

FERROS FUNDIDOS

Engenharia e Ciência dos Materiais I

Profa.Dra. Luralice Canale

O ferro está presente na vida do ser humano há muitos anos

A utilização do **ferro para construção** começou no século XVIII, e simplesmente revolucionou os padrões arquitetônicos, justamente por ser um material com um alto nível de resistência, o que proporcionou a edificação de estruturas cada vez maiores e também, uma melhor utilização do espaço.

A Torre Eiffel, um dos pontos turísticos mais famosos atualmente, é o exemplo perfeito do poder que o ferro atingiu durante a Segunda Revolução Industrial, pois é uma estrutura que utilizou de diversos tipos de ferro para construção, além de ter sido inaugurada em 1889 (exatos cem anos após a Revolução Francesa).

É muito comum ouvirmos o termo **ferro fundido** quando estamos conversando a respeito de materiais utilizados para construções ou reformas, mas a maioria das pessoas não sabe bem ao certo do que se trata.







Coalbrookdale Iron Bridge Built in 1779



Porta em ferro fundido
com dedicatória a Virgem
Maria.

Gaudi

Final de 1800



Gate of Guell Palace by Gaudi in Barcelona



Cast iron gate of Guell Palace by Gaudi in Barcelona



Escultura de Antony Gormley na plataforma superior da Rodoviária do Plano Piloto, em Brasília (Foto: Jamila Tavares / G1)



Conjunto de estátuas: A Justiça, A Fidelidade, A Liberdade e A União, instaladas na Praça Tiradentes, no Centro do Rio. As obras são de ferro fundido de autoria do escultor francês Mahurin Moreau, feitas em Fundições Francesas do Val D'Osne. Estas esculturas instaladas nos quatro cantos da praça, compõe o conjunto do Monumento a Dom Pedro I, de autoria de Louis Rochet e seu então estagiário Auguste Rodin. As peças são tombadas pelo Governo Federal, Municipal e Estadual. - Image ID: P3Y9NN

Figura 1: Tubos de ferro fundido



Ligas ferrosas contendo de 2,1% a 4 %
C e 1% a 3% de Si

Composição torna-o excelente para
fundição e sua fabricação é várias
vezes superior a qualquer outro metal
fundido, exceto os lingotes de aço que
serão posteriormente trabalhados.



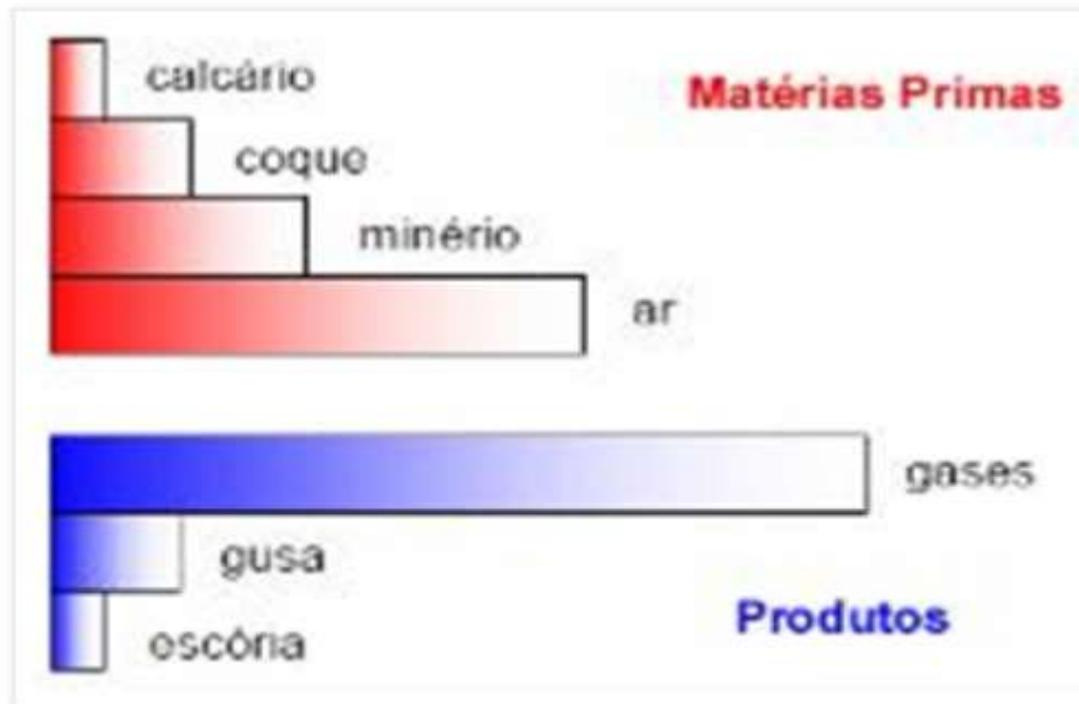
Processamento

O ferro fundido é obtido a partir do ferro-gusa. O ferro-gusa é uma liga de ferro e carbono, contendo de 3,5 a 4,5% de carbono e outros elementos (silício, manganês, fósforo, enxofre). A produção do ferro-gusa é a partir do minério de ferro, esse minério de ferro é tratado de forma correta para a entrada no alto-forno (tamanho, forma de compactação, concentração do minério de ferro e etc).

Após a entrada no alto-forno, o minério de ferro é elevado a grandes temperaturas e elevada quantidade de ar dando início a queima, e conseqüentemente a inicialização das reações químicas que acarretarão na redução do minério e sua transformação em ferro gusa.

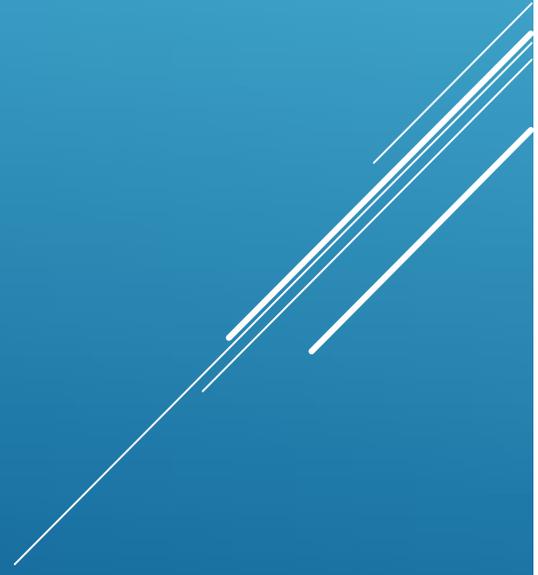
Os combustíveis necessários para alimentação do alto-forno são muito importantes na fabricação do ferro-gusa, pois precisam ter um alto poder calorífico e não deve contaminar o ferro-gusa (normalmente utiliza-se o carvão vegetal e o carvão mineral).

Figura 7: Matérias primas e produtos do processo de produção do ferro-gusa



A redução dos óxidos de ferro acontece à medida que o minério, o agente redutor (carvão vegetal) e os fundentes (calcário) descem em contracorrente, em relação aos gases. Esses são o resultado da queima do carbono, com o oxigênio do ar quente (em torno de 1.000°C) injetado pelas ventaneiras (região responsável pela circulação de ar nos altos-fornos, e que escapam da zona de combustão, principalmente para cima, e queimam os pedaços de carvão que estão na parte superior da zona de combustão, gerando assim, uma determinada concentração de carbono no ferro.

Ver 2 filmes de funcionamento do alto forno



TRANSFORMAÇÃO AÇO-GUSA

Refinamento: Para transformar a gusa de primeira fusão em aço é preciso tirar uma parte de carbono, do silício, do manganês e a totalidade de impurezas e fósforo

O resultado é obtido pela queima dos corpos em excesso

Existem quatro processos para refinamento da gusa

- ▶ **Forno Open Hearth**
- ▶ **Bessemer**
- ▶ **Forno Elétrico**
- ▶ **Aço ao Oxigênio**

Utilizados em geral quando se deseja:

- ▶ **Elevada resistência ao desgaste e à abrasão**
- ▶ **Amortecimento de vibrações**
- ▶ **Componentes de grandes dimensões**
- ▶ **Peças de geometria complicada**
- ▶ **Peças onde a deformação plástica a frio é inadmissível**



Vantagens

- ▶ Baixo ponto de fusão
- ▶ Elevada dureza e resistência ao desgaste
- ▶ Boa resistência à corrosão
- ▶ Baixo custo

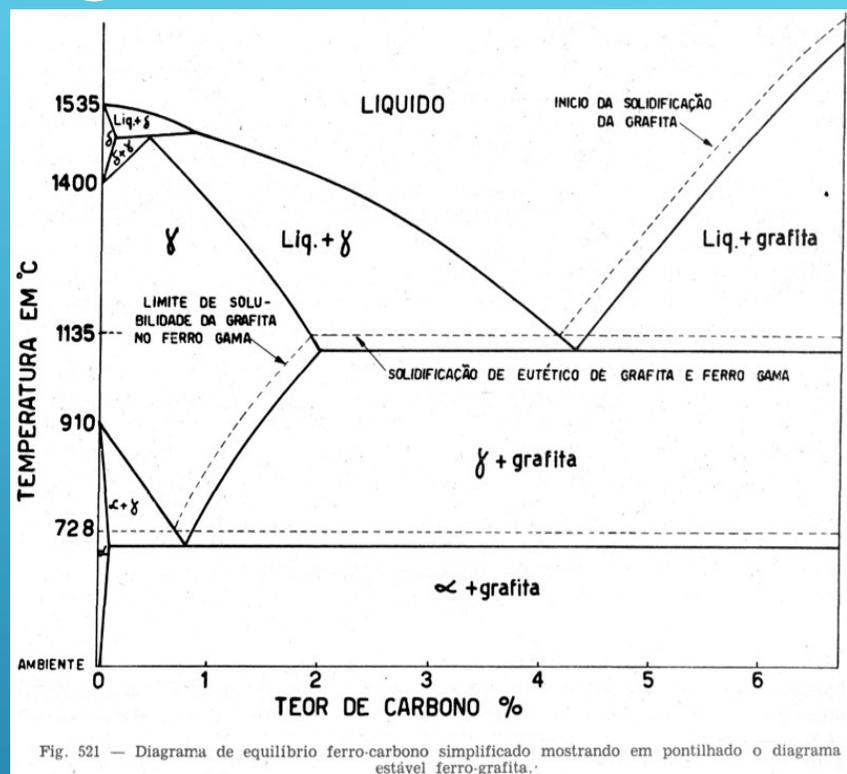
Desvantagens

- ▶ Grande fragilidade e baixa ductilidade
 - ▶ Deformação plástica impossível à temperatura ambiente
 - ▶ Soldagem muito limitada
- 

Ferros Fundidos - Diagrama Fe-C

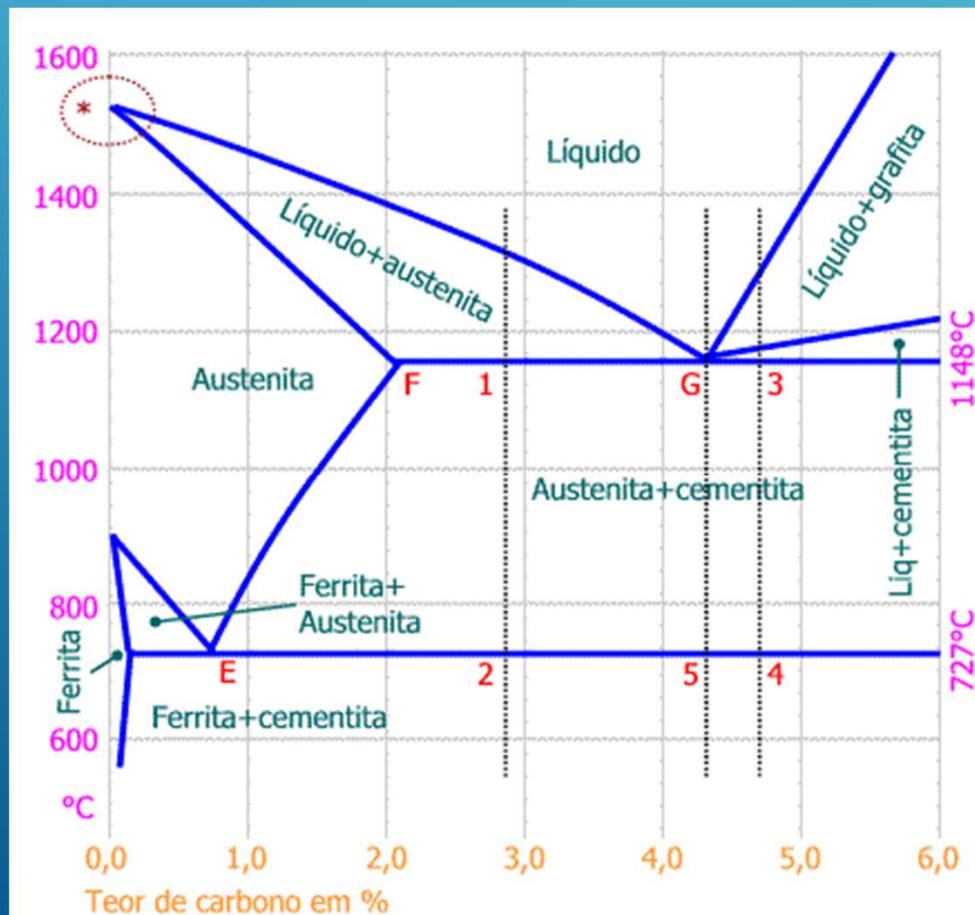
O diagrama Fe-C apresenta dois eutéticos provenientes de dois equilíbrios: estável e metaestável. O eutético estável é formado pela austenita e grafita e o eutético metaestável por austenita e carbonetos (cementita)

No caso dos aços as estruturas provenientes do resfriamento lento podem ser relacionadas com o diagrama metaestável



Ferros Fundidos

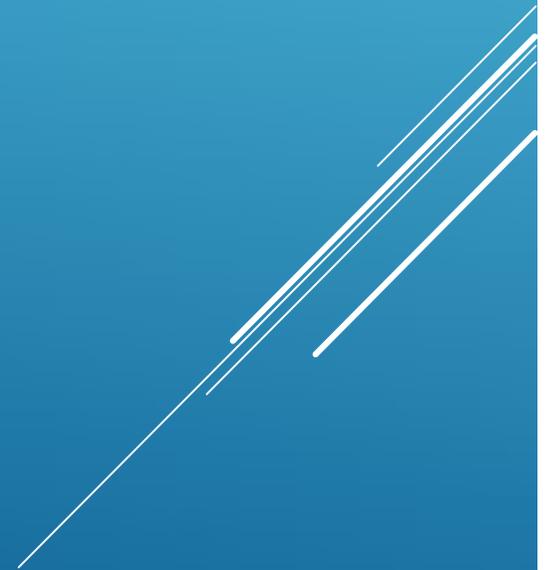
É o termo genérico utilizado para as ligas Ferro-Carbono nas quais o conteúdo de Carbono excede o seu limite de solubilidade na Austenita na temperatura do eutético. A maioria dos ferros-fundidos contém no mínimo 2% de carbono, mais silício (entre 1 e 3%) e enxofre, podendo ou não haver outros elementos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



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).

Aplicações

Existem inúmeras aplicações para o ferro fundido, sendo que cada tipo de ferro fundido tem uma determinada aplicação de acordo com suas características mecânicas.



Aplicações

Existem inúmeras aplicações para o ferro fundido, sendo que cada tipo de ferro fundido tem uma determinada aplicação de acordo com suas características mecânicas.

Tipos de Ferro Fundido

Os tipos de apresentação do carbono na estrutura podem ser a **cementita** e a **grafita**. A cementita tem como característica maior dureza do que a grafita, em compensação a grafita é mais dúctil que a cementita.

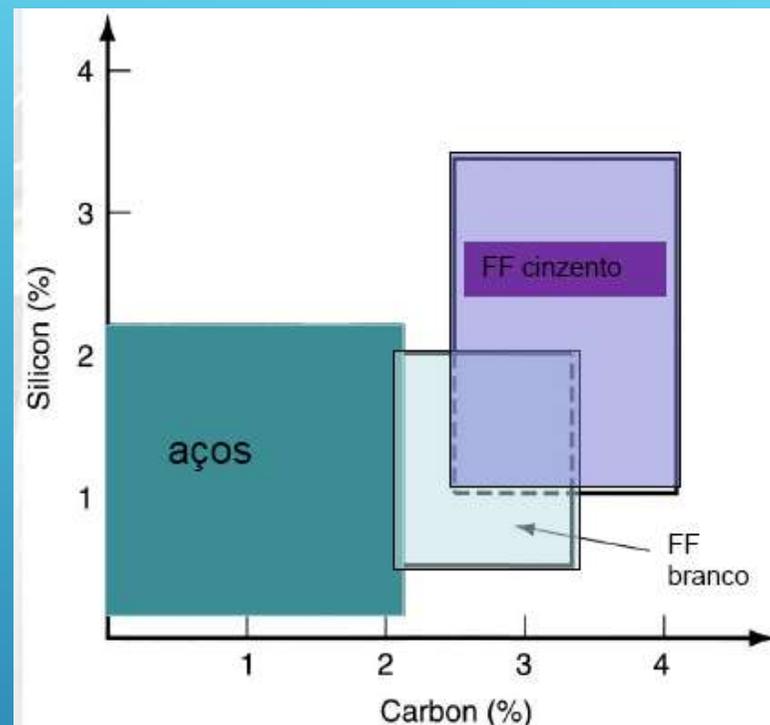


Ferros Fundidos - Classificação

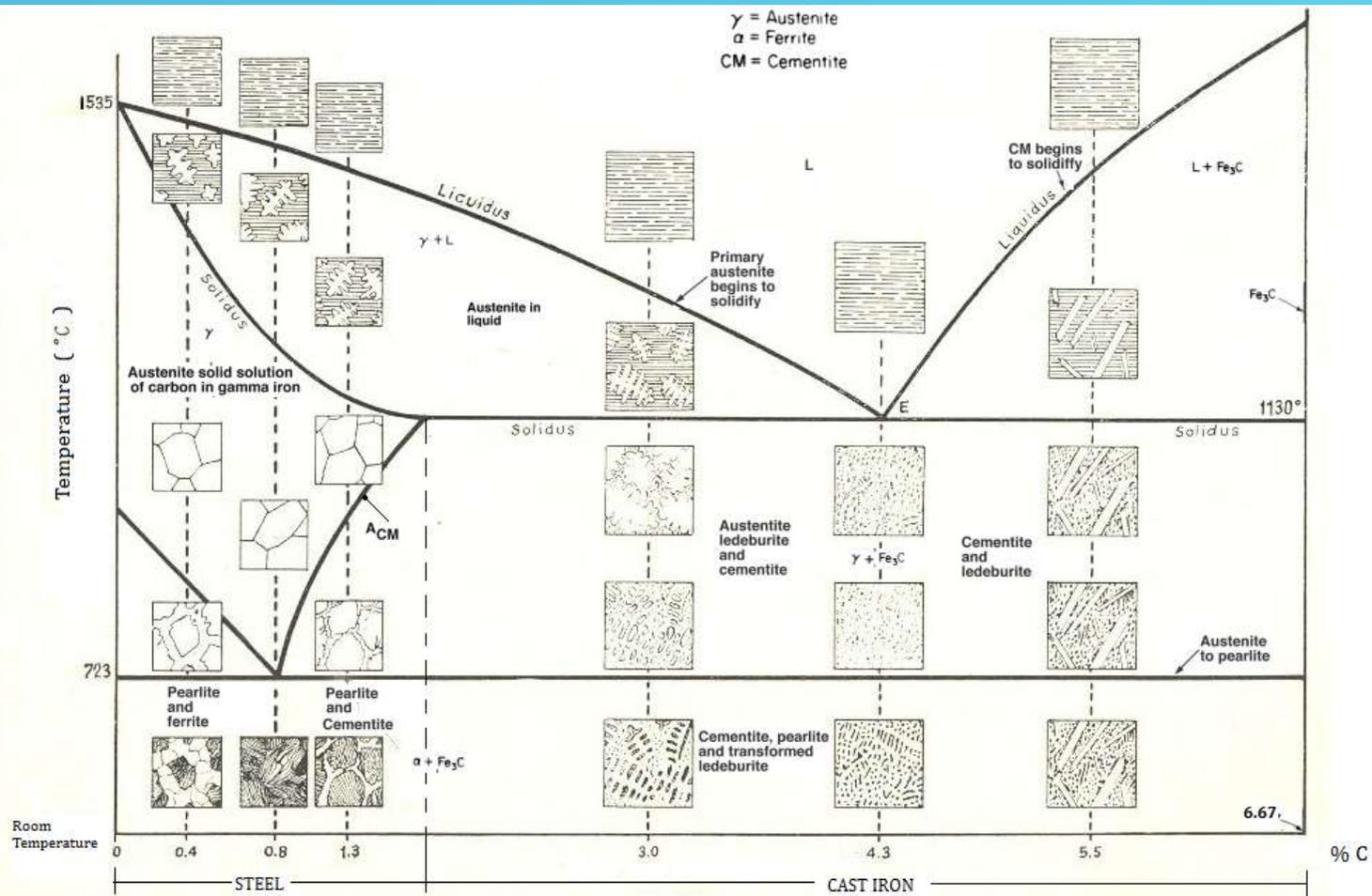
	C	Si	Mn	S	P
Cinzento	2,5-4,0	1,0-3,0	0,25-1,0	0,02-0,25	0,05-1,0
Branco	1,8-3,6	0,5-1,9	0,25-0,80	0,06-0,20	0,06-0,18
Maleável	2,0-2,6	1,1-1,6	0,20-1,0	0,04-0,18	0,18 máx.
Dúctil	3,0-4,0	1,8-2,8	0,10-1,0	0,03 máx.	0,10 máx.

A tabela acima ilustra os intervalos de composição química dos ferros fundidos típicos, não ligados.

O gráfico ao lado ilustra a relação típica existente entre os teores de Carbono e Silício nas famílias de ferros fundidos.



FERRO FUNDIDO BRANCO



Ferro Fundido Branco

O ferro fundido branco tem como característica metalográfica a formação de cementita (Devido a organização do carbono em sua estrutura e também pelos processos de resfriamento o deixa com um aspecto esbranquiçado). Sua principal característica mecânica é o alto grau de dureza. Devido ao seu alto grau de dureza o ferro fundido branco é também reconhecido por sua fragilidade.

Figura 3: Microestrutura do ferro fundido branco



FERRO FUNDIDO BRANCO

MICROESTRUTURA

- $2,0 \leq \%C \leq 3,5$; $0,5 \leq \%Si \leq 2,0$; $0,5\%Mn$ (anti-grafitizante)
- Elevada velocidade de arrefecimento => Carb. solidifica sob a forma de cementite
- A elevada dureza e fragilidade da cementite caracterizam este FF
- Em peças de maior tamanho pode obter-se FF branco à superfície e FF cinzento no núcleo

APLICAÇÕES

- Principal aplicação é a produção de ferro fundido maleável
- Peças sujeitas a elevada compressão e desgaste
- Elevada taxa de arrefecimento limita o tamanho das peças (esp < 100mm)

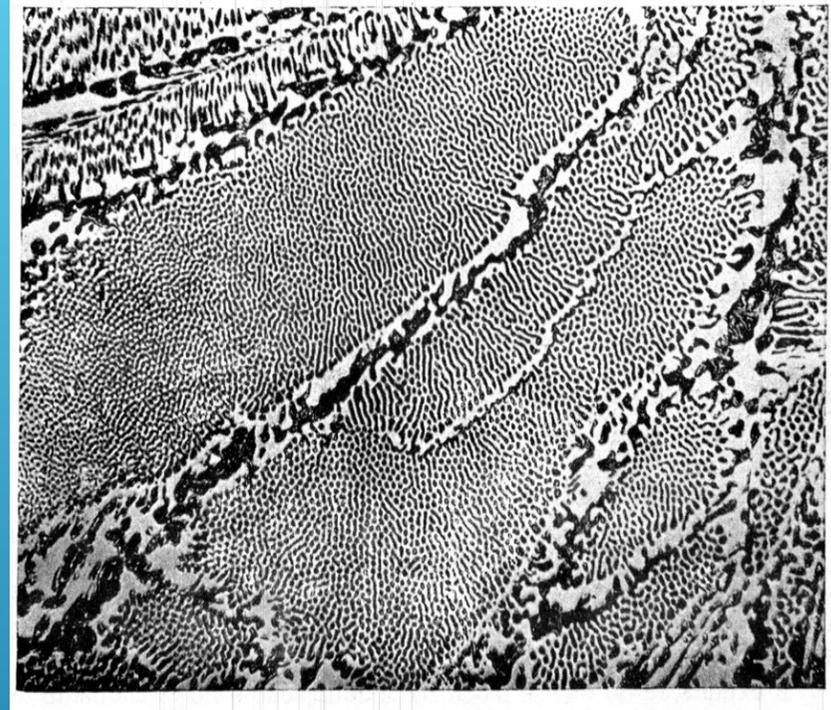
PROPRIEDADES

- Elevada resistência à compressão e à abrasão (cementite)
- É muito duro e frágil
- Não pode ser maquinado
- Soldadura impossível
- Baixo custo



FERRO FUNDIDO BRANCO EUTÉTICO

- Abaixo de 727°C , a austenita transforma-se em perlita. Com isso a ledeburita será constituída de glóbulos de perlita sobre um fundo de cementita



FERRO FUNDIDO BRANCO HIPOEUTÉTICO

- Durante seu resfriamento a liga começa a se solidificar formando cristais de austenita. Continuando o resfriamento e atingindo 1130°C , tem-se austenita com 2,0% de C e um líquido com composição eutética
- **Abaixo de 1130°C , esse líquido transforma-se no eutético ledeburita**

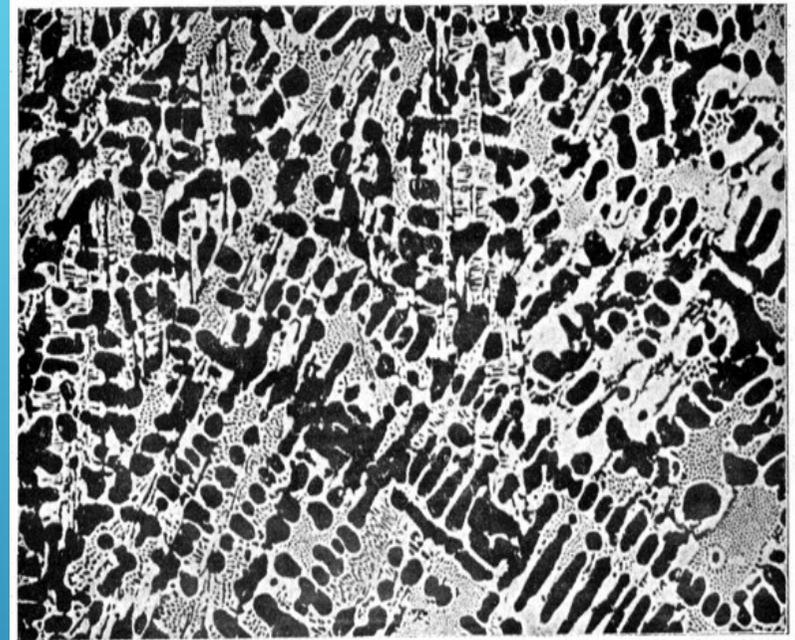


Fig. 523 — Ferro fundido branco hipoeutético. Dendritas de perlita, áreas pontilhadas de ledeburita, áreas brancas de cementita. Ataque: nítrico. 100 x.

Abaixo de 727°C a austenita isolada se transforma em perlita e à temperatura ambiente a microestrutura será : cristais de perlita envolvidos por ledeburita

FERRO FUNDIDO BRANCO HIPEREUTÉTICO

- Durante seu resfriamento a liga começa a se solidificar formando cristais de cementita. Continuando o resfriamento até 1130°C tem-se cristais alongados de cementita e líquido de composição eutética
- Abaixo de 1130°C esse líquido transforma-se em ledeburita, mas não ocorre nenhuma transformação com a cementita
- Assim a microestrutura será formada por cristais de cementita sobre um fundo de ledeburita

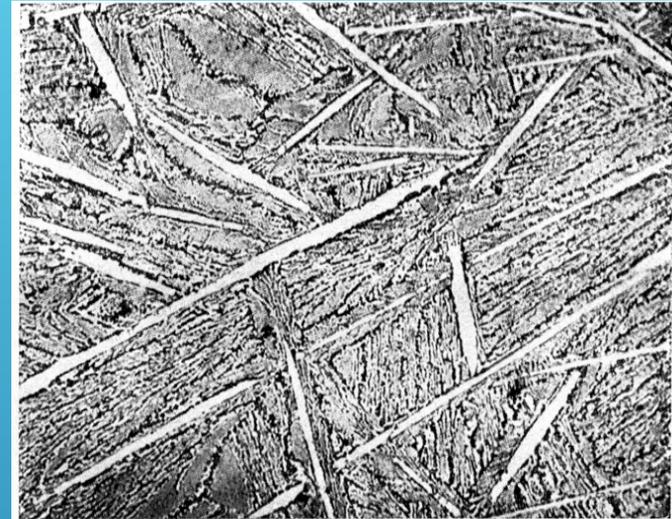


Fig. 528 — Ferro fundido branco hipereutético. Longos cristais de cementita sobre um fundo de ledeburita. Ataque: pícrico. 150 x.

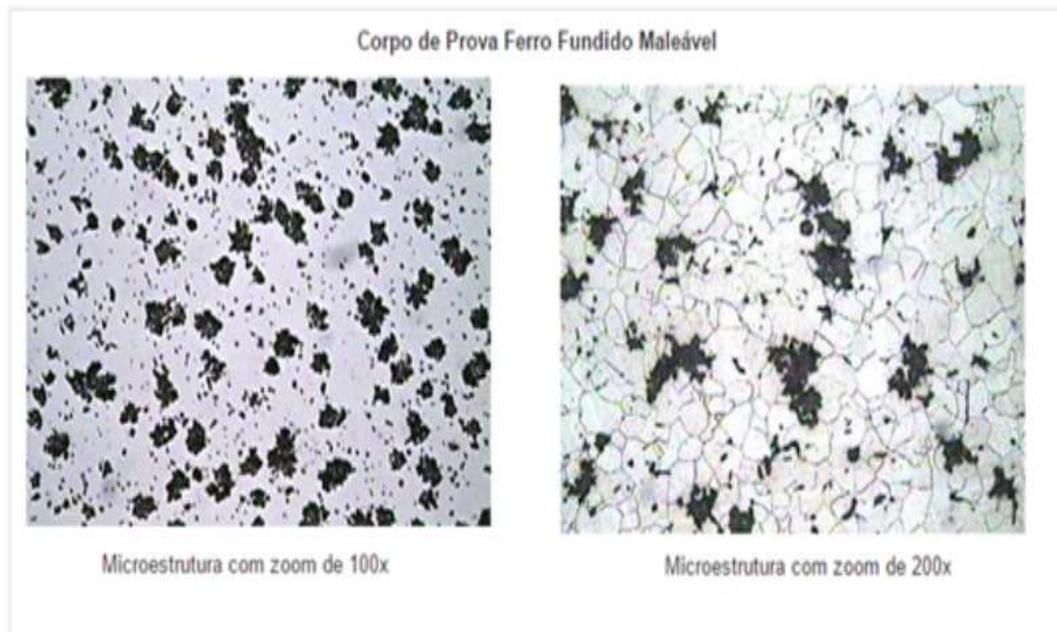
Ferro fundido branco - Pastilhas e discos de alto grau de dureza



Ferro Fundido Maleável

O ferro fundido maleável é produzido a partir do ferro fundido branco submetido a várias horas de tratamento térmico. Uma característica diferenciada do ferro fundido maleável é sua alta fluidez em estado líquido (facilitando assim o seu manuseio) e também sua alta resistência mecânica. Após processamento pode gerar a formação de dois tipos de ferro fundido maleável: de núcleo preto e de núcleo branco.

Figura 4: Microestrutura do ferro fundido maleável



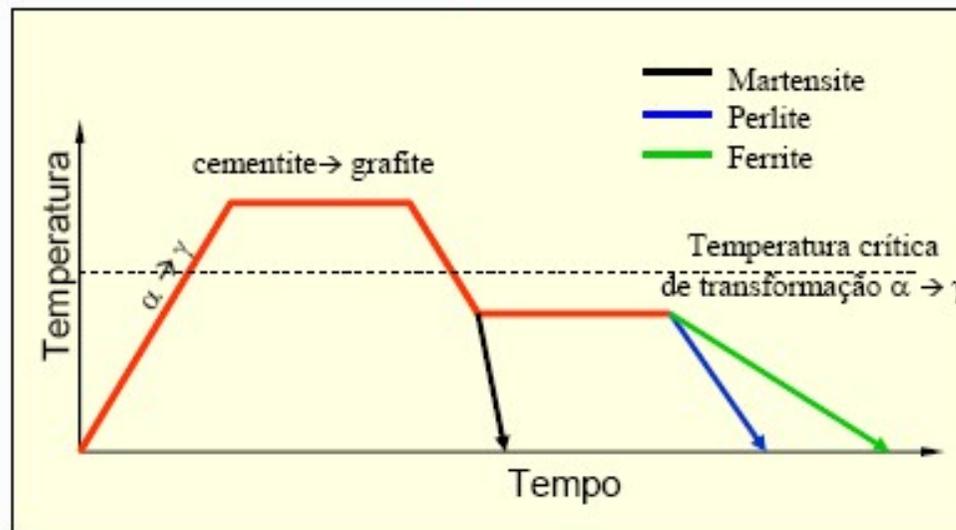
FERROS FUNDIDOS MALEÁVEIS

MICROESTRUTURA

- % elementos constituintes idênticas ao ferro fundido branco
- Obtido a partir do FF branco por tratamento térmico de maleabilização
- A microestrutura obtida resulta da decomposição da cementite em rosetas de grafite, numa matriz de ferrite, perlite ou martensite

PROPRIEDADES

- Variando a taxa de arrefecimento, pode obter-se um largo espectro de propriedades
- Grande resistência à corrosão
- Boa maquinabilidade e vazabilidade
- Propriedades semelhantes ao FF dúctil
- Elevada resistência, tenacidade e ductilidade



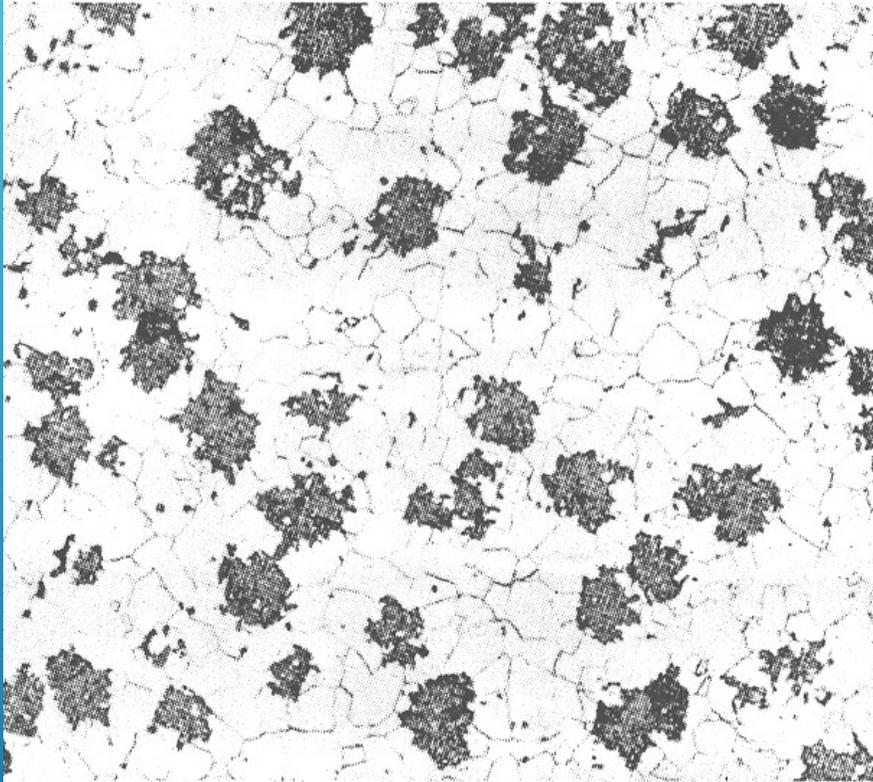
Ferros Fundidos Maleáveis

Os ferros fundidos maleáveis são obtidos a partir do ferro fundido branco, quando submetidos a um tratamento térmico de grafitização (aprox. 940°C), quando os carbonetos de ferro transformam-se em grafita (nódulos de carbono revenido).

O modo de resfriamento após o tempo de encharque para grafitização é que determinará a matriz da microestrutura formada por nódulos de carbono revenido, como segue:

- **Ferro Maleável Ferrítico:** resfriamento rápido até 740°C a 760°C, seguido de resfriamento lento.
- **Ferro Maleável Perlítico:** resfriamento lento até 870°C seguido de resfriamento ao ar
- **Ferro Maleável Martensítico Revenido:** resfriamento em forno até a temperatura de tempera de 845 a 870°C, mantendo-se 15 a 30 minutos para homogeneização, resfriando-se em seguida em banho de óleo agitado para obtenção de uma matriz martensítica.

Ferros Fundidos Maleáveis



Na figura vemos nódulos de grafita numa matriz ferrítica. Neste caso ocorreu completa grafitação.

Ferro Fundido Maleável

Núcleo preto: Utilizado em suportes de molas, caixas de direção automobilísticas, conexões hidráulicas e etc.

Núcleo branco: Utilizado na fabricação de barras de torção, tubos de escapamento como na imagem abaixo



FERRO FUNDIDO CINZENTO

MICROESTRUTURA

- $2 \leq \%C \leq 4,0$; $1,0 \leq \%Si \leq 3,0$
- Baixa velocidade de arrefecimento
=> Carbono solidifica em forma de grafite (flocos) – forma estável
- A matriz é ferrítica (veloc. baixa) ou perlítica (veloc. moderada)
- Flocos de grafite reduzem a resistência mecânica e a ductilidade, pois do ponto de vista mecânico actuam como se fossem fissuras.

APLICAÇÕES

- É o ferro fundido mais usado (75%)
- Fundição em geral
- Blocos de motores
- Engrenagens de grandes dimensões
- Máquinas agrícolas
- Tubagens

PROPRIEDADES

- Elevada fluidez=>peças complicadas
- Boa maquinabilidade (flocos de grafite)
- Grande resistência ao desgaste (grafite)
- Bom à compressão, mau à tracção (frágil)
- Não deve ser sujeito a choques, concentração de tensões
- Razoável resistência à corrosão
- Soldadura difícil
- Baixo custo (mais barato)

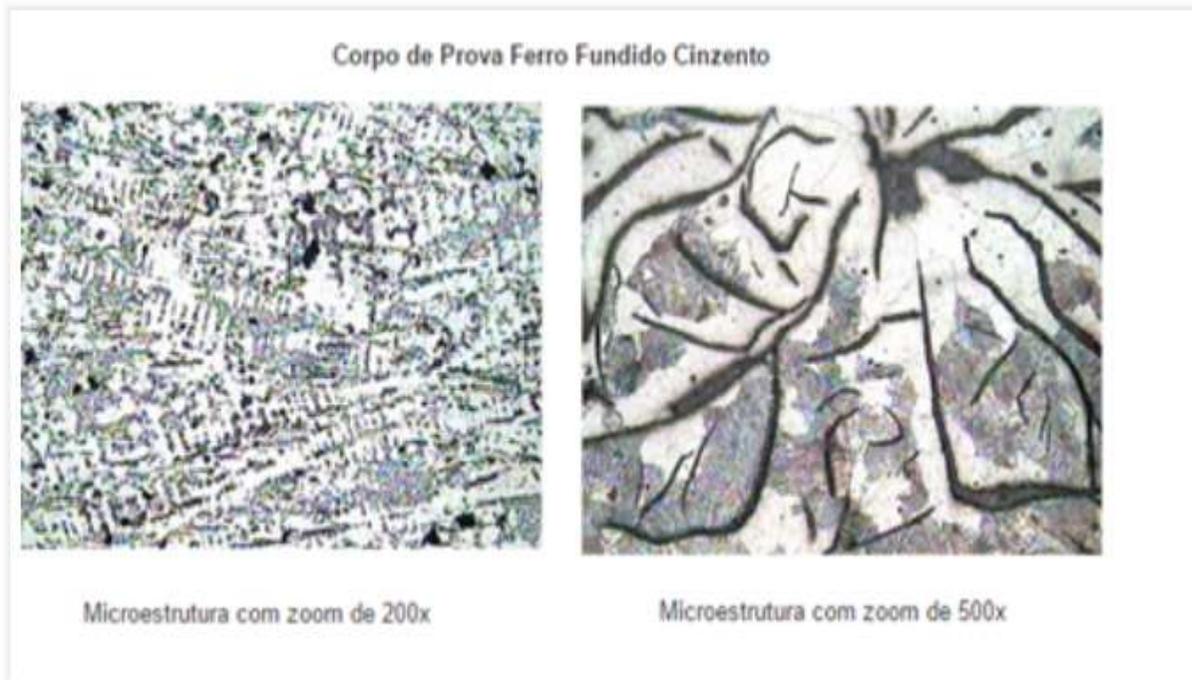


Audi V8 direct-injection diesel engine.

Ferro Fundido Cinzento:

O ferro fundido cinzento é classificado metalograficamente pela grafita (flocos e lamínas), que dão a cor acinzentada para a fratura do material. É o tipo de ferro mais usado na indústria devido a seu alto grau de dureza, resistência ao desgaste, de fácil usinagem, baixo custo de produção e grande capacidade de amortecer vibrações.

Figura 2: Microestrutura do ferro fundido cinzento

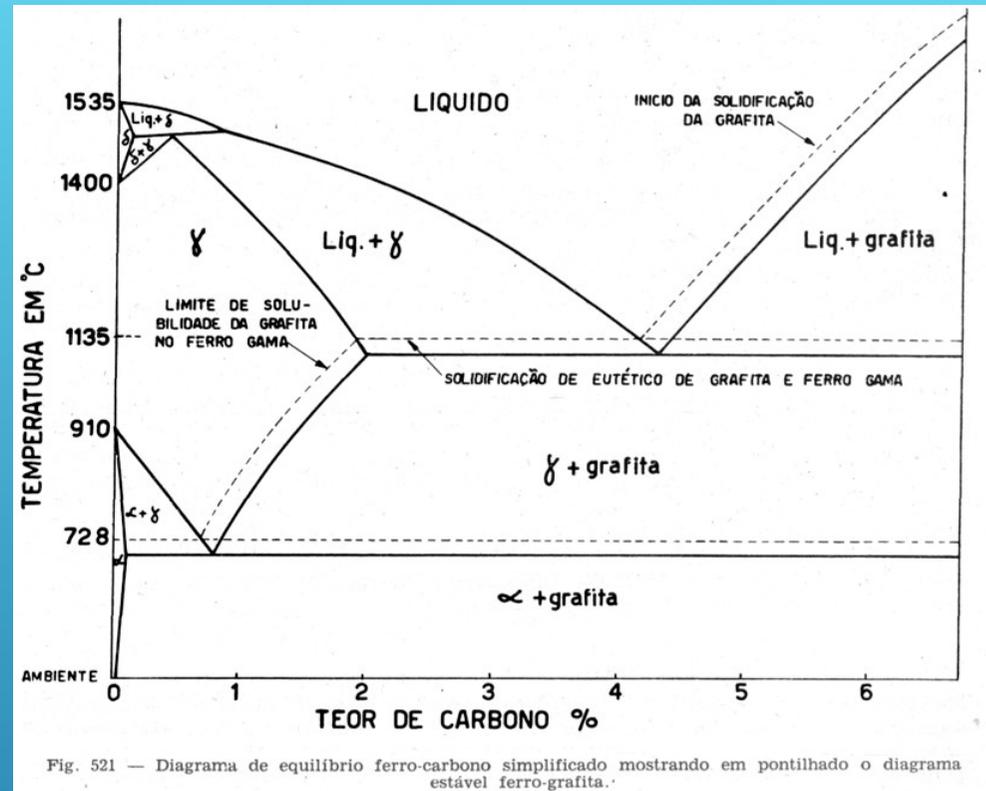


FERRO FUNDIDO CINZENTO

- Nos ferros fundidos cinzentos, o teor de silício está acima de 1%, o que leva a algumas alterações no diagrama Fe-C

- Uma das alterações é o deslocamento do eutético para a esquerda (uma diminuição da porcentagem de carbono do eutético) na proporção de 0,3% de C para cada 1% de silício

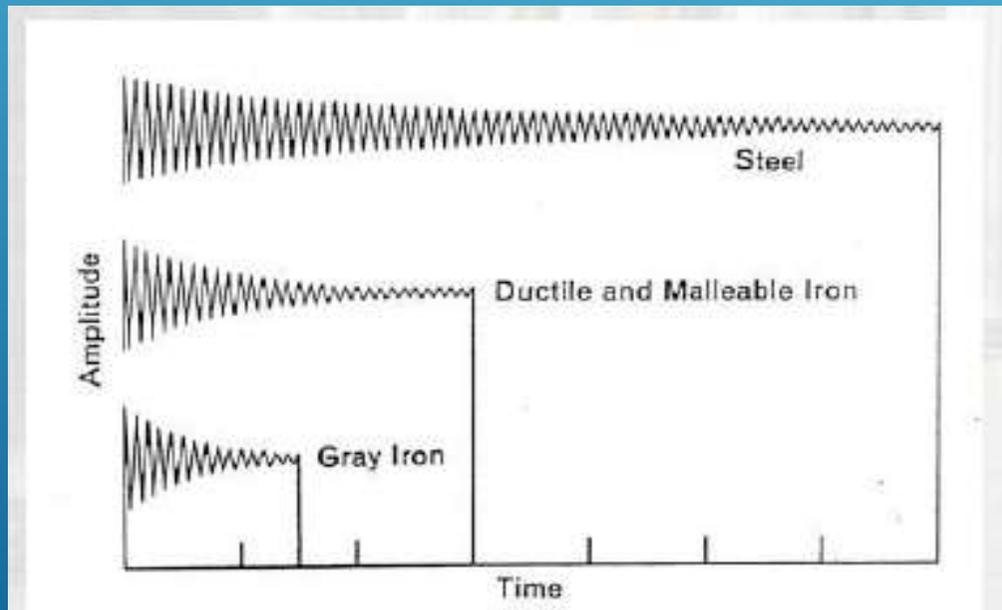
- O estudo da liga Fe-C-Si deveria ser apoiado em um diagrama ternário, mas como é muito complexo, utiliza-se o diagrama binário com carbono equivalente



$$CE = (\%C) + 1/3(\%Si + \%P)$$

FF cinzento

- Grafita em flocos
- Frágil sob tensão trativa
- Resistência sob compressão
- Resistência ao desgaste
- Excelente absorção de vibrações



Ferro cinzento:

Peças automobilísticas, equipamentos agrícolas e máquinas de grande impacto.



FERRO FUNDIDO CINZENTO HIPOEUTÉTICO

- A solidificação de um ferro fundido cinzento hipoeutético inicia-se com a nucleação de dendritas de austenita
- Conforme a temperatura decresce , o crescimento das dendritas de austenita continua, havendo um enriquecimento progressivo de carbono no líquido remanescente.
- Quando o sistema atinge a temperatura do eutético estável seu carbono equivalente é igual ao do eutético e ocorre uma separação entre austenita e grafita. Cada agregado de austenita e grafita é chamado célula ou grão eutético

FERRO FUNDIDO CINZENTO HIPOEUTÉTICO

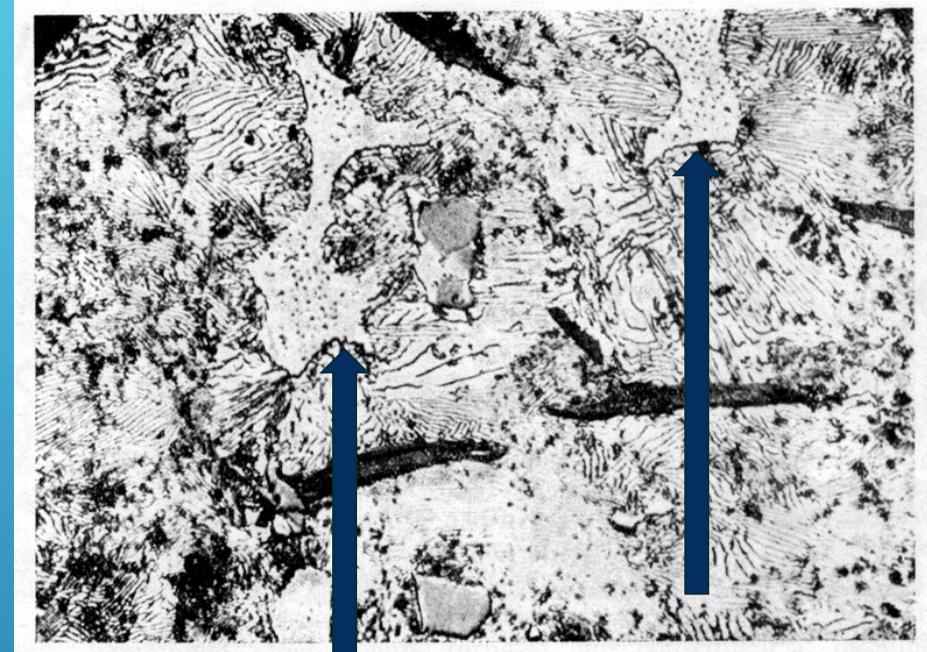


- Abaixo da temperatura de solidificação tem-se dendritas de austenita formando uma matriz em que estão distribuídas lamelas de grafita

- Ao ultrapassar a linha do eutetóide a austenita remanescente transforma-se em perlita e a estrutura é constituída de perlita com lamelas de grafita

FERRO FUNDIDO EUTÉTICO - STEADITA

- Pode ocorrer a formação de um eutético rico em fósforo chamado steadita, de ponto de fusão mais baixo que o de austenita e o de grafita, quando o ferro fundido possui teores apreciáveis desse elemento.



- Durante a solidificação, o fósforo e outras impurezas são segregadas para o líquido que se solidifica no contorno das células eutéticas

FERRO FUNDIDO HIPEREUTÉTICO

- Nos ferros fundidos cinzentos hipereutéticos a primeira fase a precipitar é a grafita hipereutética na forma de lamelas longas, retas e ramificadas.
- O processo de solidificação que se segue é semelhante ao dos hipoeutéticos com formação de células eutéticas.
- A grafita hipereutética pode ser facilmente distinguida com a grafita da transformação eutética por possuir lamelas mais grossas e retilíneas

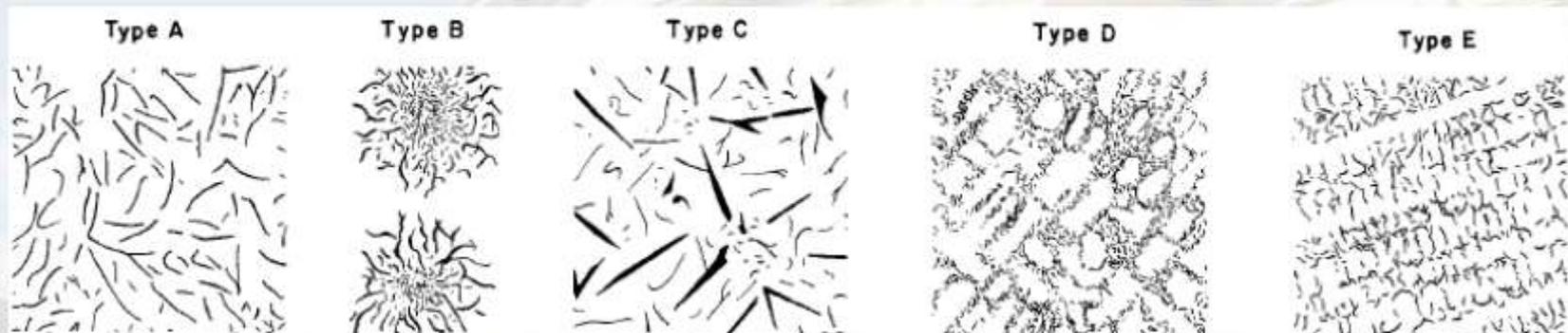


ASPECTOS DA GRAFITA

As lamelas de grafita podem ser grossas ou finas , diferenciando-se também quanto à forma e tamanho. Essas alterações originam-se do processo de solidificação do eutético e das variáveis do processo

- Composição química: os elementos de liga podem influenciar tanto a velocidade de nucleação como a de crescimento. De modo geral, quando a velocidade de crescimento é reduzida, ocorre uma redução da ramificação do esqueleto da grafita, conduzindo a um engrossamento da grafita da célula eutética**
- Velocidade de resfriamento: velocidades altas produzem veios finos com distribuição dendrítica; velocidades médias produzem distribuição e tamanho normais e velocidades lentas, veios grossos de grafita**

Tipos de grafita nos ferros fundidos cinzentos



Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos:

ASTM A 48 class	Resistência à tração		Resistência à torção		Resistência à compressão		Limite de fadiga em dobramento		dureza (HB)
	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
20	152	22	179	26	572	83	69	10	156
25	179	26	220	32	669	97	79	11.5	174
30	214	31	276	40	752	109	97	14	210
35	252	36.5	334	48.5	855	124	110	16	212
40	293	42.5	393	57	965	140	128	18.5	235
50	362	52.5	503	73	1130	164	148	21.5	262
60	431	62.5	610	88.5	1293	187.5	169	24.5	302

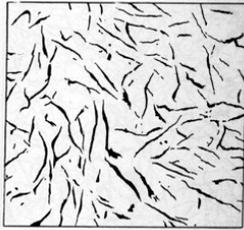


Fig. 523 — Veios de grafita do tipo A. Veios curvos as veios bitramados, com orientação a este. 100 x.

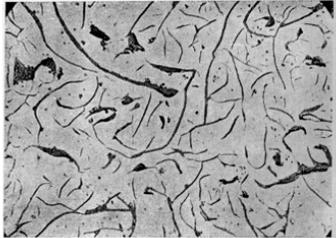


Fig. 524 — Ferro fundido cinzento, sem ataque, com veios do tipo A. 100 x.

• Aspecto da grafita Tipo A

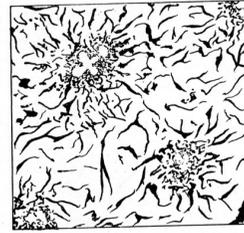


Fig. 522 — Veios de grafita do tipo B. Veios com disposição radial em torno de núcleos de aspecto eufítico. 100 x.

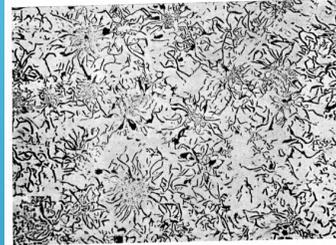


Fig. 526 — Ferro fundido cinzento, sem ataque, com veios do tipo B. 150 x.

• Aspecto da grafita Tipo B



Fig. 527 — Veios de grafita do tipo C. Veios grandes e quasi retos e, entre eles, veios pequenos curvos. 100 x.

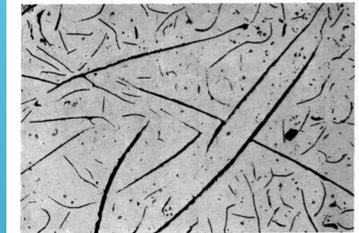


Fig. 528 — Ferro fundido cinzento, sem ataque, com veios tipo C. 150 x.

• Aspecto da grafita Tipo C

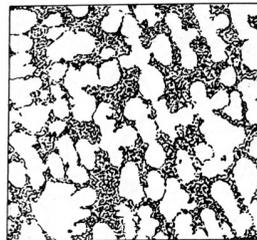


Fig. 529 — Veios de grafita do tipo D. Veios pequenos e curtos agrupados preenchendo o espaço interdendrítico como eufítico. 100 x.

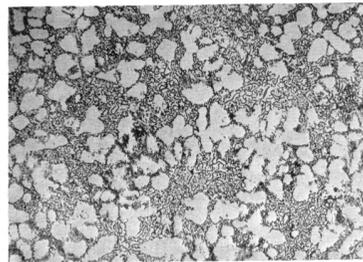


Fig. 540 — Ferro fundido cinzento, sem ataque, com grafita do tipo D. 150 x.

• Aspecto da grafita Tipo D

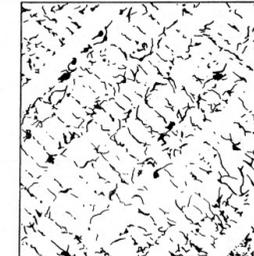


Fig. 541 — Veios de grafita do tipo E. Veios orientados segundo o espaço interdendrítico. 100 x.

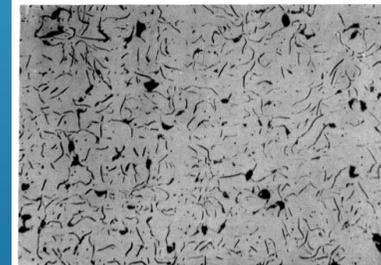


Fig. 542 — Ferro fundido cinzento com grafita do tipo E. 100 x.

• Aspecto da grafita Tipo E

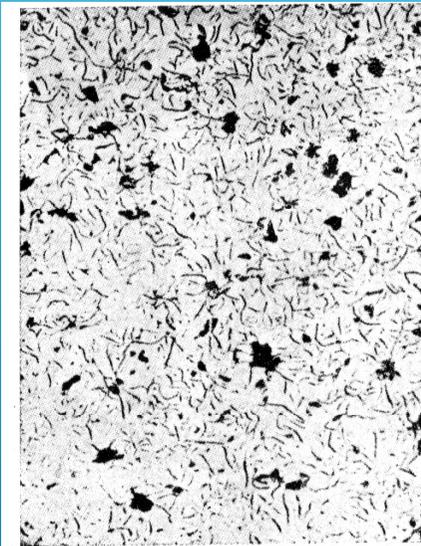


Fig. 548 — Ferro fundido cinzento sem ataque.
Exemplo de veios de tamanho n.º 6. 100 x.

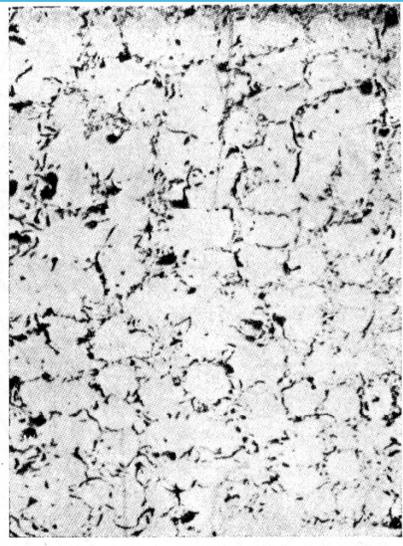
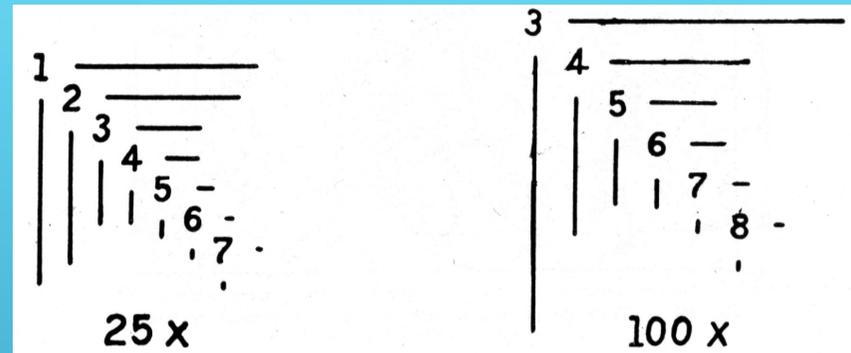


Fig. 549 — Ferro fundido cinzento sem ataque.
Exemplo de veios de tamanho n.º 8. 100 x.



TAMANHOS DA GRAFITA

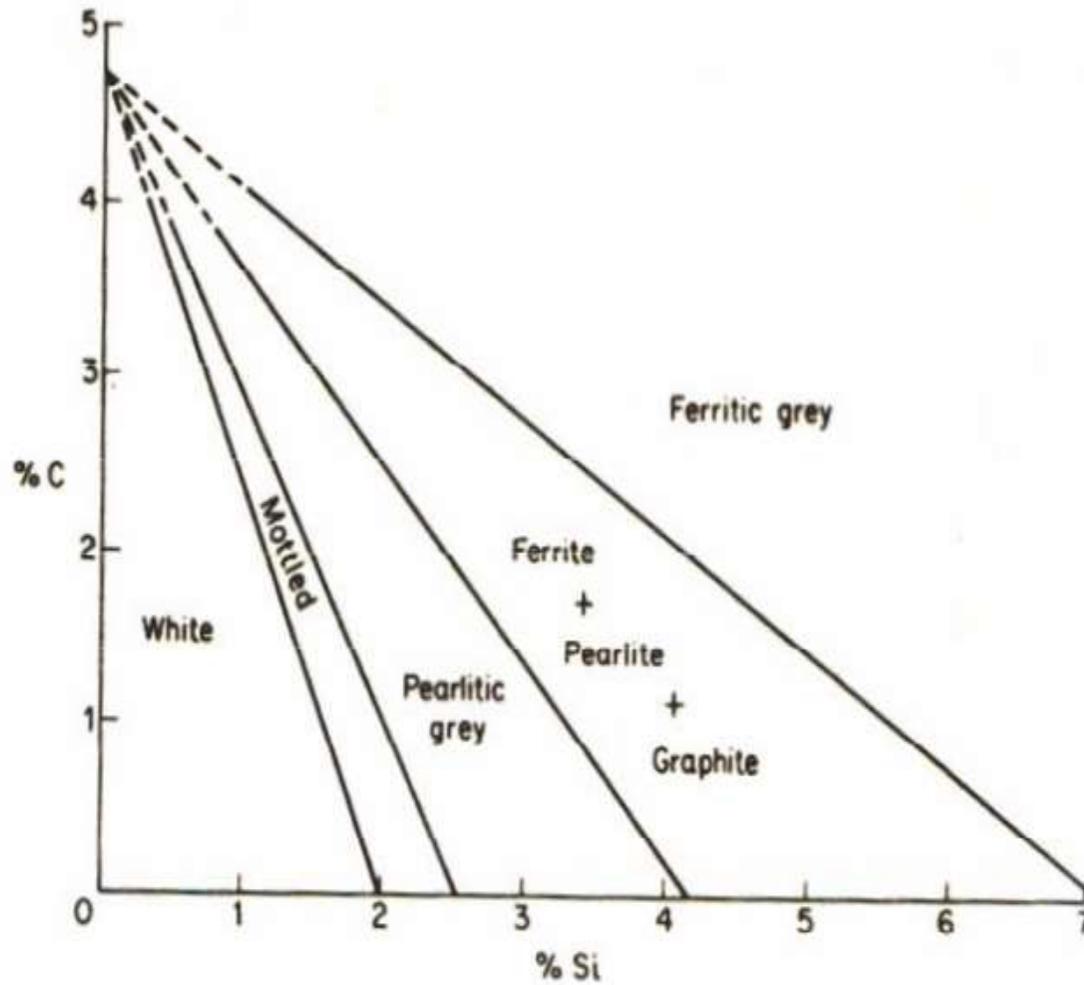


Figure 4. Effect of silicon and carbon content on the structure of cast irons.

FERROS FUNDIDOS NODULARES

MICROESTRUTURA

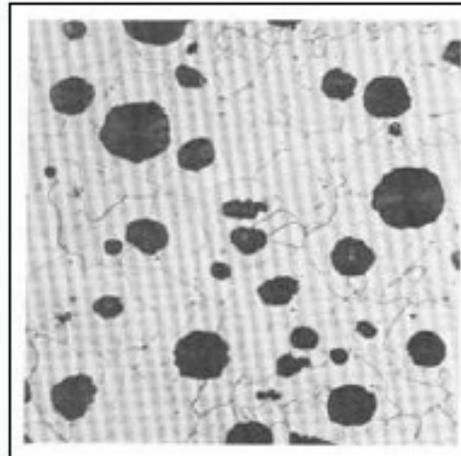
- $3,5 \leq \%C \leq 4,0$; $1,8 \leq \%Si \leq 3,0$
- Pequenas adições de Mg
- Em vez de flocos formam-se nódulos
- A matriz é ferrítica (veloc. baixa) ou perlítica (veloc. moderada)
- Grafite em nódulos origina maior resistência, ductilidade e tenacidade

PROPRIEDADES

- Melhor resistência, tenacidade e ductilidade
- Excelente maquinabilidade
- Possibilidade de deformação a quente
- Grande resistência ao desgaste
- Boa fluidez
- Soldabilidade melhorada
- Baixo custo (superior ao FF cinzento)

APLICAÇÕES

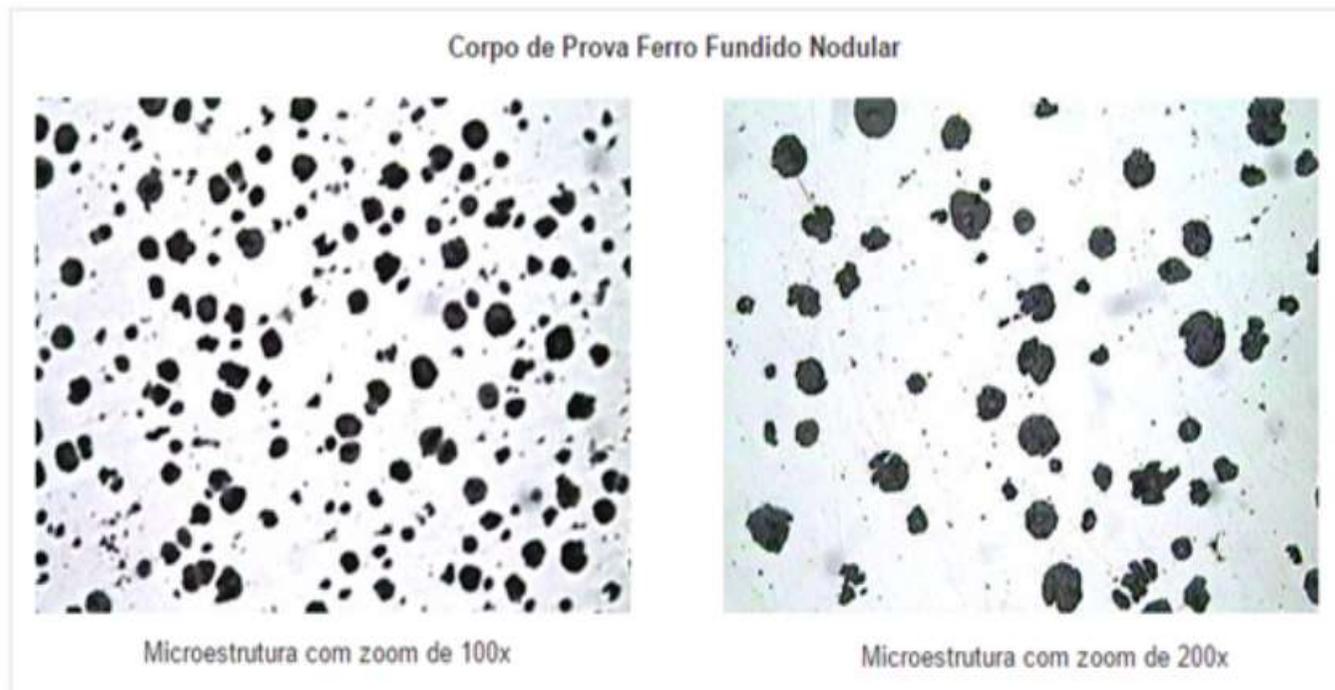
- Engrenagens
- Cambotas
- Juntas universais
- Válvulas
- Componentes sujeitos a desgaste



Ferro Fundido Nodular

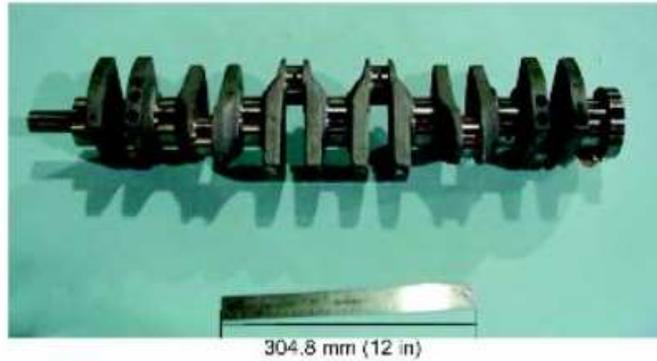
O ferro fundido nodular tem partículas arredondadas de grafita e sua estrutura tem adição de magnésio na massa metálica líquida (durante o processamento), seu tratamento térmico também pode ser diferenciado pela combinação e homogeneização do magnésio na sua estrutura. O ferro nodular tem boa ductilidade, excelente tenacidade e usinabilidade, além de ser bastante resistente a corrosão (em alguns casos é mais resistente que alguns tipos de aço).

Figura 5: Microestrutura do ferro fundido nodular



Ferro fundido nodular - Cubos de rodas, virabrequim e peças de transmissão.





The austempered ductile iron crankshaft for the TVR sports car.



A truck trailer suspension arm made from austempered ductile iron, Steele and Lincoln Foundry.



TVR Tuscan Speed 6, high-performance sports car with an austempered ductile iron crankshaft.



Austempered ductile iron suspension arm for a Ford Mustang Cobra

FF ductil/nodular

- Melhores propriedades mecânicas (ductilidade e resistência mecânica) dentre os ferros fundidos

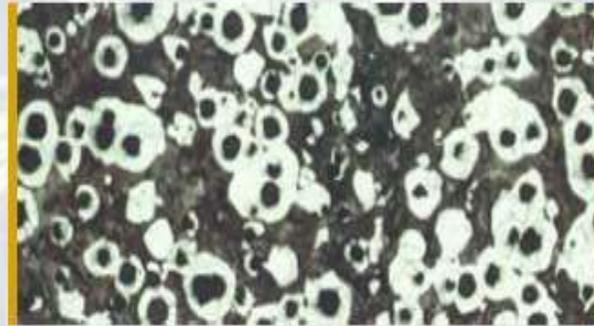
- Microestruturas:

GN + ferrita

GN + perlita

GN + ferrita/perlit →

GN + austenita/ferrita (ADI)

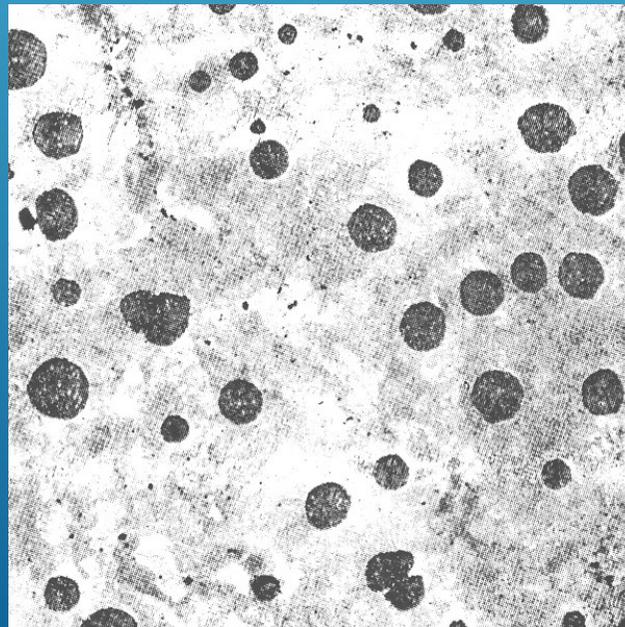
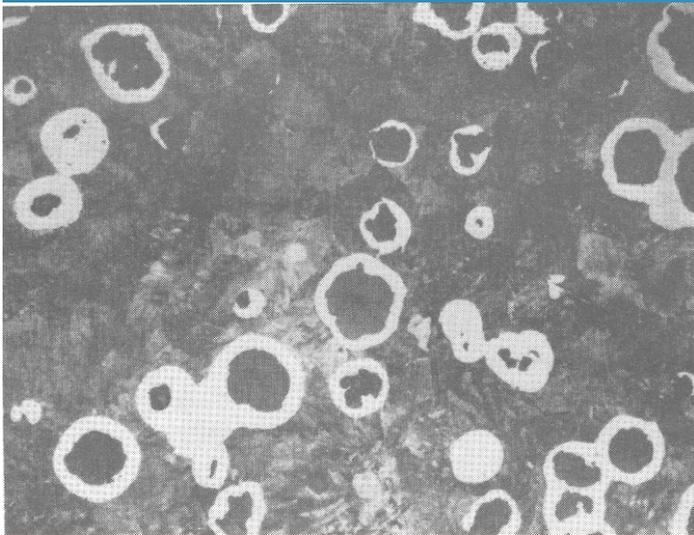


- Algumas aplicações: tubos centrifugados para saneamento válvulas para vapor e produtos químicos, cilindros para papel, virabrequins, engrenagens, etc.



Ferros Fundidos Nodulares

As boas propriedades dos ferros fundidos dúcteis ou nodulares devem-se à presença de nódulos esféricos de grafita na sua microestrutura, que geralmente no caso dos ferros não ligados, são compostas da seguinte forma: “nódulos esféricos de grafita rodeados por ferrita numa matriz de perlita, conforme mostram as figuras abaixo.



Ferros Fundidos Nodulares

A microestrutura do ferro fundido nodular é obtida através da adição de uma pequena quantidade de magnésio e/ou césio antes da fundição

Impurezas, tais como o “P” e o “S”, dentre outras, devem ser mantidas em níveis muito baixos, uma vez que interferem com a formação dos nódulos de grafita nos ferros fundidos dúcteis, os quais formam-se durante a solidificação..

A set of four parallel white lines of varying lengths, slanted diagonally from the bottom right towards the top right, located in the lower right quadrant of the slide.

Ferros Fundidos Nodulares – Sequência de solidificação

✓ **Hipoeutéticos:** Inicia-se a formação de dendritas de austenita. À medida que a temperatura diminui, o líquido residual torna-se mais rico em carbono e silício. Abaixo da temperatura do eutético estável começam a se formar nódulos de grafita no líquido residual rico em carbono e silício que são posteriormente envolvidos em um envólucro de austenita

✓ **Hipereutéticos:** a grafita é fase primária, a grafita nodular precipita-se. À medida que a temperatura diminui, o líquido residual tem sua composição cada vez mais próxima da eutética. Abaixo da temperatura do eutético estável começam a se formar mais nódulos de grafita que são posteriormente envolvidos por austenita.

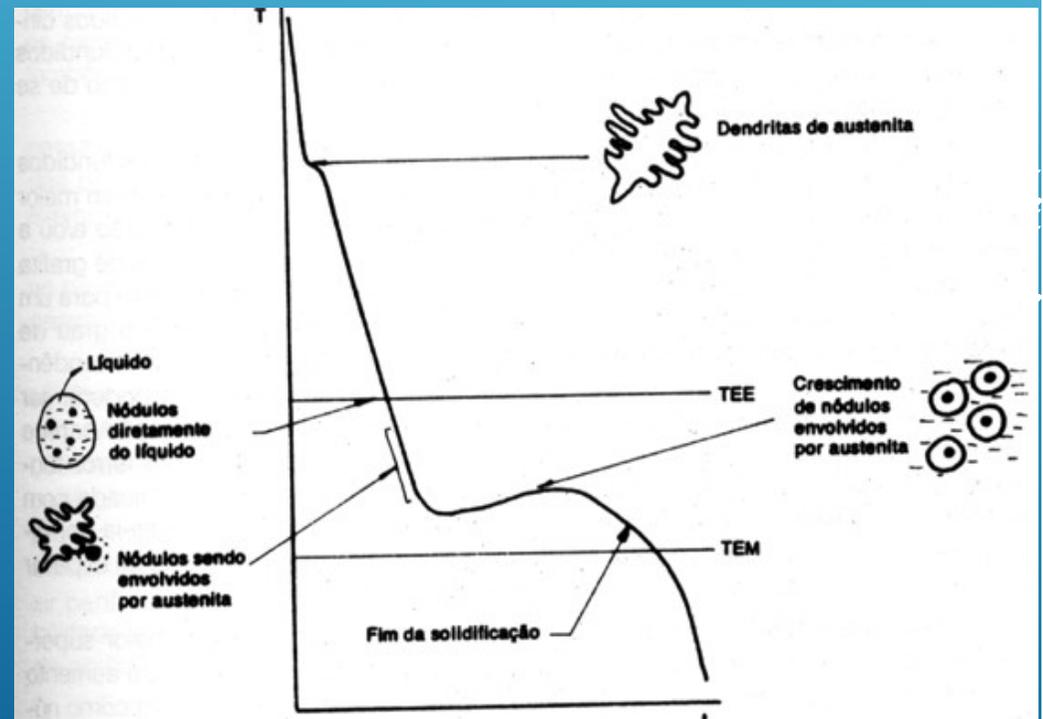


Figura 6: Curva do ensaio de tração do ferro fundido nodular

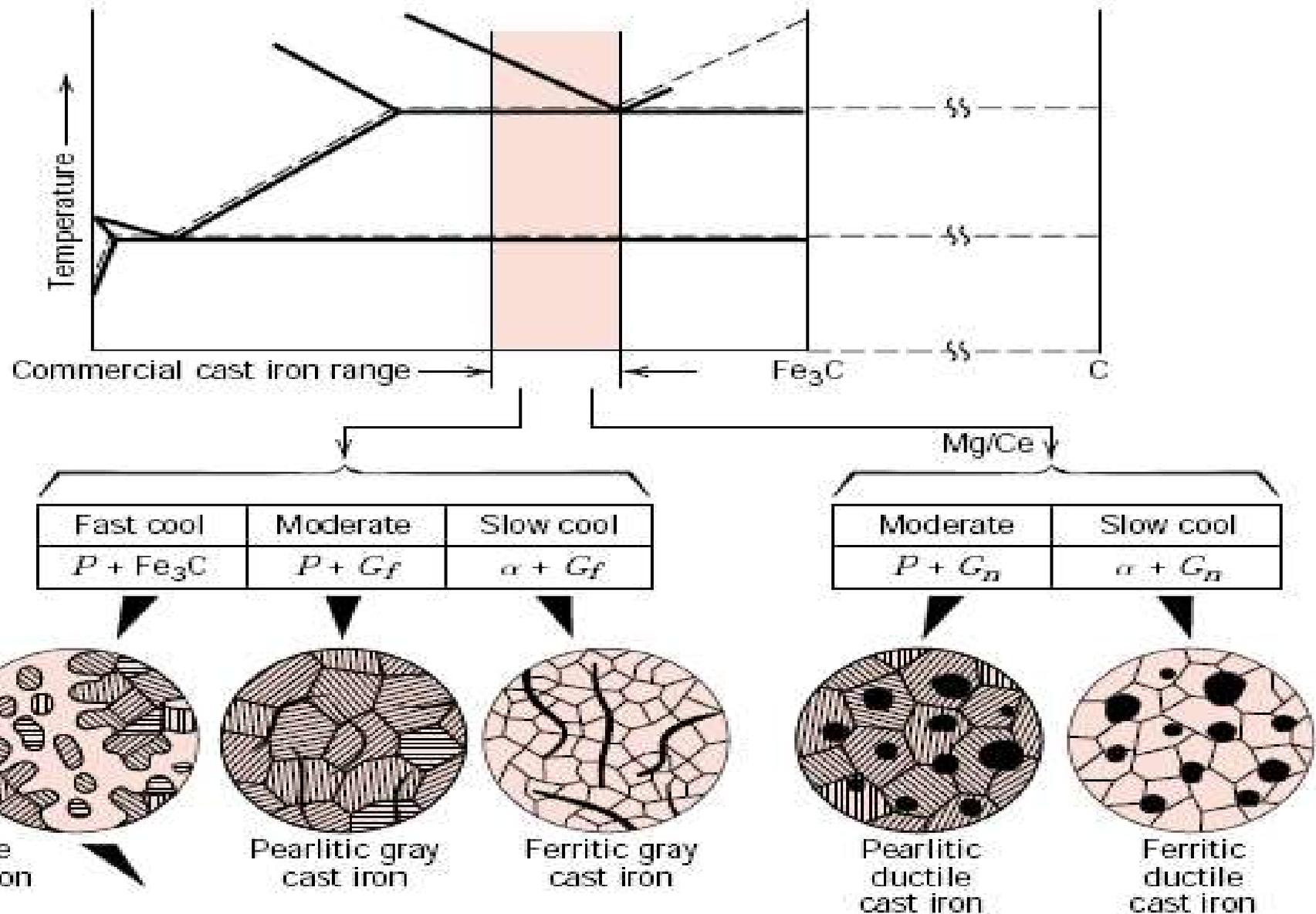


Ferros Fundidos Nodulares e Cinzentos- matrizes

- **A variação de composição química e do tratamento térmico dos ferros fundidos cinzentos e nodulares alteram a matriz que circunda as partículas de grafita em lamelas ou nódulos respectivamente**
- **A formação de uma matriz de ferrita é facilitada quanto menor for a velocidade de esfriamento da peça, maior a quantidade de grafita, maior a ramificação do esqueleto da grafita lamelar ou mais elevado número de nódulos e maior a quantidade de silício**

A formação de matriz de perlita é favorecida pela variação contrária dos fatores de formação de matriz de ferrita e por adição de elementos de liga como cobre, níquel, estanho, denominados perlitizantes

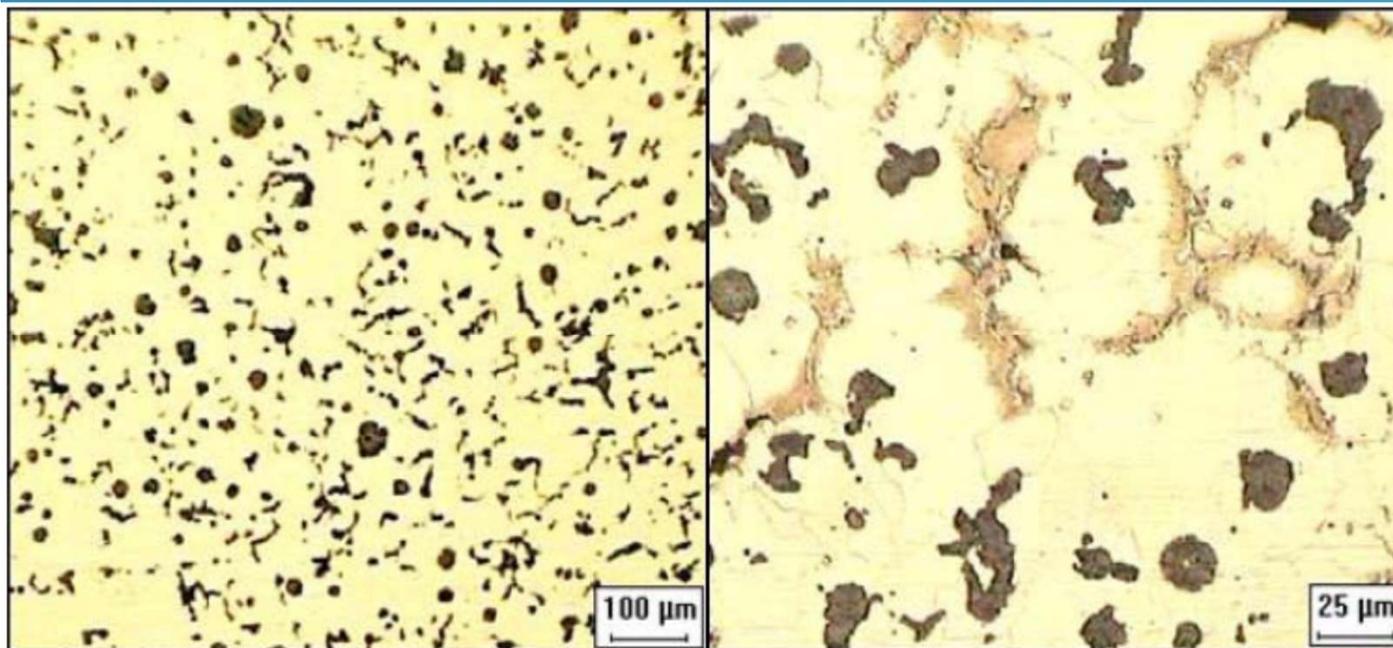
Ferros Fundidos Nodulares e Cinzentos- matrizes



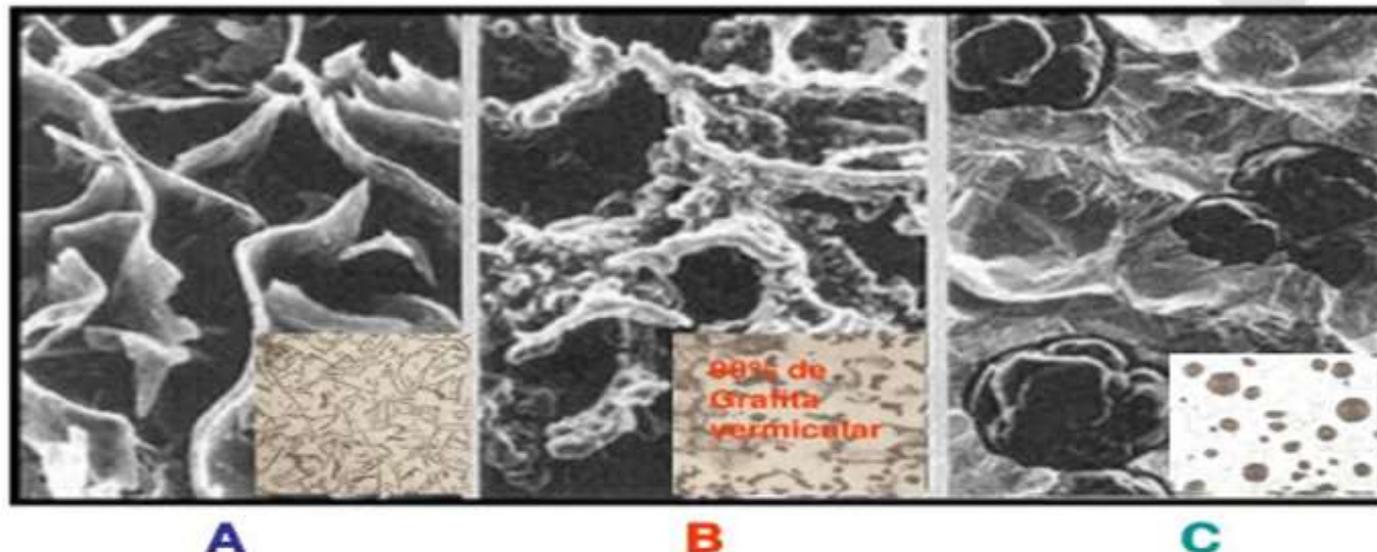
Ferros Fundidos Vermiculares

Muitas vezes com a inoculação, a grafita não toma a forma esferoidal, mas a forma vermicular. Isto pode acontecer de duas maneiras:

- ✓ **Demora no preenchimento do molde:** se após a estabilização de Fe-Si houver um tempo muito grande de espera para o preenchimento do molde, a segregação de elementos que promovem a agregação esférica da grafita começa a se dissolver
- ✓ **Quantidade insuficiente de inoculante:** neste caso a quantidade de inoculante não permite que se promova a agregação esférica da grafita



Ferros Fundidos Vermiculares



•Exemplos de morfologia típica da grafita encontrada em ferros fundidos: **A** (cinzento), **B** (vermicular) e **C** (nodular) Imagens geradas por MEV após ataque químico profundo.

•Nota-se que a estrutura da grafita na imagem “**A**” se aproxima a uma geometria em forma de placas onduladas, enquanto que a grafita na imagem “**B**” mostra placas onduladas mais curtas e com as extremidades arredondadas. A imagem “**C**” revela uma grafita em forma esférica.

A fabricação de ferros fundidos vermicular é obtida através da adição de **magnésio e titânio**.

O ferro fundido vermicular, também conhecido como CGI (Compacted Graphite Iron), por oito anos foi utilizado para confeccionar protótipos e motores de carros de corrida. Atualmente o CGI é aplicado na fabricação de motores diesel.

Ferro fundido Branco x Ferro fundido cinzento

- Possui o carbono não dissolvido precipitado na forma de carbonetos.

- Microestruturas:

- Ledeburita + perlita + cementita
- Ledeburita
- Ledeburita + cementita

- Elevadas dureza e resistência ao desgaste, que podem ser melhoradas pela adição de elementos como Cr e Mo.

- Muito baixas tenacidade e ductilidade.

- Praticamente todo o carbono não dissolvido na austenita ou ferrita se precipita na forma de grafita em veios ou lamelar. Isso só acontece se o ferro fundido tiver adições de 1% a 3% Si e se for resfriado de forma “lenta” no molde de fundição

- Microestruturas:

- grafita + ferrita
- grafita + perlita
- grafita + ferrita/perlita

- Material “fácil de se fundir”

- Boa usinabilidade

- Baixa ductilidade e tenacidade, devido ao efeito de entalhe da grafita em veios

- Resistência à tração entre 28kgf/mm² e 42 kgf/mm². Resistência à compressão 3X maior.

- Boa capacidade de amortecimento.



Ferros Fundidos - Influência de Elementos de Liga

Os elementos de liga mais empregados são:

- **Níquel:** atua como **grafitizante**
- **Cobre:** é um **grafitizante** como o níquel e um promovedor da formação de **perlita**.
- **Estanho:** possui um comportamento muito acentuado o que permite **propriedades mecânicas bem elevadas**. Teores de 0,2% Sn possibilitam matriz totalmente perlítica em uma peça de 200 mm de diâmetro de ferro fundido nodular
- **Molibdênio:** provoca uma grande **aumento de resistência** quando adicionado aos ferros fundidos nodulares diminuindo a ductilidade. Um inconveniente é a forte tendência à formação de carbonetos em secções mais finas
- **Vanádio e cromo:** são fortes formadores de **carbonetos**.

São utilizados quando se necessita alta resistência à abrasão, mas em que ductilidade e resistência ao impacto não precisam ser altas

Ferro Fundido Cinzento

Tipo: FC1	FERRÍTICO/PERLÍTICO	CLASSE: 15
-----------	---------------------	------------

Características / Aplicações

Uso geral em aplicações com reduzida solicitação mecânica, componente estruturais e/ou estatísticos de máquinas ou construções mecânicas/civis: carcaças, tampas, bases, contrapesos, calços, grelhas para sistema de saneamento.

Normas Similares

ABNT NBR 6589 FC 100/150 FC 200/250	SAE J431b G 1800 G 2500	ASTM A 48 CL 20/25 30/35	DIN 1691 GG 15
---	-------------------------------	--------------------------------	-------------------

Composição Química de Referência

Carbono (C)	Manganês (Mn)	Silício (Si)	Fósforo (P)	Enxofre (S)
3,20 3,80	0,50 0,90	2,00 2,80	0,08 Máximo	0,04 Máximo

Propriedades Mecânicas Alcançadas no Estado Bruto de Fundição

Limite de Resistência (LR)	Dureza Brinell (HB)
15 Kgf/mm ² (Mínimo)	130 a 200

Tratamento Térmico

Alívio de Tensões

Soldagem

Inadequada

Observações Gerais

A composição química pode variar em função da geometria/espessura da peça.

Ferro Fundido Nodular

Tipo: FN 1	FERRÍTICO	CLASSE: 40		
Características / Aplicações				
Componentes mecânicos submetidos a cargas moderadas e que exijam boa ductibilidade e usinabilidade. Indicado para serviços em altas temperaturas: grelhas, cubos de rodas, tambores.				
Normas Similares				
ABNT NBR 6916 FE 38017 FE 42012	SAE J434b 4018	ASTM A 536 Gr 60-40-18	DIN 1693 GGG 40	
Composição Química de Referência				
Carbono (C)	Manganês (Mn)	Silício (Si)	Fósforo (P)	Enxofre (S)
3,45 3,80	0,05 0,40	2,20 3,35	0,08 Máximo	0,04 Máximo
Propriedades Mecânicas Alcançadas no Estado Normalizado				
Limite de Resistência (LR)	Limite de Escoamento (LE)	Alongamento (A)	Dureza Brinell (HB)	
40 Kgf/mm ² (Mínimo)	25 Kgf/mm ² (Mínimo)	15% (Mínimo)	140 a 210	
Tratamento Térmico				
Recozimento				
Soldagem				
Inadequada				
Observações Gerais				
A composição química e a dureza podem variar em função da geometria/espessura da peça.				

Ferro Fundido Branco Especial

Tipo: NH/II	RESISTENTE A ABRASÃO / BAIXO IMPACTO	CLASSE: NI-HARD
--------------------	---	------------------------

Características / Aplicações

Peças sujeitas ao desgaste por abrasão com baixo impacto. Material de elevada dureza, conseqüentemente, de difícil usinabilidade: grelhas, chapas de desgaste, revestimento de moinhos, anéis de moagem, fusos transportadores de minérios, calhas de escoamento, etc.

Normas Similares

ASTM A 532 CLASSE I
TIPO A
TIPO B

Composição Química de Referência

Carbono (C)	Manganês (Mn)	Silício (Si)	Fósforo (P)	Enxofre (S)	Cromo (Cr)	Níquel (Ni)	Molibdênio (Mo)
2,50 3,60	1,30 Máximo	0,80 Máximo	0,10 Máximo	0,15 Máximo	1,40 4,00	3,30 5,00	1,00 Máximo

Propriedades Mecânicas Alcançadas no Estado Bruto de Fundição

Dureza Brinell
450 a 600 HB

Tratamento Térmico

Sem Tratamento

Alívio de Tensões

Soldagem

Inadequada

Observações Gerais

Dureza a ser medida pelo método Rockwell ou Vickers com valor convertido para dureza Brinell.

Faixa de dureza pode ser alterada em função da espessura da peça fundida.

Ferro Fundido Branco Especial

Tipo: FE

RESISTENTE A ABRASÃO

CLASSE: II-A

Características / Aplicações

Ferro fundido ligado ao cromo apresentando elevada dureza, de difícil usinabilidade, não resistente a impactos, com alta resistência a abrasão: rolos para moinho, chapa de desgaste.

Normas Similares

ASTM A 532 CLASSE II
TIPO A

Composição Química de Referência

Carbono (C)	Manganês (Mn)	Silício (Si)	Fósforo (P)	Enxofre (S)	Cromo (Cr)	Níquel (Ni)	Molibdênio (Mo)	Cobre (Cu)
2,00 3,30	2,00 Máximo	1,50 Máximo	0,10 Máximo	0,06 Máximo	11,00 14,00	3,00 Máximo	3,05 Máximo	1,20 Máximo

Propriedades Mecânicas Alcançadas no Estado Revenido

Dureza Brinell
450 a 600 HB

Tratamento Térmico

Alívio de Tensões

Normalização e Revenimento

Soldagem

Inadequada

Observações Gerais

Dureza a ser medida pelo método Rockwell ou Vickers com valor convertido para dureza Brinell ou diretamente pelo método Brinell.

Ferro Fundido Branco Especial

Tipo: FE	RESISTENTE A ABRASÃO	CLASSE: III-A						
Características / Aplicações								
<p>Ferro fundido ligado ao cromo apresentando elevada dureza, de difícil usinabilidade, não resistente a impactos, com alta resistência a abrasão: placas de revestimento, chapas de desgaste, blindagens, rolos e anéis para moagem.</p>								
Normas Similares								
ASTM A 532 CLASSE III TIPO A								
Composição Química de Referência								
Carbono (C)	Manganês (Mn)	Silício (Si)	Fósforo (P)	Enxofre (S)	Cromo (Cr)	Níquel (Ni)	Molibdênio (Mo)	Cobre (Cu)
2,00 3,30	2,00 Máximo	1,50 Máximo	0,10 Máximo	0,06 Máximo	23,00 30,00	2,50 Máximo	3,00 Máximo	1,20 Máximo
Propriedades Mecânicas Alcançadas no Estado Revenido								
Dureza Brinell 450 a 600 HB								
Tratamento Térmico								
Alívio de Tensões	Normalização e Revenimento							
Soldagem								
Inadequada								
Observações Gerais								
Dureza a ser medida pelo método Rockwell ou Vickers com valor convertido para dureza Brinell ou diretamente pelo método Brinell.								

Tratamentos térmicos aplicáveis aos ferros fundidos nodulares:

- **Alívio de tensões** (550-590°C) → Não produz modificações microestruturais significativas, somente alívio de tensões por microdeformações plásticas. Alivia as tensões do processo de fundição.
- **Normalização** (900 – 950°C) → resfriamento ao ar. Produz uma matriz perlítica.
- **Recozimento ferritizante** → tratamento entre as temperaturas superior eutetóide e inferior eutetóide, podendo ou não ser precedido de uma etapa a 900-950°C. Este tratamento provoca a grafitização da perlita. A etapa de alta temperatura pode servir para dissolver carbonetos eventualmente existentes.
- **Têmpera e revenido**