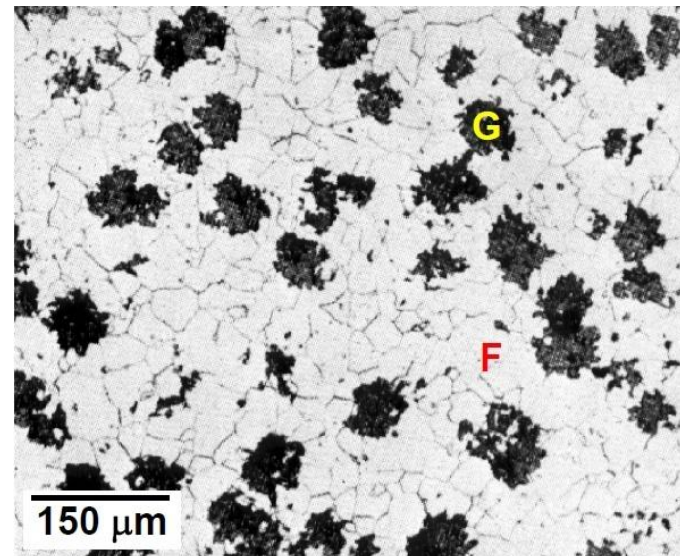




Metalurgia dos Ferros Fundidos Maleáveis

Diferem dos anteriores pois apresentam estrutura do ferro fundido Branco no estado como fundido. A estrutura consiste de Carbonetos de Ferro em matriz Perlítica. Esta estrutura é então tratada termicamente, resultando na decomposição dos Carbonetos de Ferro e formação de Grafita.

A estrutura final é composta por Grafita e Perlita / Grafita, Perlita e Ferrita / Grafita e Ferrita.





Metalurgia dos Ferros Fundidos Maleáveis

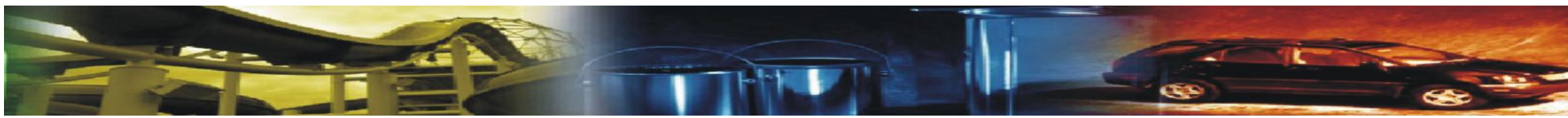
1- Composição Química

A escolha da composição do ferro fundido deve considerar a formação de estruturas que permitam a rápida transformação por tratamentos térmicos.

Efeito dos Elementos de Liga:

A razão Carbono/Silício deve ser controlada a fim de evitar a formação de grafita diretamente da fundição. Por outro lado, esta razão influencia na decomposição durante tratamento térmico.

Deve-se cuidar com a adição de elementos de liga que são fortes formadores de Carbonetos como o Cromo, que resultará em dificuldade de decomposição na Maleabilização.



Metalurgia dos Ferros Fundidos Maleáveis

2- Taxa de Resfriamento

São menos sensíveis a taxas de resfriamento, uma vez que não são obtidos por fundição e sim, por tratamento térmico.

3- Tratamento do Ferro Líquido

Visa o aumento dos números de núcleos disponíveis para a formação da grafita pela decomposição no estado sólido. Pode ser realizado de duas formas:

1- Adição de Magnésio, Telúrio, Bismuto e Cério, que induzem o aumento do super-resfriamento na solidificação, resultando em estrutura mais refinada (maior área entre fases Carboneto / Austenita) auxiliando a nucleação e decomposição.

2- Adição de elementos formadores de Nitretos, como Alumínio, Boro, Titânio e Zircônio.



Metalurgia dos Ferros Fundidos Maleáveis

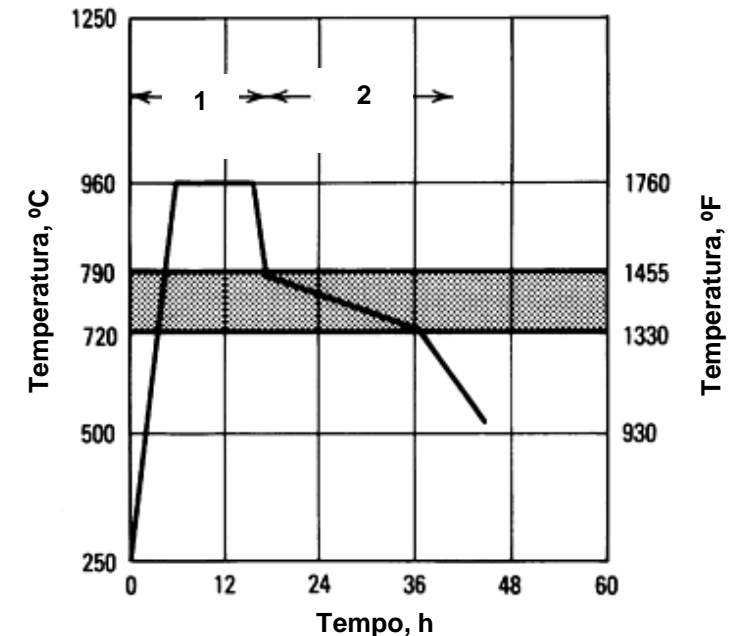
4- Tratamento Térmico

É o tratamento térmico que define a estrutura final dos ferros Maleáveis. O tratamento é composto por dois estágios:

1- Decomposição dos Carbonetos em Grafita e Austenita,

2- Transformação da Austenita em Perlita, Ferrita ou misturas destas.

• Alguns ferros Maleáveis podem ser Temperados e Revenidos.





Ferros Fundidos Maleáveis

Aplicações

- Bielas
- Diferenciais (transmissão)
- “Yokes” – Juntas e Mangas Universais

- Características:

- Alta resistência, tenacidade e ductilidade
- Boa Usinabilidade
- Fluidez (fundibilidade)





Metalurgia dos Ferros Fundidos Especiais

São ferros fundidos que apresentam mudanças drásticas na microestrutura pela adição de elevado teor de elementos de liga. A diferenciada **Resistência ao Desgaste ABRASIVO** é obtida pela formação de Carbonetos de elevada dureza associados algumas vezes a estruturas Martensíticas. À seguir algumas composições:

- Adições de 3,0 a 5,0% de Níquel e 1,5 – 2,5% de Cromo podem resultar em Carbonetos $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$ e estruturas mertensíticas diretamente de fundição.
- Adições de 11,0 – 13,0% de Cromo podem resultar em Carbonetos $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$ de maior dureza em relação aos carbonetos tipo Cementita. Adições de 4,0 – 16,0% de Manganês resultam na formação de $(\text{Fe,Mn})_3\text{C}$, Martensita e Austenita Endurecível por Deformação.



Metalurgia dos Ferros Fundidos Especiais

- Ferros Especiais Ligados para Alta Temperatura (Resistência a Quente) são produzidos com diversas possibilidades:

Adições de 5,0% de Silício geram estruturas com Ferrita e Grafita,

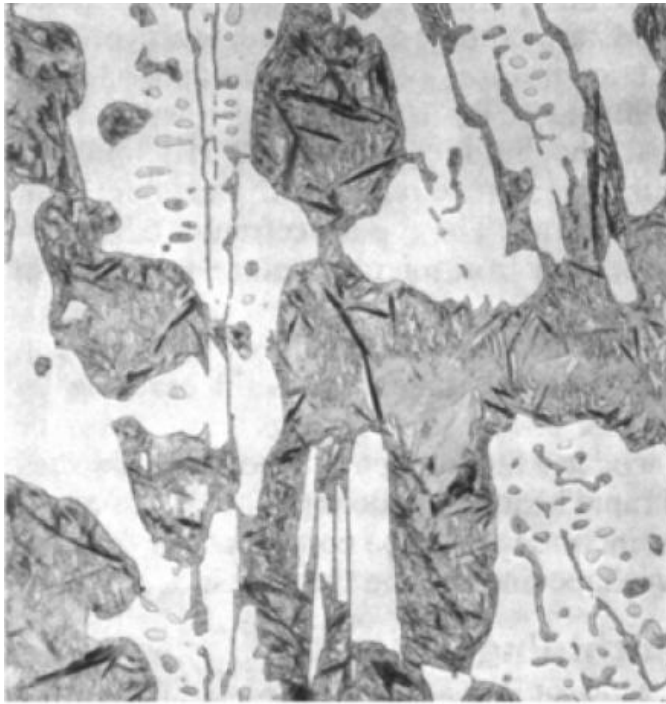
Adições de 11 – 28% de Cromo pode gerar estrutura com Ferrita e Carbonetos

Adições de 18% de Níquel e 5% de Silício resultam em estrutura com Austenita e Grafita Esferoidal ou em Veios.

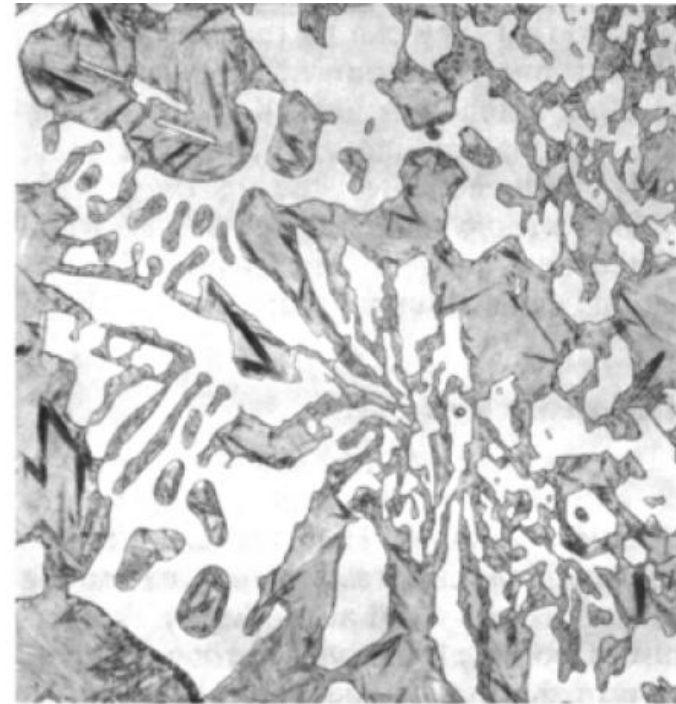
- Ferros Especiais Ligados Resistentes à Corrosão: São produzidos a partir de ligas com elevados teores de elementos de liga, como: Cromo > 28%, Níquel > 18% e Silício > 15%.



Metalurgia dos Ferros Fundidos Especiais



(a)



(b)

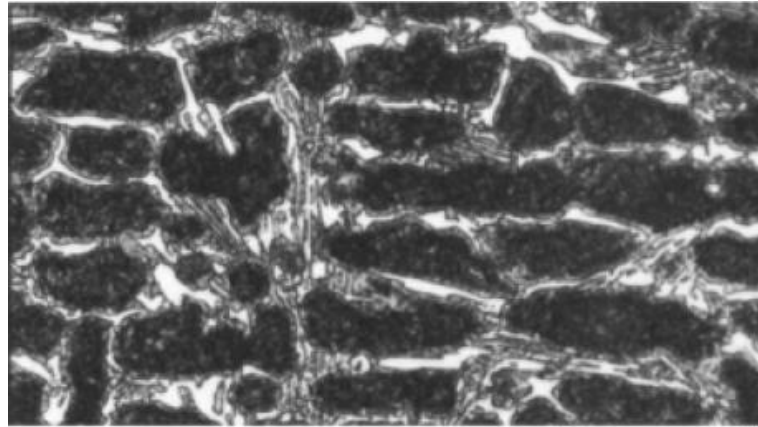
50 μm

(a) Ferro fundido Cromo-Níquel Resistente ao Desgaste Abrasivo (Cr: 1,1 – 4%)

(b) Ferro fundido Cromo-Níquel Resistente ao Desgaste Abrasivo (Cr: 7,0 – 11,0%)

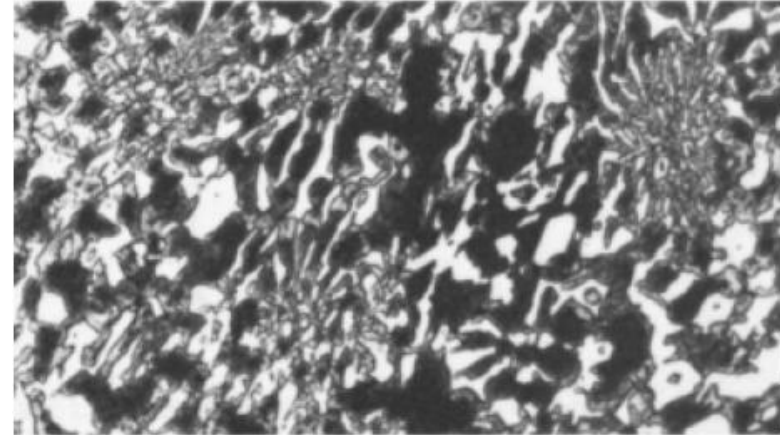


Metalurgia dos Ferros Fundidos Especiais



(a)

200 μm



(b)

200 μm



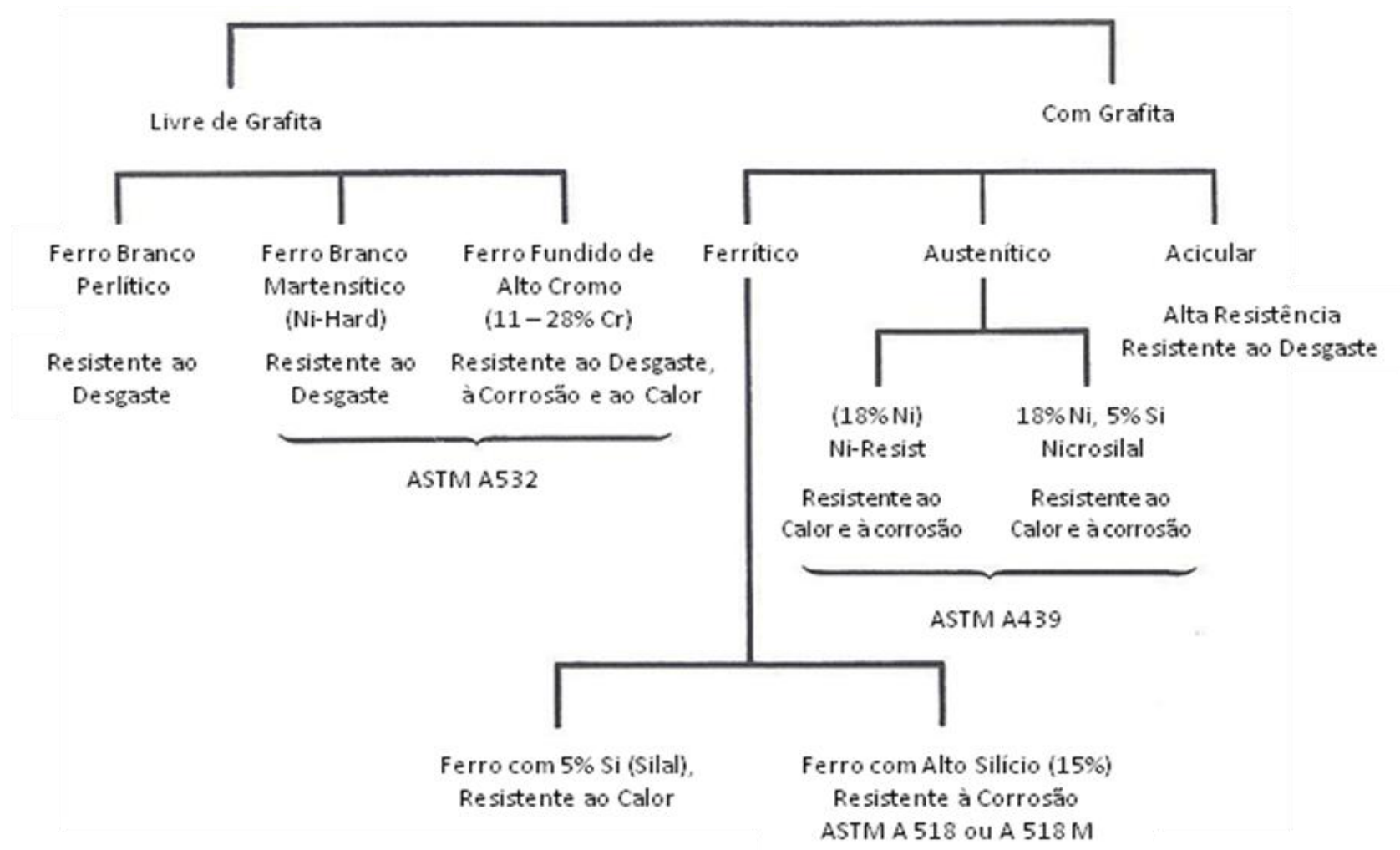
(c)

200 μm

(a), (b) e (c) - Ferros fundidos Alto Cromo, Resistentes ao Desgaste Abrasivo (Cr: 15 – 25%)



Ferros Fundidos Especiais - Tipos





Ferros Fundidos Especiais

Aplicações

- Mineração (brocas para escavação)
- Moedores e Britadores
- Termoelétricas (moagem de carvão mineral)

- Características:

- Alta Resistência ao Desgaste Abrasivo
- Fluidéz (fundibilidade)
- Elevada Resistência à Corrosão
- Estabilidade em Alta Temperatura.

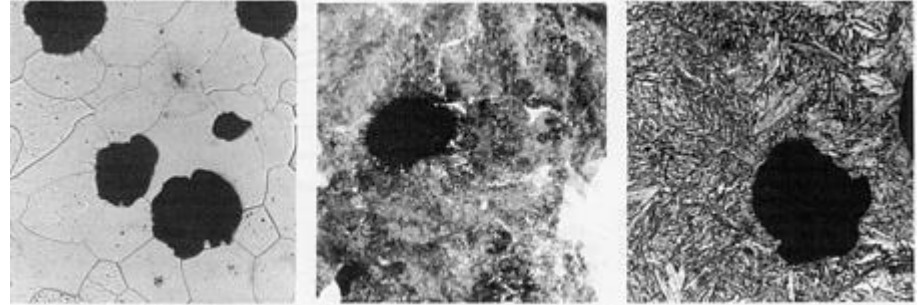




Tratamentos Térmicos dos Ferros Fundidos

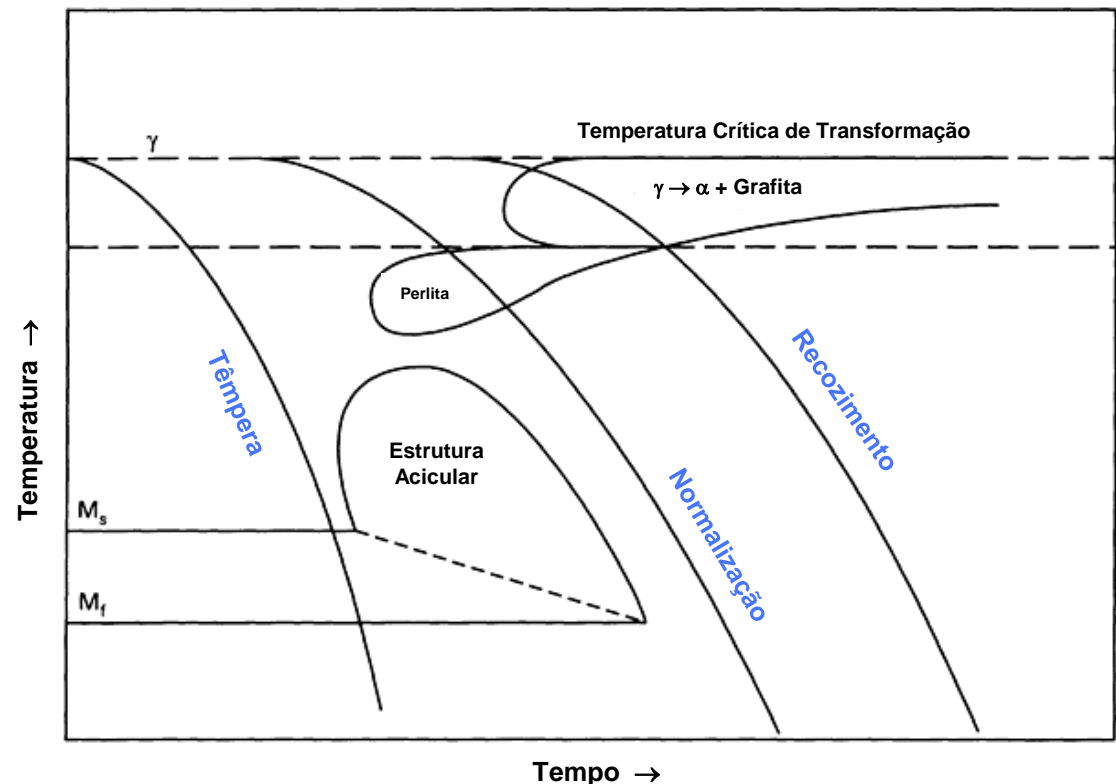
Objetivos:

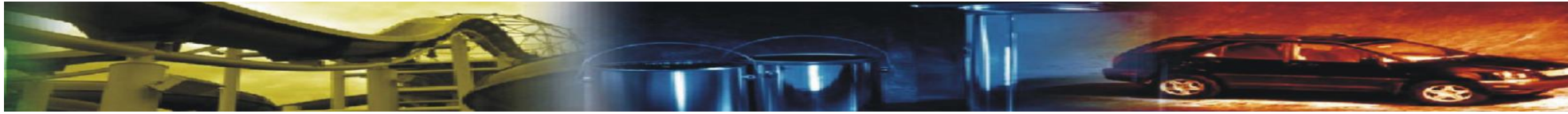
- Alívio de tensões provocadas pela solidificação
- Obtenção de maior ductilidade e maior usinabilidade
- Melhorar as propriedades mecânicas (resistência)
- Promover a decomposição de carbonetos
- Endurecimento



Principais Tratamentos:

- Recozimento
- Alívio de Tensões
- Normalização
- Têmpera e Revenimento
- Endurecimento Superficial
- Martêmpera
- Austêmpera.





Tratamentos Térmicos dos Ferros Fundidos

Recozimento de Ferros Cinzentos

É aplicado quando for desejada maior ductilidade e usinabilidade e, ao mesmo tempo, não há necessidade de elevada resistência mecânica.

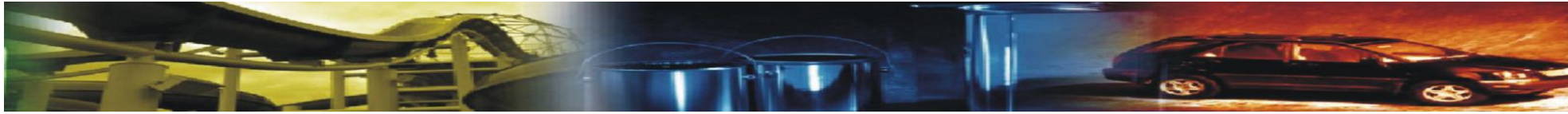
A *microestrutura final da matriz é Ferrita*, obtida pela decomposição dos carbonetos da perlita obtida originalmente na solidificação.

Empregam-se **dois diferentes ciclos de recozimento** para os ferros fundidos Cinzentos:

1- Recozimento subcrítico: Consiste no aquecimento na faixa de 700 – 760°C, encharque de duas horas (+ 1h / 25 mm de seção) e resfriamento lento até a faixa de 300°C em taxas de resfriamento não superiores a 100°C/h.

2- Recozimento Pleno: Consiste na austenitização entre 800 e 900°C, encharque de duas horas (+1h / 25mm de seção) e resfriamento até 700°C em taxa de resfriamento que não deve exceder 40°C/h. O ferro fundido permanece a 700°C por uma hora a cada 25mm de espessura. Resfria-se o fôfo até 300°C em taxas de resfriamento não superiores a 100°C/h. É usado quando elementos de liga estabilizadores da perlita estiverem presentes, dificultando a obtenção de ferrita e decomposição dos carbonetos.

OBS: Quando estruturas coquilhadas estiverem presentes, pode ser necessário utilizar temperatura de austenitização entre 900 e 950°C.



Tratamentos Térmicos dos Ferros Fundidos

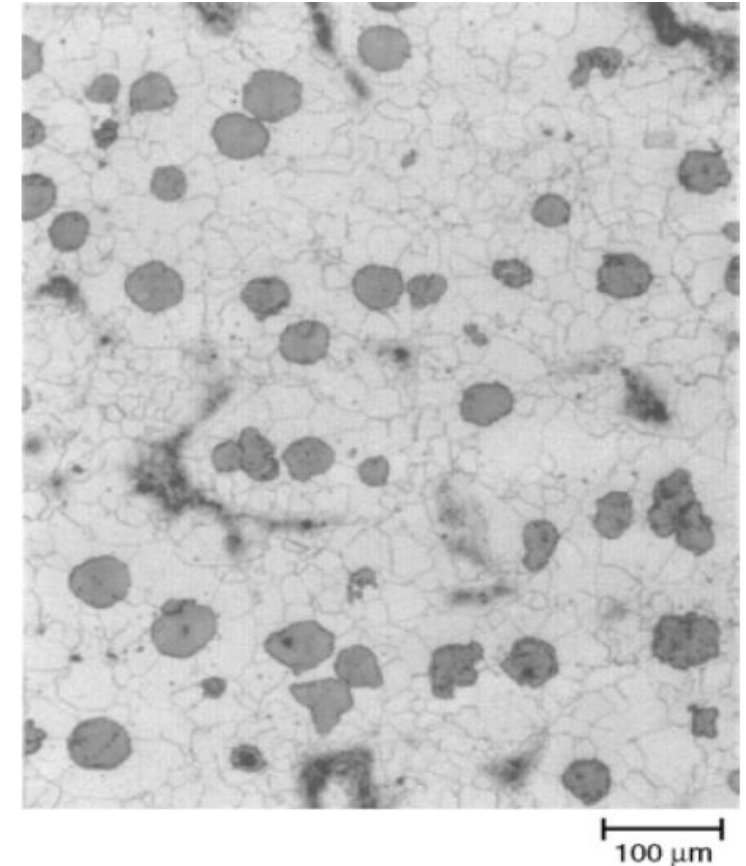
Recozimento de Ferros Nodulares

Empregam-se *três diferentes ciclos de recozimento* para os ferros fundidos nodulares:

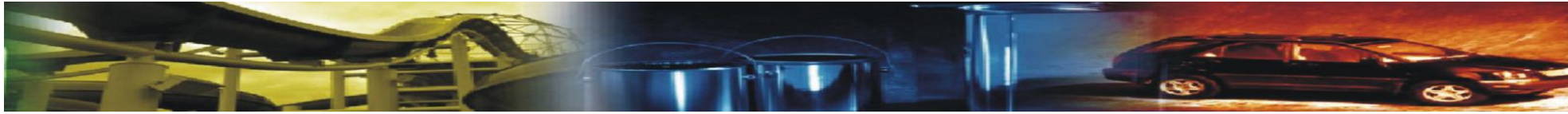
1- Consiste no aquecimento na faixa de 900 – 950°C, encharque de uma hora (+1h / 25mm de seção) e resfriamento até 690°C permanecendo nesta por cinco horas, mais uma hora a cada 25mm de espessura. As taxas de resfriamento no forno não devem ser superiores a 40°C/h.

2- Consiste na austenitização entre 800 e 950°C e resfriamento até 650°C com taxa de resfriamento não superiores a 19°C/h, seguido de resfriamento até a temperatura ambiente.

3- Consiste no aquecimento até 700°C (subcrítico), encharque por cinco horas (+1h / 25mm de seção). O resfriamento deve ser no forno até 300°C, com taxa de resfriamento inferior a 100°C/h.



Ferro Fundido Nodular Ferrítico



Tratamentos Térmicos dos Ferros Fundidos

Alívio de Tensões em Ferros Cinzentos e Nodulares

Emprega-se o alívio de tensões para minimizar as tensões surgidas no material em decorrência da solidificação.

São utilizadas temperaturas entre 510 e 680°C, resultando em pequenas alterações microestruturais e, em consequência, pequena alteração nas propriedades. Quanto mais próxima de 680°C for a temperatura, maior a influência sobre as propriedades sendo, algumas vezes, indesejada a perda de resistência mecânica.

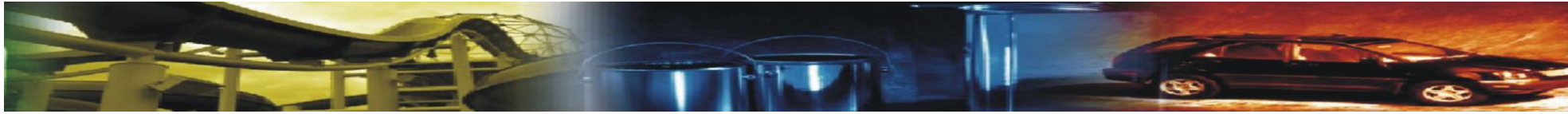
Tempo de encharque: 1h + 1h/25mm de seção.

OBS: Para evitar o surgimento de novas tensões térmicas, recomenda-se o resfriamento lento até cerca de 300°C.

Normalização de Ferros Cinzentos e Nodulares

Emprega-se a normalização para aumentar a resistência mecânica ou restaurar propriedades similares ao estado como fundido, uma vez que podem ter perdido resistência mecânica como resultado de outros tratamentos térmicos anteriores. **Microestrutura usualmente obtida é a perlita fina.**

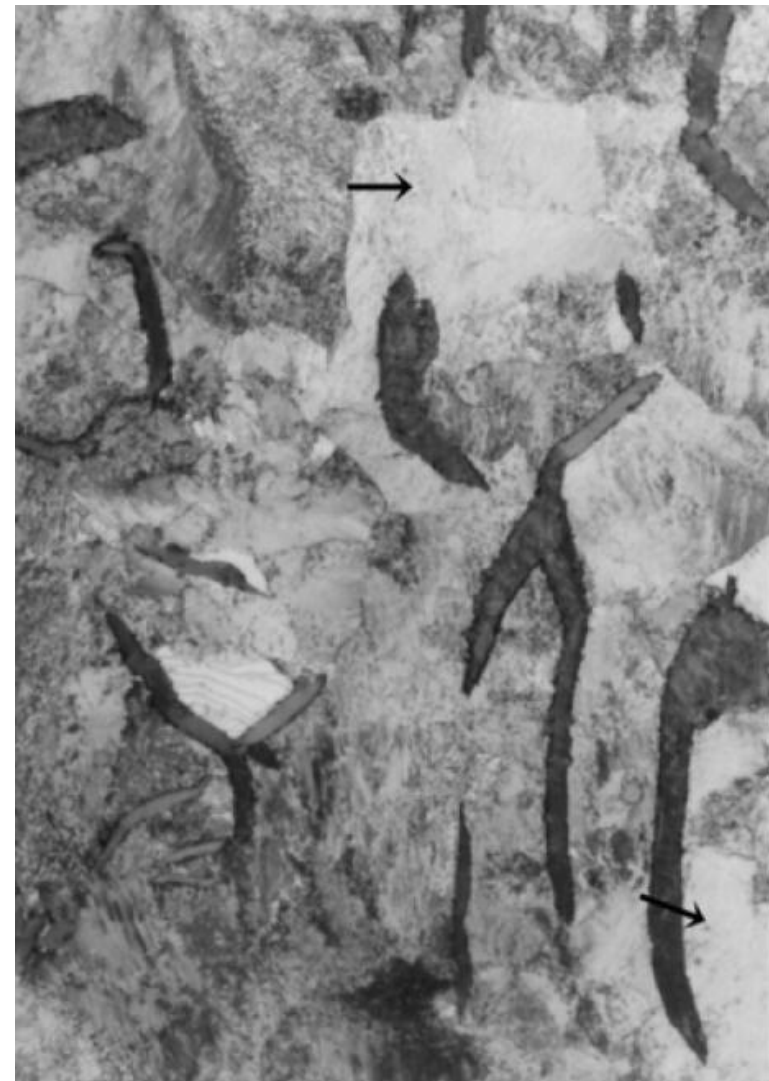
Consiste no aquecimento para austenitização entre 870 e 950°C por 1h + 1h a cada 25mm de espessura (solubilização do carbono), seguido de resfriamento ao ar até a temperatura ambiente.



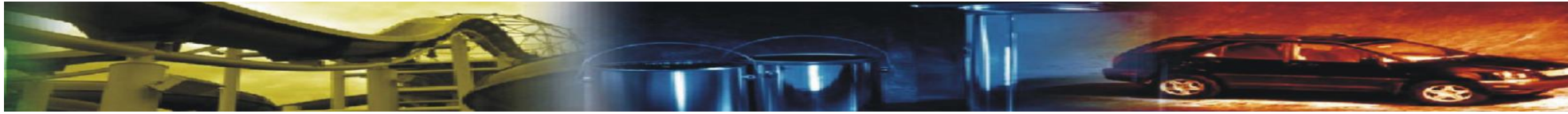
Tratamentos Térmicos dos Ferros Fundidos



20 μm



20 μm



Tratamentos Térmicos dos Ferros Fundidos

Têmpera e Revenimento em Ferros Cinzentos e Nodulares

Emprega-se a têmpera e revenimento para elevar a dureza e a resistência dos ferros fundidos.

Consiste no aquecimento para austenitização ($850 - 930^{\circ}\text{C}$), manutenção por 30 a 60 minutos a cada 25mm de seção e resfriamento rápido (em óleo) para obter microestrutura martensítica, seguido de revenimento em temperatura mais baixa.

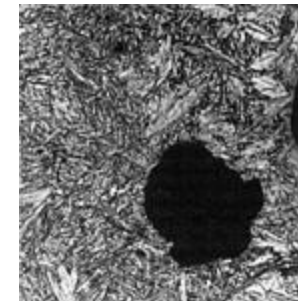
OBS: O tratamento de têmpera e revenimento em ferros cinzentos é mais crítico tendo em vista o efeito de entalhe dos veios da grafita sobre a matriz.

Endurecimento superficial

O objetivo do endurecimento superficial visa o desenvolvimento de uma camada periférica de elevada dureza, associada a um núcleo relativamente dúctil.

O aquecimento pode ser realizado por chama ou por indução e deve levar a região aquecida a temperatura cima da zona crítica. Normalmente é subdividido em:

- “Spot Hardening” – Superfícies planas
- “Spin Hardening” – Superfícies cilíndricas
- “Endurecimento Progressivo” – Superfície cilíndrica ou plana.





Tratamentos Térmicos dos Ferros Fundidos

Martêmpera em Ferros Cinzentos e Nodulares

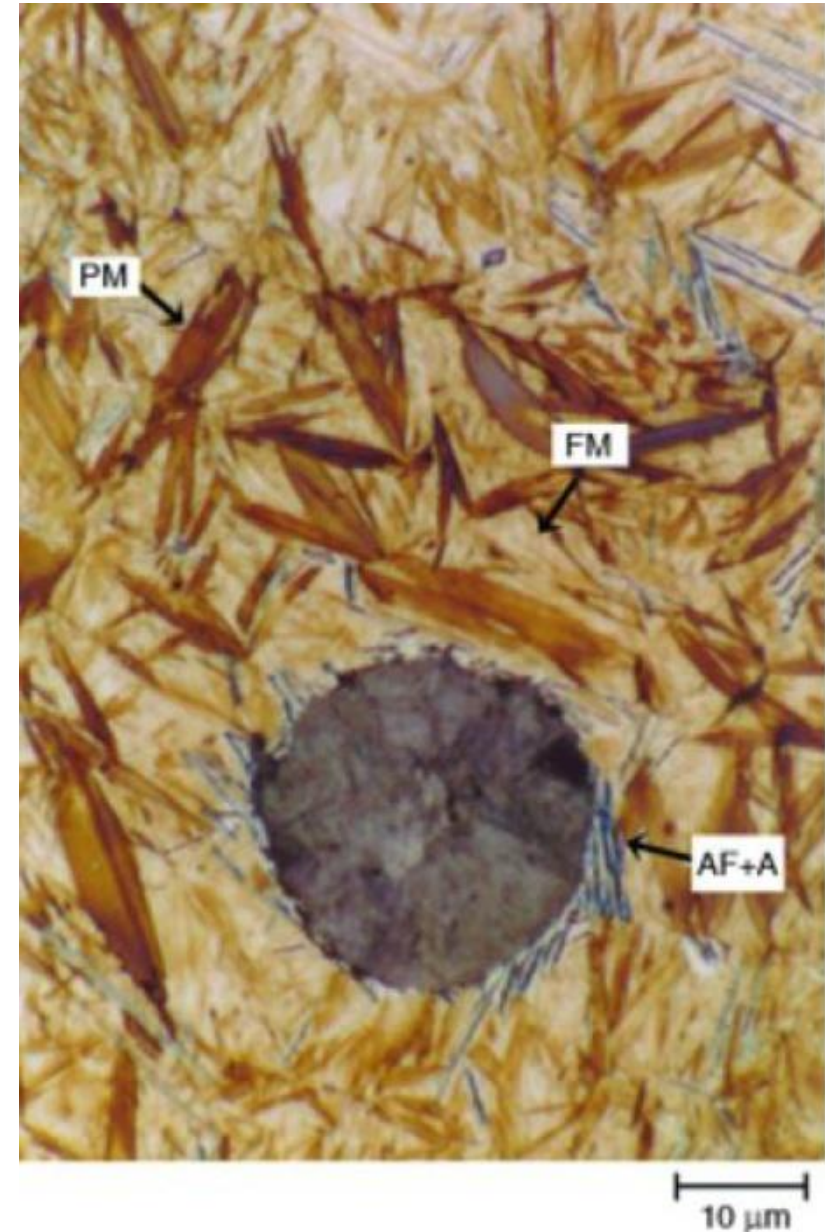
A **Martêmpera** tem como objetivo a obtenção de microestrutura martensítica associada a um mínimo de distorção.

Consiste no aquecimento para austenitização (800 – 930°C), manutenção por 20 a 60 minutos a cada 25mm de seção. O resfriamento é realizado em banho de sal na faixa de 200 a 260°C (acima do início da transformação martensítica), permanecendo no patamar até a homogeneização da temperatura e sem atingir a curva de início de formação de bainita, sendo então resfriada até a temperatura ambiente.

Placas de Martensita – PM

Martensita Fina – FM

Austenita e Ferrita Acicular – AF + A





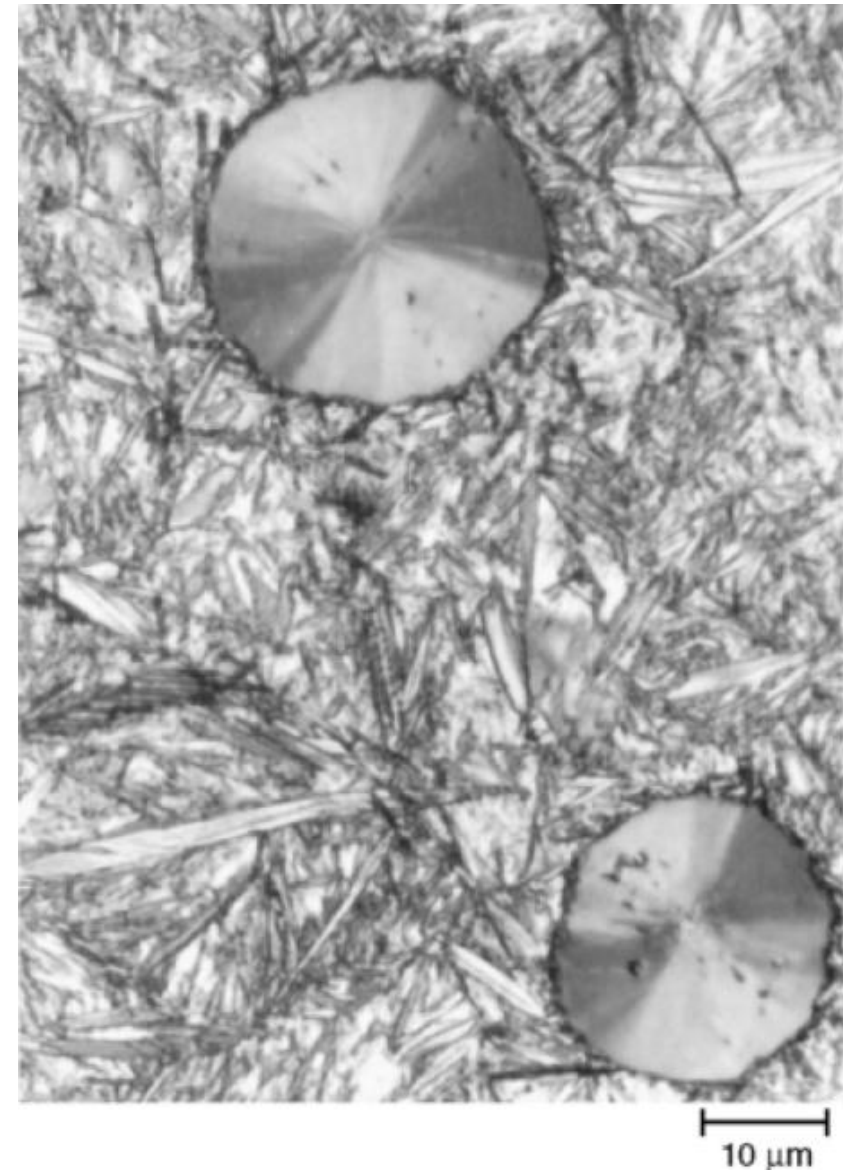
Tratamentos Térmicos dos Ferros Fundidos

Austêmpera em Ferros Cinzentos e Nodulares

A Austêmpera não é realizado nos Cinzentos, sendo usual nos Nodulares. Tem como objetivo a obtenção de elevada dureza associada a resistência mais elevada ao impacto.

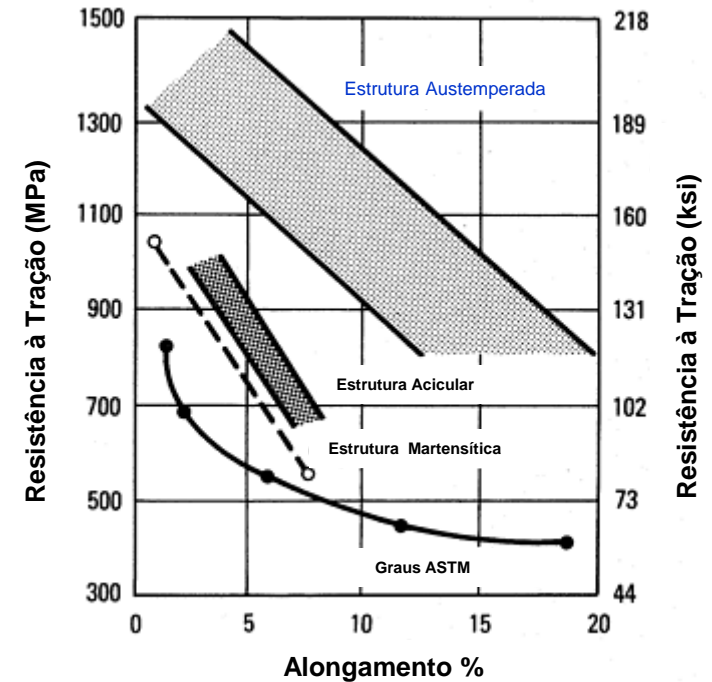
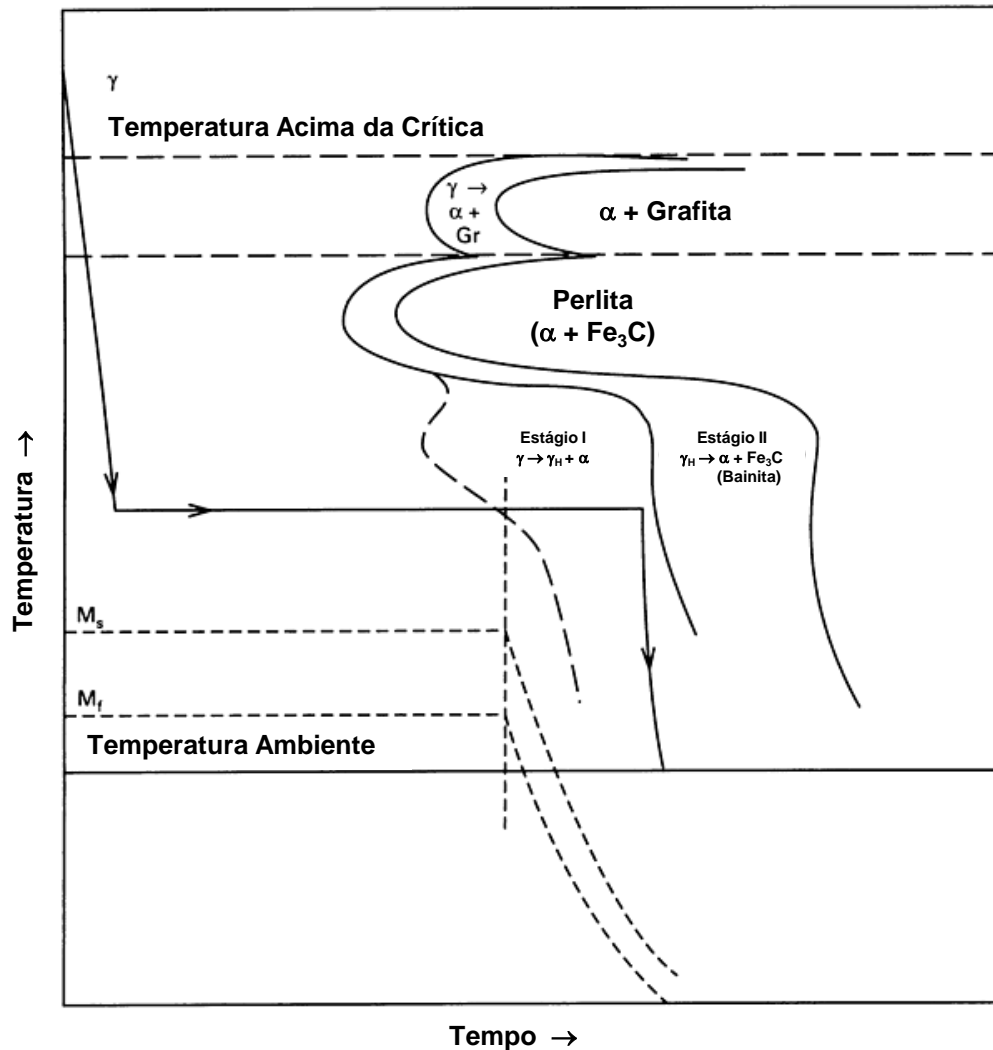
Consiste no aquecimento para austenitização ($800 - 930^{\circ}\text{C}$), manutenção por 20 a 60 minutos a cada 25mm de seção. O resfriamento é realizado em banho de sal na faixa de 230 a 450°C , permanecendo no patamar até a transformação parcial em Ferrita, resultando em estrutura composta por Austenita e Ferrita, conhecida como "Ausferrita".

Estes ferros fundidos são conhecidos como ADI, Austempered Ductile Iron ou Ferro Fundido Nodular Austemperado.





Tratamentos Térmicos dos Ferros Fundidos



A estrutura formada nos nodulares austemperados é controlada pela transformação no estágio I do dia grama TTT. A austenita transforma-se parcialmente em ferrita, que faz com que a **austenita não transformada** (γ_H) seja enriquecida em Carbono. O Carbono estabiliza esta fase e evita a transformação Martensítica ao final do resfriamento. O Silício em teor elevado ajuda a evitar a formação de Carbonetos, mesmo com teor maior que 2,0% na austenita (γ_H).