



FERROS FUNDIDOS

Engenharia e Ciência dos Materiais I
Profa.Dra. Lauralice Canale



Ligas ferrosas contendo 2.1%-4% C e 1%-3% Si

- composição torna-os excelentes para fundição
- a fabricação de ferros fundidos é várias vezes superior a de qualquer outro metal fundido, excepto lingotes e tarugos de aço que serão posteriormente trabalhados.

Ferros Fundidos - Introdução

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





Ferros Fundidos

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
- Soldadura muito limitada



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



The austempered ductile iron crankshaft for the TVR sports car.



Austempered ductile iron suspension arm for a Ford Mustang Cobra



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



Ironbridge, made of cast iron

1779



Gate of Guell Palace by Gaudi in Barcelona

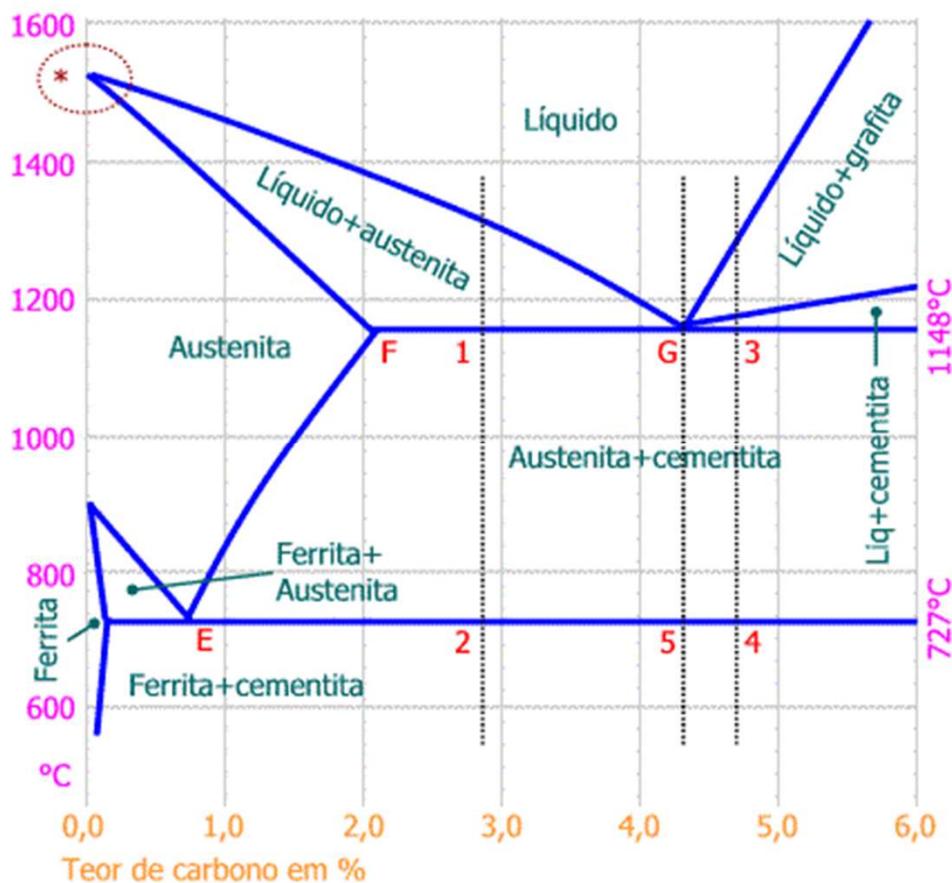


Cast iron gate of Guell Palace by Gaudi in Barcelona

Final de 1800

Ferros Fundidos - Definição

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).

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

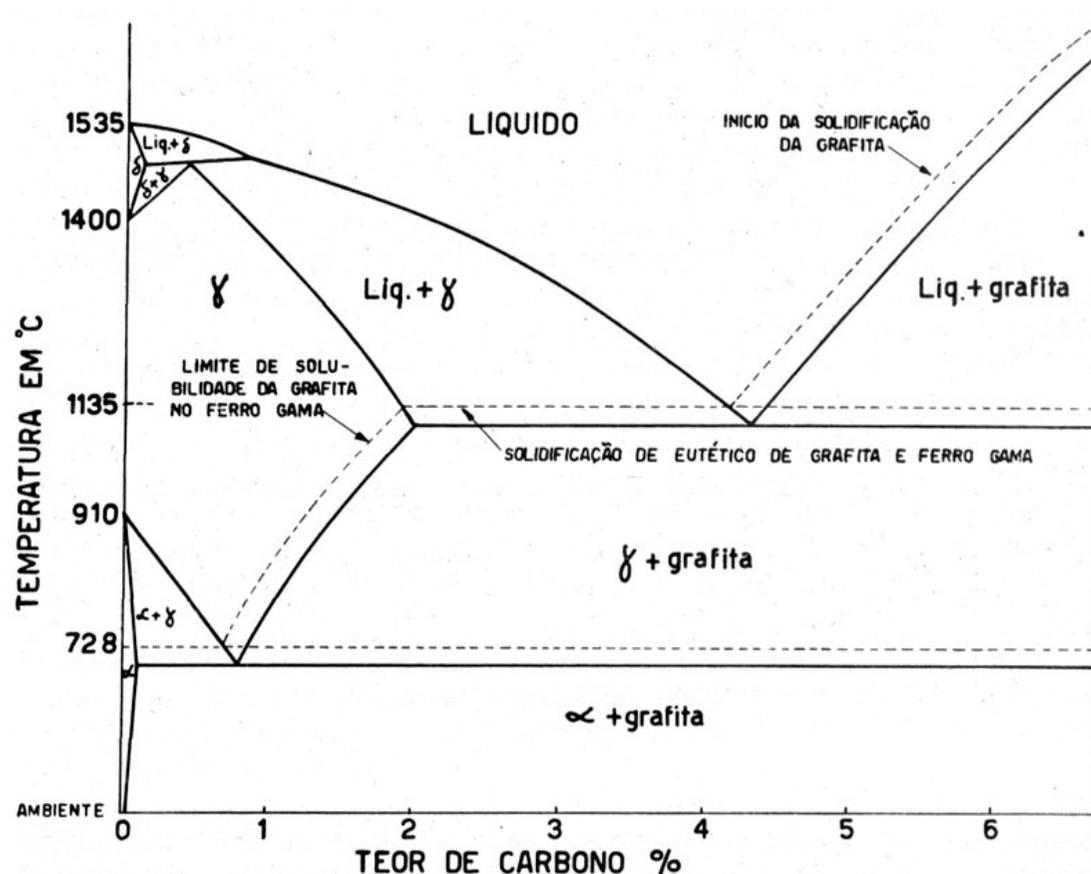


Fig. 521 — Diagrama de equilíbrio ferro-carbono simplificado mostrando em pontilhado o diagrama estável ferro-grafita.



Ferros Fundidos - Classificação

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

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

De acordo com a composição química e com a distribuição de carbono na sua microestrutura, os ferros fundidos podem ser classificados em quatro grandes categorias:

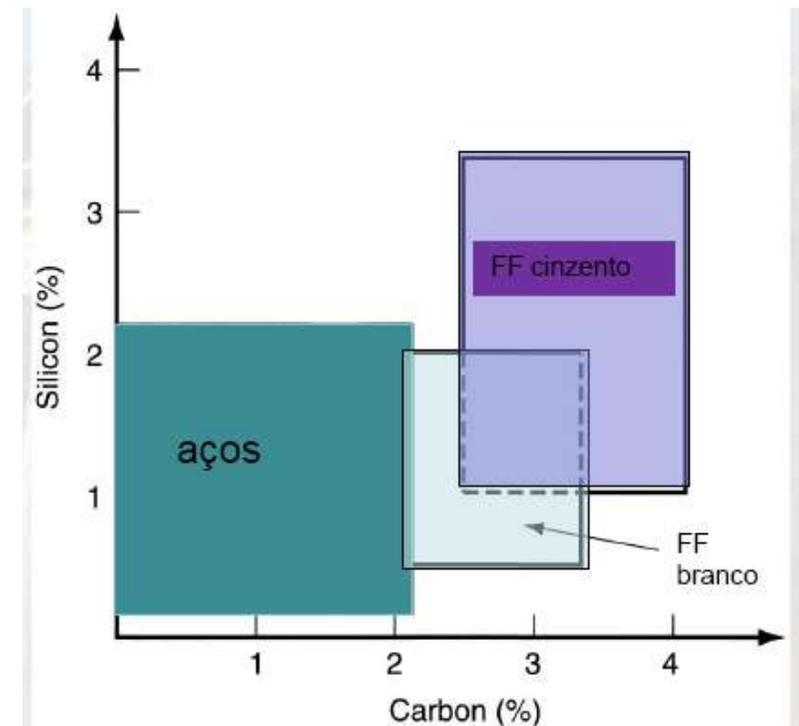
- Branco
- Cinzento
- Maleável
- Dúctil (nodular)

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

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

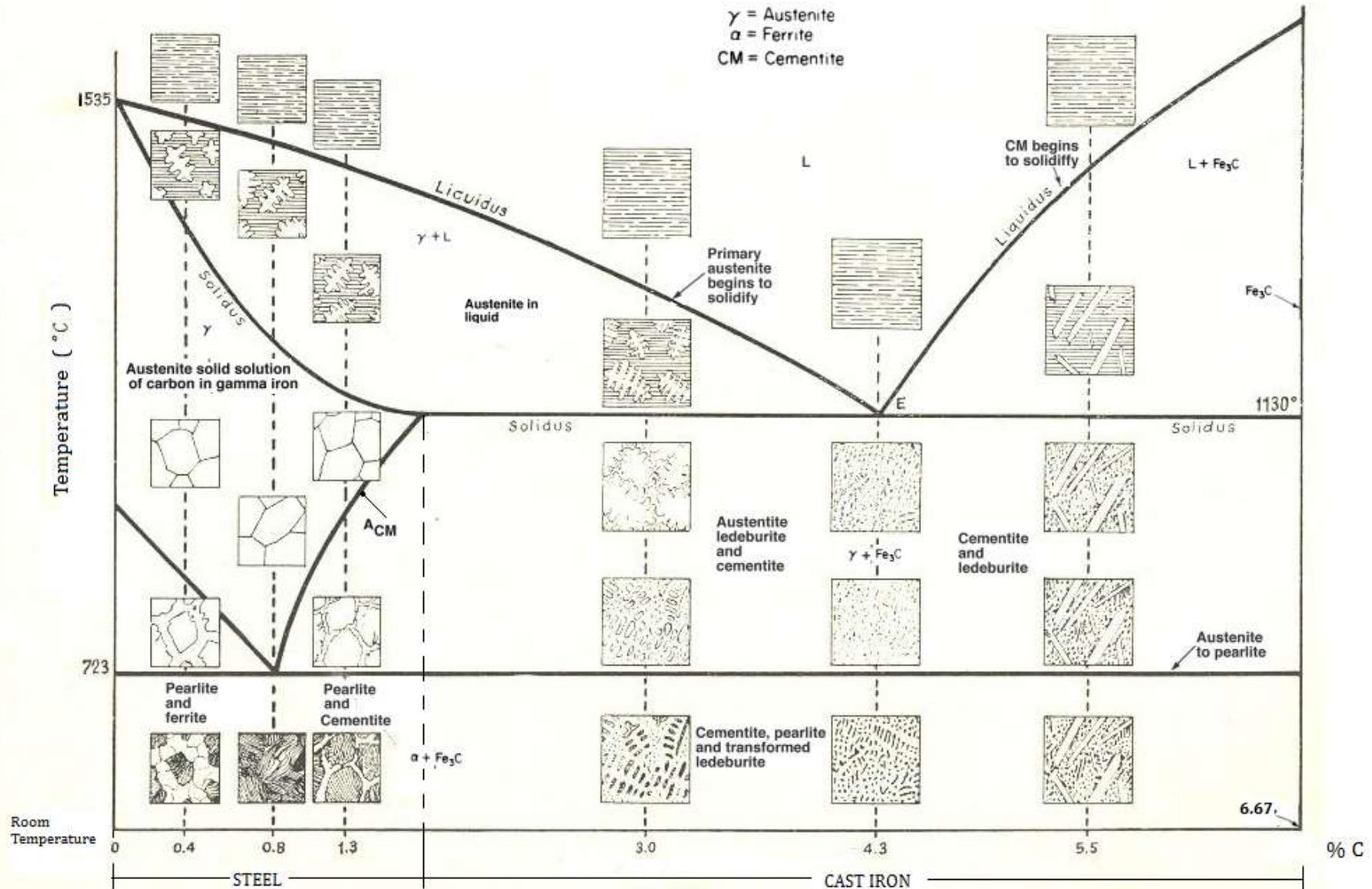
- Principal aplicação é a produção de ferro fundido maleável
- Peças sujeitas a elevada compressão e desgaste
- Elevada taxa de arrefecimento limita o tamanho das peças (esp < 100mm)

PROPRIEDADES

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

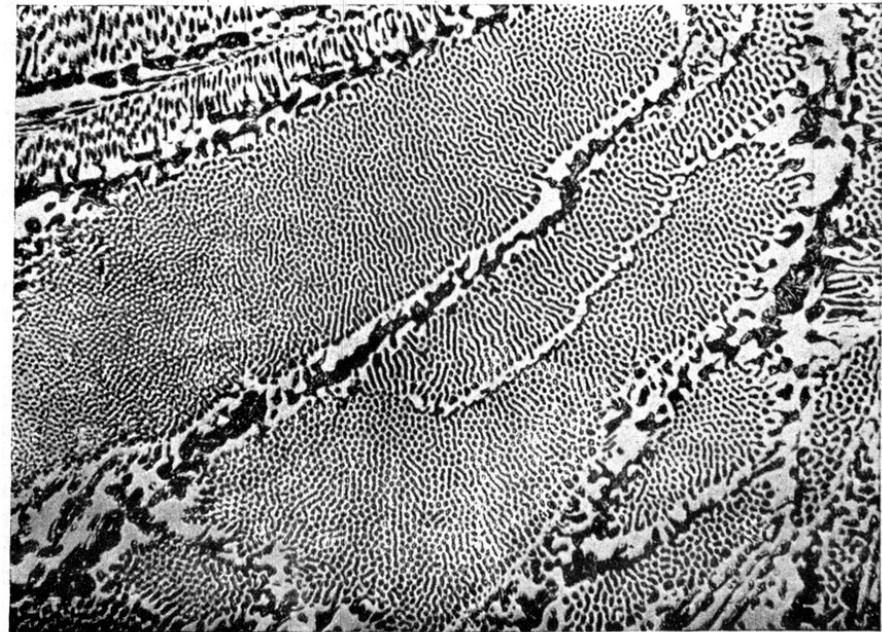


Ferro Fundido Branco



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

- Considerando agora um ferro fundido branco hipoeutético, por exemplo com 3,0% de C
- 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
- Abaixo de 727°C a austenita isolada se transforma em perlita e à temperatura ambiente a microestrutura será : cristais de perlita envolvidos por ledeburita

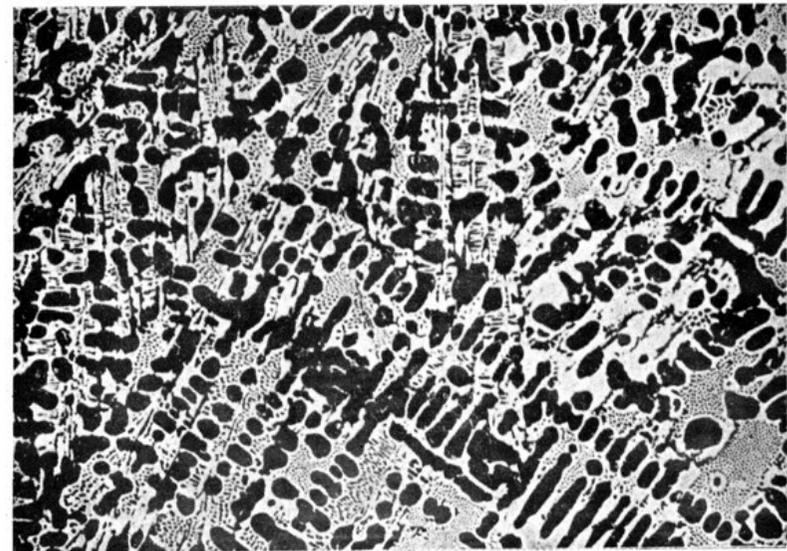


Fig. 523 — Ferro fundido branco hipoeutético. Dendritas de perlita, áreas pontilhadas de ledeburita, áreas brancas de cementita. Ataque: nítrico. 100 x.

Ferro Fundido Branco hipereutético

- Considerando uma liga hipereutética, por exemplo, 5,5% de C
- 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 cinzento

MICROESTRUTURA

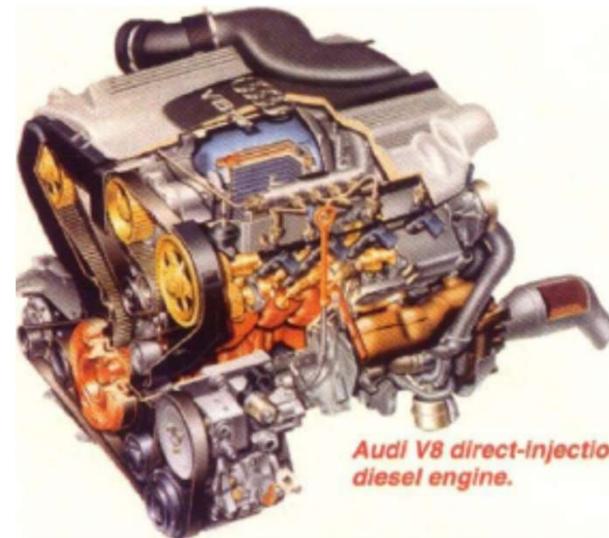
- $2 \leq \%C \leq 4,0$; $1,0 \leq \%Si \leq 3,0$
- Baixa velocidade de arrefecimento
=> Carbono solidifica em forma de grafite (flocos) – forma estável
- A matriz é ferrítica (veloc. baixa) ou perlítica (veloc. moderada)
- Flocos de grafite reduzem a resistência mecânica e a ductilidade, pois do ponto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

- 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

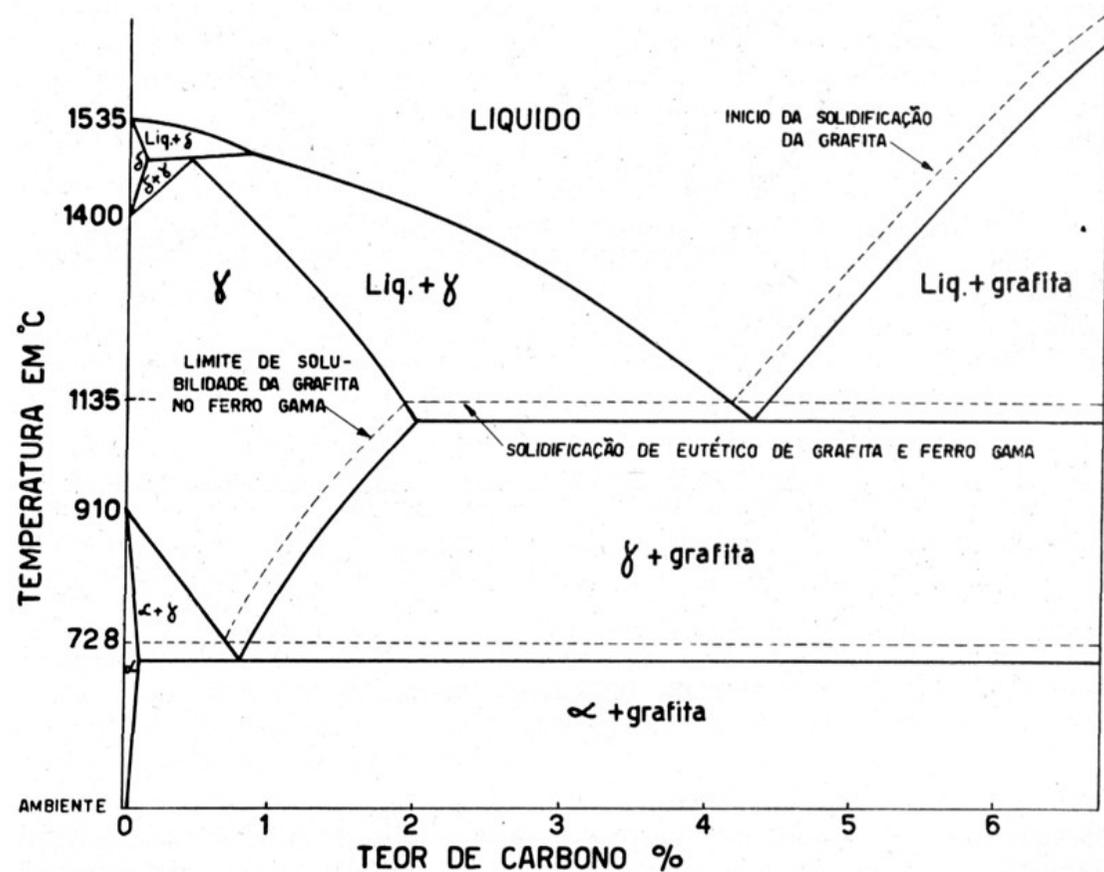


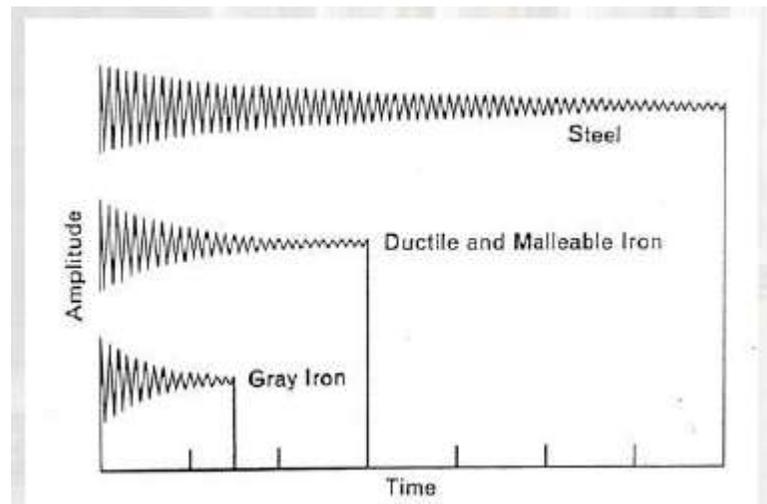
Fig. 521 — Diagrama de equilíbrio ferro-carbono simplificado mostrando em pontilhado o diagrama estável ferro-grafita.

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

Ex.: 3,6%C e 2,3% Si

FF cinzento

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



Ferro fundido cinzento hipoeutético

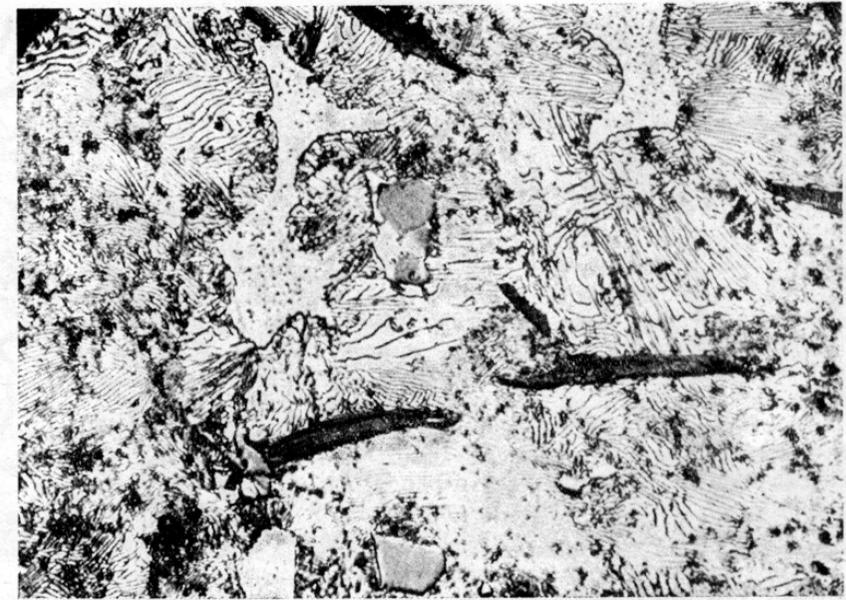
- A solidificação de um ferro fundido cinzento hipoeutético inicia-se com a nucleação de dendritas de austenita
- Conforme a temperatura decresce, o crescimento das dendritas de austenita continua, havendo um enriquecimento progressivo de carbono no líquido remanescente. Quando o sistema atinge a temperatura 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



- 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

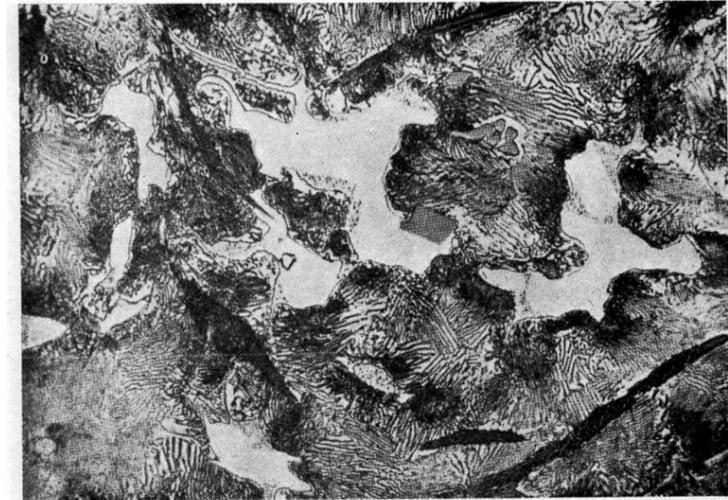
Ferro fundido eutético - steadita

- 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



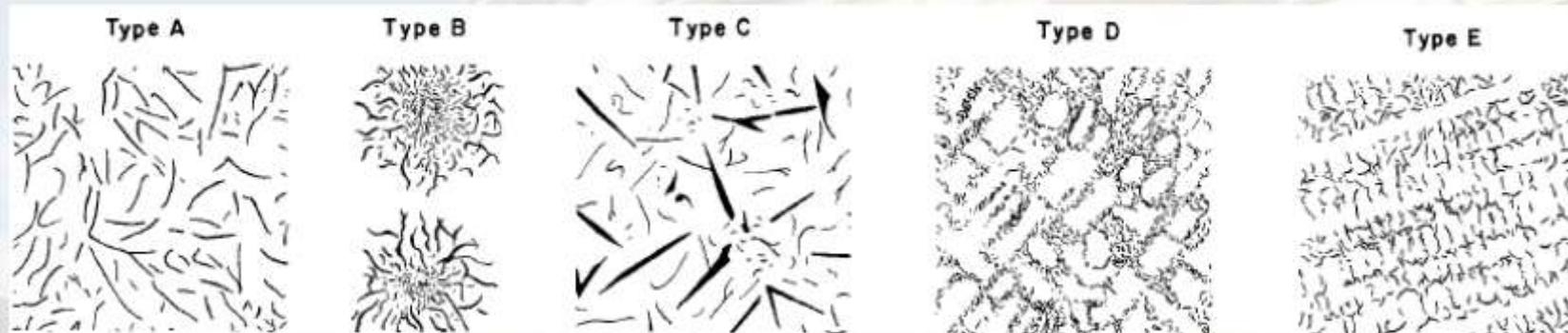


Aspectos da grafita

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 esfriamento: 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

Aspectos da grafita

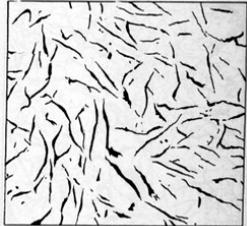


Fig. 532 — Veios de grafita do tipo A. Veios curvos as veios laminados, com orientação a 90°. 100x.

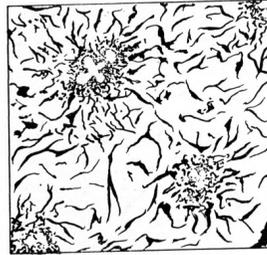


Fig. 535 — Veios de grafita do tipo B. Veios com disposição radial em torno de nódulos de aspecto esférico. 100x.



Fig. 537 — Veios de grafita do tipo C. Veios grandes e quase retos e, entre eles, veios pequenos curvos. 100x.



Fig. 534 — Ferro fundido cinzento, sem ataque, com veios do tipo A. 150x.



Fig. 536 — Ferro fundido cinzento, sem ataque, com veios do tipo B. 150x.

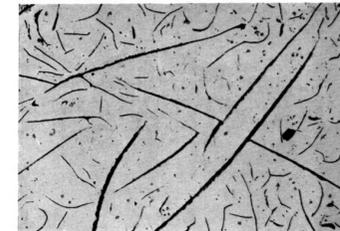


Fig. 538 — Ferro fundido cinzento, sem ataque, com veios tipo C. 150x.

- Aspecto da grafita Tipo A

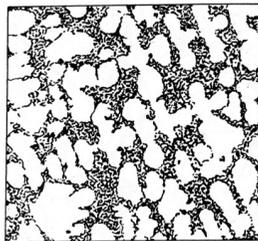


Fig. 539 — Veios de grafita do tipo D. Veios pequenos e curtos agrupados preenchendo o espaço interlamelar como esférico. 100x.

- Aspecto da grafita Tipo B

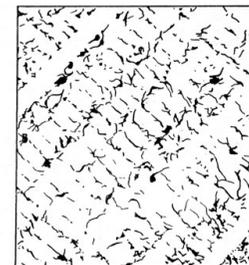


Fig. 541 — Veios de grafita do tipo E. Veios orientados segundo o espaço interlamelar. 100x.

- Aspecto da grafita Tipo C

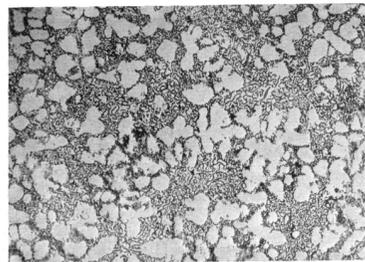


Fig. 540 — Ferro fundido cinzento, sem ataque, com grafita do tipo D. 150x.

- Aspecto da grafita Tipo D

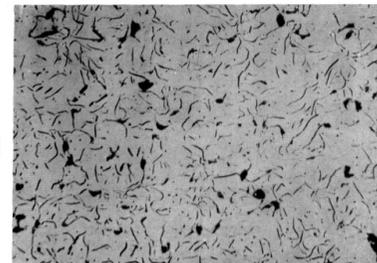


Fig. 542 — Ferro fundido cinzento com grafita do tipo E. 150x.

- Aspecto da grafita Tipo E

Tamanhos da grafita

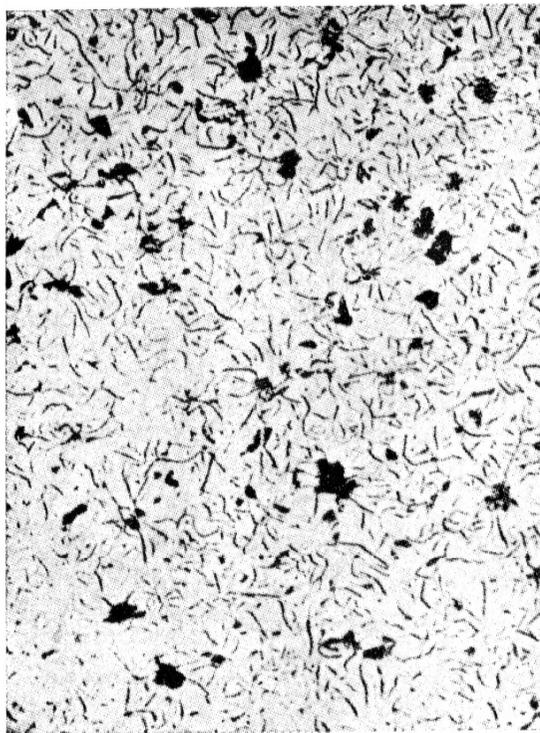
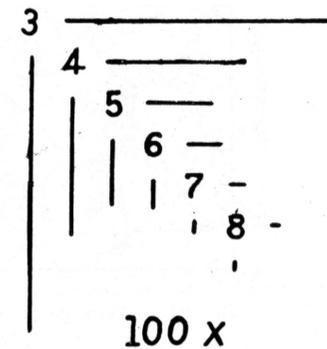
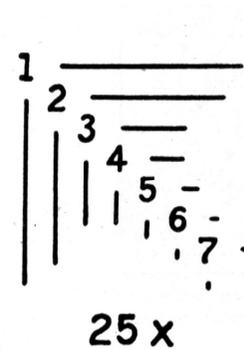


Fig. 548 — Ferro fundido cinzento sem ataque.
Exemplo de veios de tamanho n.º 6. 100 x.

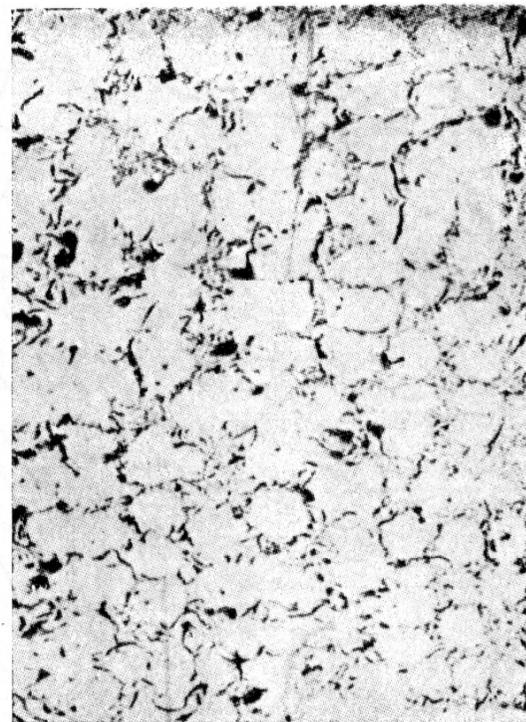


Fig. 549 — Ferro fundido cinzento sem ataque.
Exemplo de veios de tamanho n.º 8. 100 x.

Ferros Fundidos Nodulares

MICROESTRUTURA

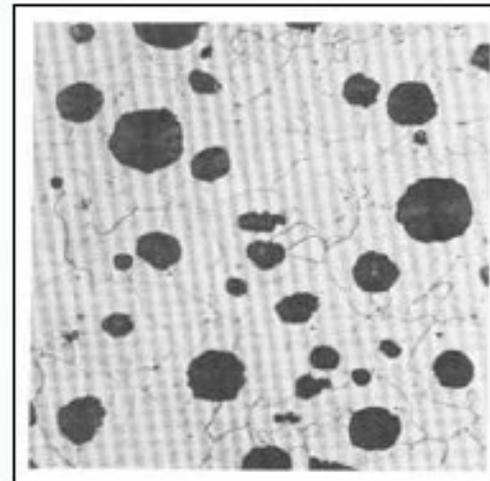
- $3,5 \leq \%C \leq 4,0$; $1,8 \leq \%Si \leq 3,0$
- Pequenas adições de Mg
- Em vez de flocos formam-se nódulos
- A matriz é ferrítica (veloc. baixa) ou perlítica (veloc. moderada)
- Grafite em nódulos origina maior resistência, ductilidade e tenacidade

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



FF ductil/nodular

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

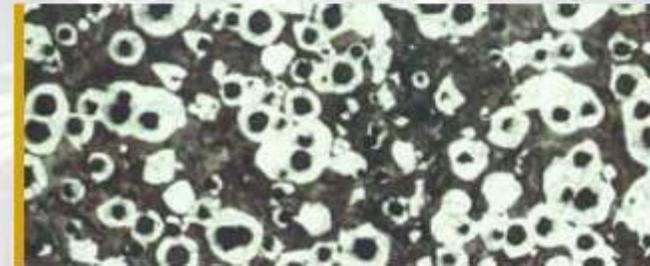
- Microestruturas:

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.

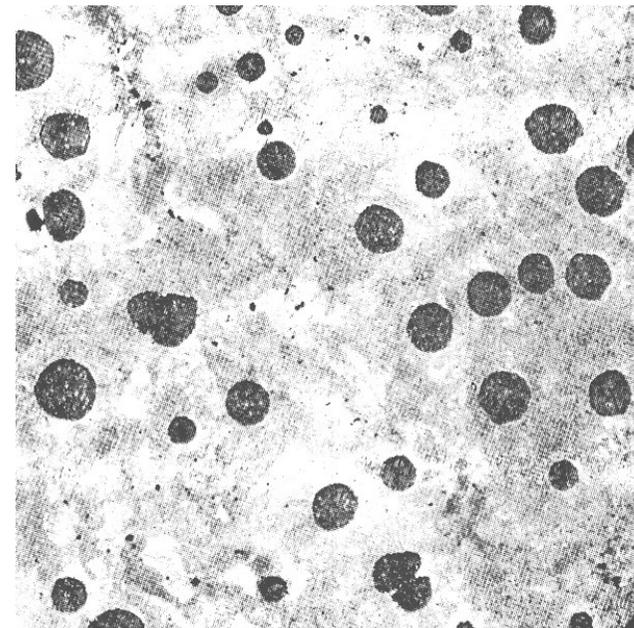
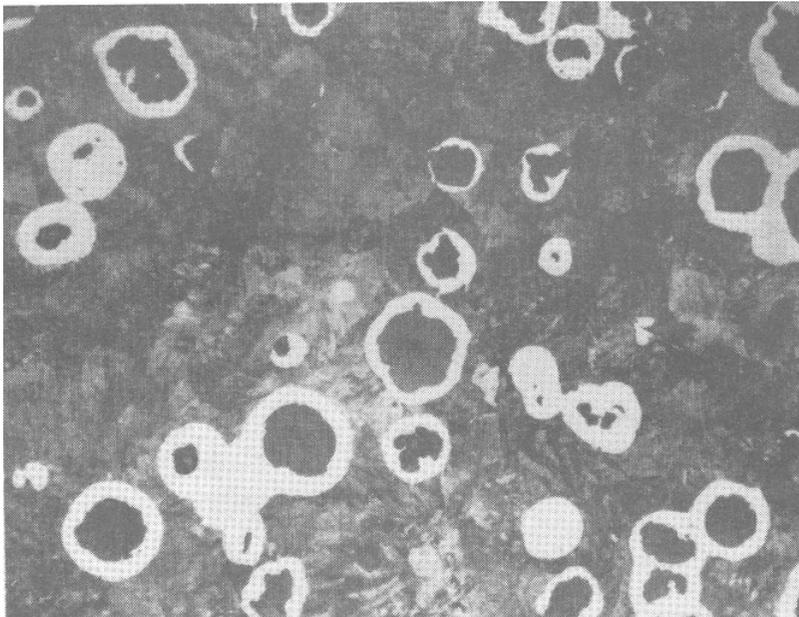


Ferros Fundidos Nodulares

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.

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

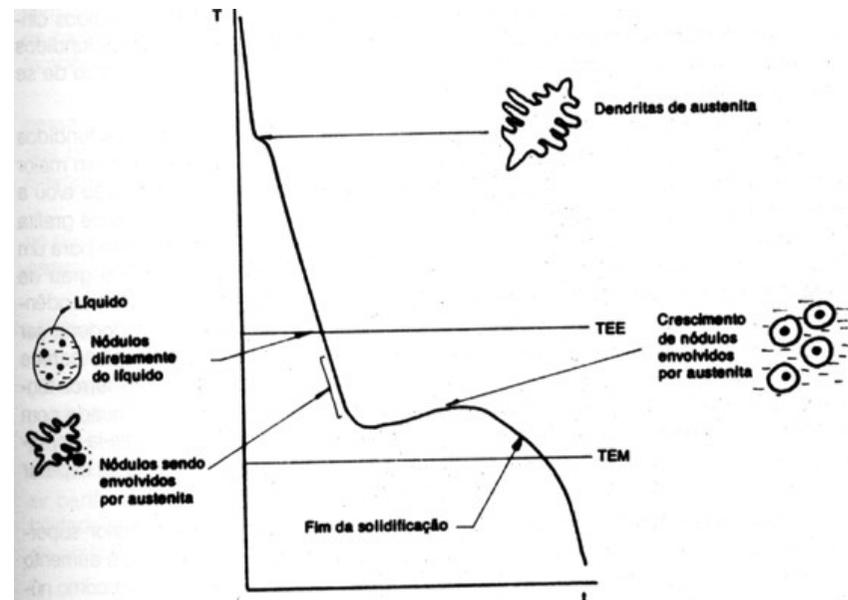
Impurezas, tais como o “P” e o “S”, dentre outras, devem ser mantidas em níveis muito baixos, uma vez que interferem com a formação dos nódulos de grafita nos ferros fundidos dúcteis, os quais formam-se durante a solidificação..



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.

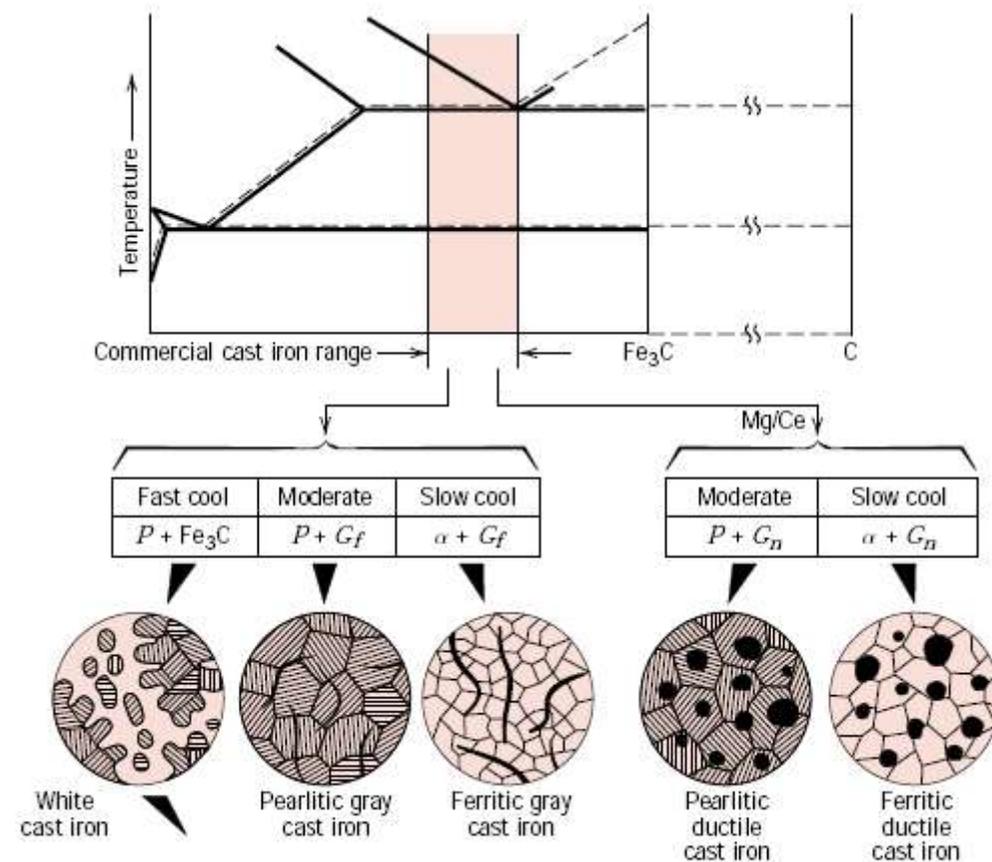


Ferros Fundidos Nodulares e Cinzentos- matrizes

- 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

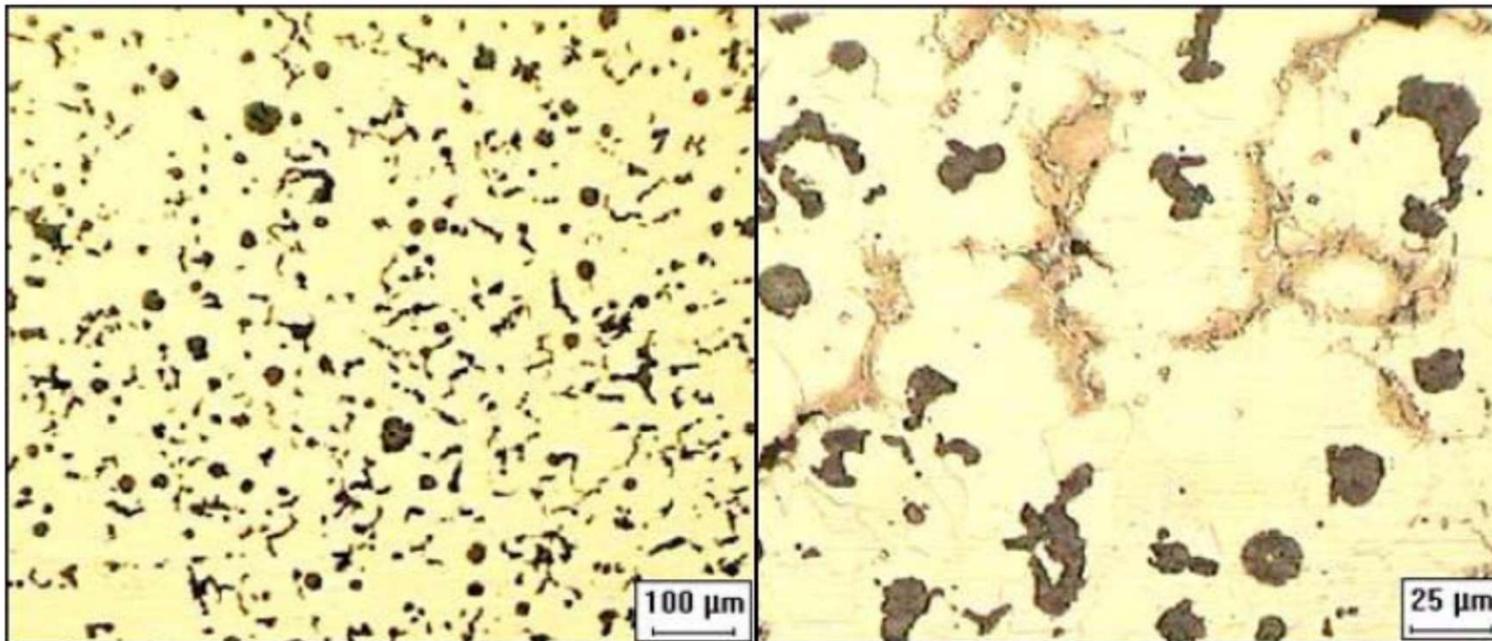


Ferros Fundidos Vermiculares

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



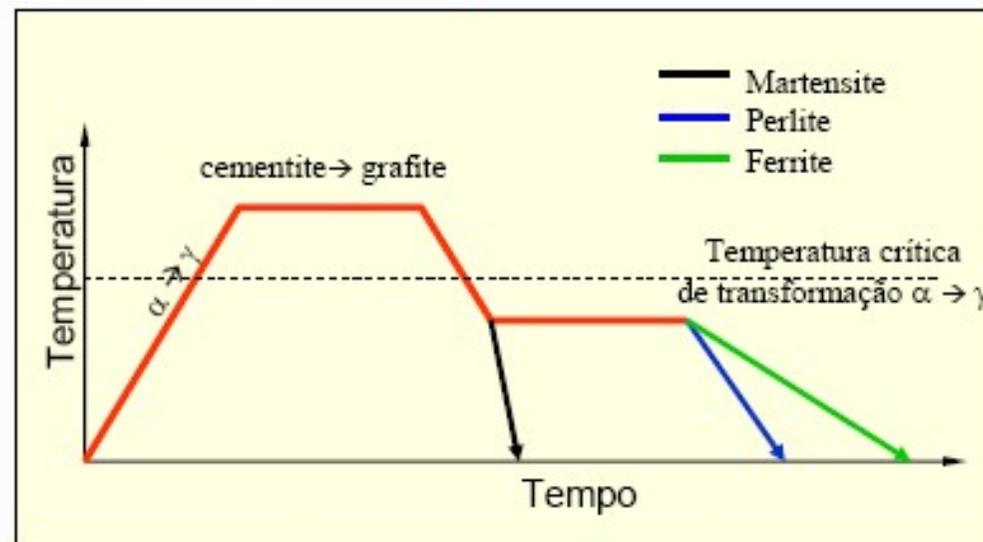
Ferros Fundidos Maleáveis

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



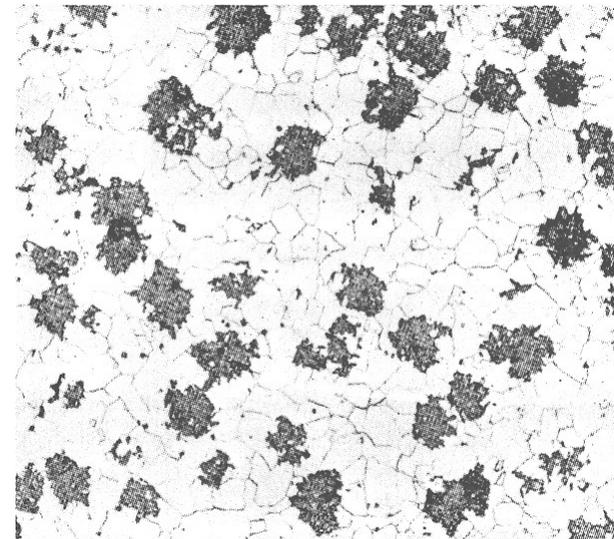
Ferros Fundidos Maleáveis

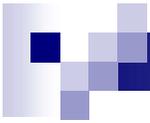
Os ferros fundidos maleáveis são obtidos a partir do ferro fundido branco, quando submetidos a um tratamento térmico de grafitização (aprox. 940°C), quando os carbonetos de ferro transformam-se em grafita (nódulos de carbono revenido).

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.

Na figura ao lado vemos nódulos de grafita (carbono revenido) numa matriz ferrítica. Neste caso ocorreu completa grafitização.





Sofia D'Oliveira (UFPR)

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**, aumentando a faixa entre a temperatura do eutético estável e do metaestável. Como perlitzante o efeito não é muito pronunciado. Adições de aproximadamente 5% não são suficientes para obtenção de matriz totalmente perlítica
- **Cobre:** é um **grafitizante** como o níquel e um promovedor da formação de **perlita**. Aumenta significativamente as propriedades mecânicas pela formação de perlita e também do endurecimento da ferrita
- **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 precisem 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		Dureza Brinell		
(LR)		(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							
<p>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.</p>							
Normas Similares							
<p>ASTM A 532 CLASSE I TIPO A TIPO B</p>							
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							
<p>Dureza Brinell 450 a 600 HB</p>							
Tratamento Térmico							
Sem Tratamento		Alívio de Tensões					
Soldagem							
<p>Inadequada</p>							
Observações Gerais							
<p>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.</p>							

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.								

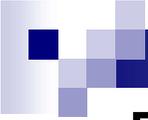
Ferro Fundido Branco Especial

Tipo: FE	RESISTENTE A ABRASÃO	CLASSE: III-A						
Características / Aplicações								
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.								
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**



Ferros Fundidos - Tratamentos Térmicos

O ferro fundido, em especial o cinzento, apresenta uma estrutura muito semelhante aos aços, à exceção do carbono livre na forma de veios alongados, que quebra a continuidade da matriz e confere ao material fragilidade e propriedades mecânicas geralmente inferiores a dos aços. Tal semelhança na matriz estrutural confere aos ferros fundidos a possibilidade de endurecimento por têmpera.

Face aos elevados teores de carbono e silício, as temperaturas de austenitização são mais elevadas e os tempos de permanência nestas temperaturas mais longos, para que haja completa dissolução na austenita.

Ferros fundidos de estrutura inteiramente perlítica reagem melhor a têmpera do que os de estrutura ferrítica, requerendo menores tempos para obtenção de uma estrutura austenítica capaz de, após resfriamento, resultar numa estrutura final de maior dureza. Os ferros fundidos de matriz ferrítica exigem tempos muito longos à temperatura de encharque para permitir a dissolução do carbono livre na austenita.

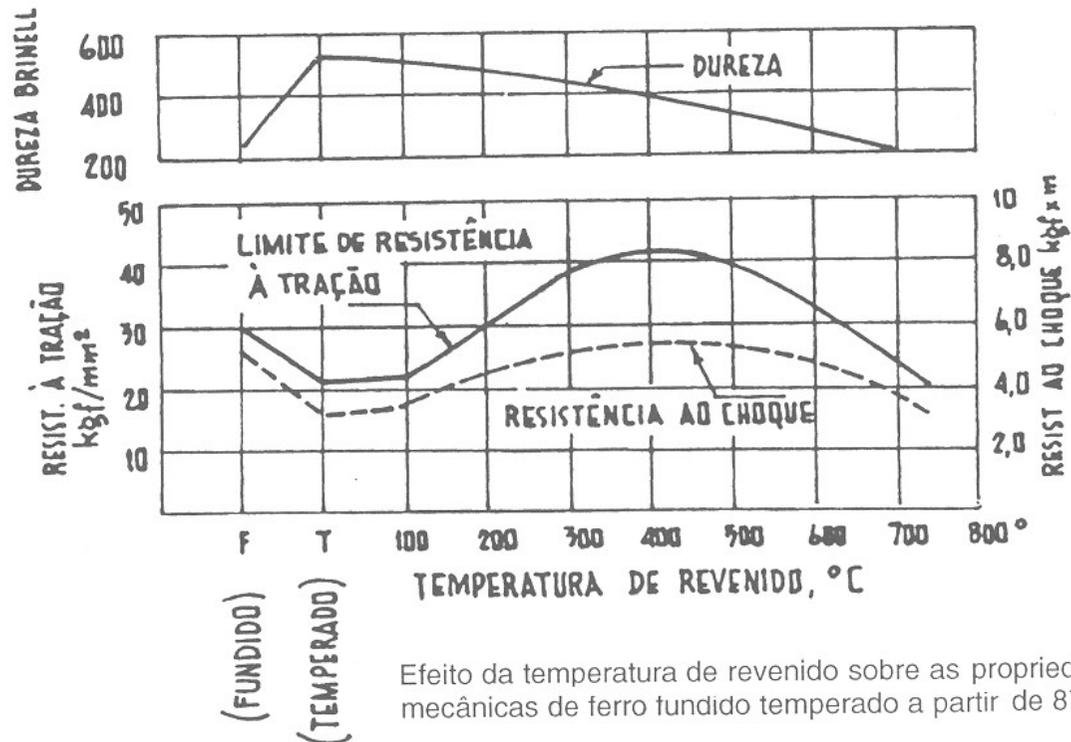
O ciclo térmico para execução de têmpera basicamente é o seguinte:

- ✓ Aquecimento gradual (aprox. 100°C/h) para minimizar tensões térmicas e/ou fissurações;
- ✓ Manutenção na temperatura de encharque (em torno de 25°C a 65°C acima da temperatura de transformação) durante 8 a 24 minutos por centímetro de espessura da seção da peça;
- ✓ Resfriamento em banho de óleo agitado até aproximadamente 150°C quando se deve iniciar o ciclo de revenido, conforme ilustra figura a seguir.

Ferros Fundidos - Tratamentos Térmicos

O processo de têmpera resulta numa elevação da dureza superficial do ferro fundido, porém com prejuízo da resistência à tração e ao choque.

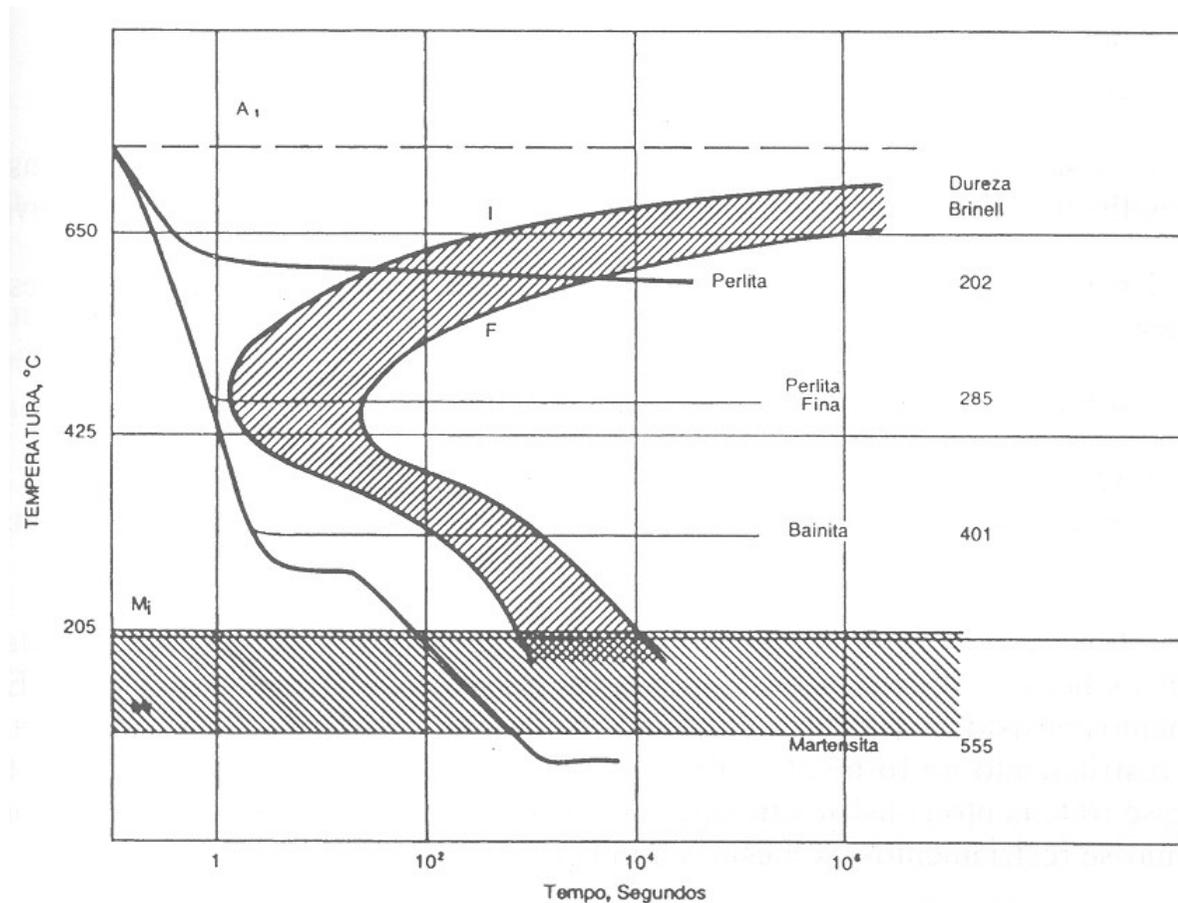
O ciclo de revenido subsequente à tempera irá melhorar o comportamento do material com significativo acréscimo da resistência a tração e da tenacidade, requerendo entretanto atenção em relação a temperatura de aquecimento, visto que níveis mais elevados promovem uma ação nociva a estas propriedades, conforme ilustram gráficos abaixo.



Efeito da temperatura de revenido sobre as propriedades mecânicas de ferro fundido temperado a partir de 870°C

Ferros Fundidos - Tratamentos Isotérmicos

As técnicas de Austêmpera e Martêmpera são idênticas as empregadas nos aços. A figura abaixo ilustra o ciclo de resfriamento para execução de cada um destes tratamentos num ferro fundido cinzento de baixo silício.



- Curva superior corresponde a um recozimento isotérmico resultando em perlita com 202HB.

- Curvas intermediárias correspondem a austêmpera resultando em perlita fina com 285HB e bainita com 401HB respectivamente.

- A curva inferior produz a martêmpera resultando em martensita com 555HB.