



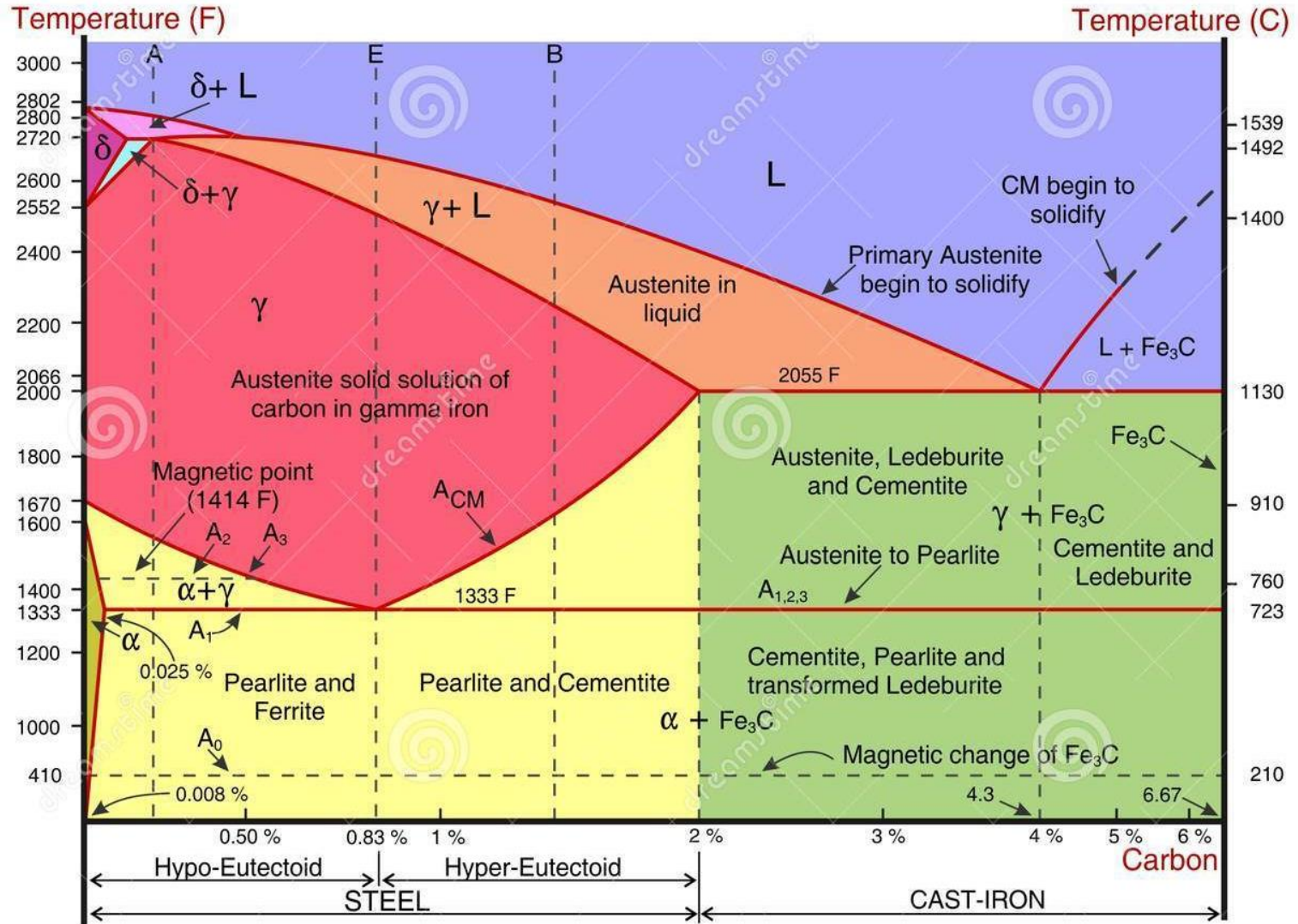
**SMM0193 – ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS  
MATERIAIS I**

**SISTEMA FERRO-CARBONO  
FERROS FUNDIDOS**

## **REFERÊNCIAS:**


- **Aços e Ligas Especiais**, André Luiz Vasconcelos da Costa e Silva e Paulo Roberto Mei, Edgard Blücher-Villares Metals, segunda edição, 2006.
- **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais**, William D. Callister Jr., LTC, segunda edição, 2006.
- **Princípios de Metalurgia Física**, Robert E. Reed-Hill, segunda edição, Guanabara Dois, 1982.
- **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**, Hubertus Colpaert, 4ª. Edição revisada e atualizada por André Luiz Vasconcelos da Costa e Silva, Editora Blücher – Villares Metals, 2008.
- **Aços, Microestrutura e Propriedades**, R.W.K Honeycombe, Fundação Calouste Gulbenkian, 1982.

# FERROS FUNDIDOS



**IRON-CARBON DIAGRAM**

**LEGEND**  
 $\delta$  - delta iron  
 $\gamma$  - austenite  
 $\alpha$  - ferrite  
L - liquid  
CM - cementite

- 
- 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;
  - Contém no mínimo 2% de carbono, mais silício (entre 1 e 3%) e enxofre, podendo ou não haver outros elementos de liga.
  - Sua composição os torna excelente para fundição;
  - A fabricação dos fofos é superior a de qualquer outro metal fundido (exceção os lingotes de aço).



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

- Elevada dureza e resistência ao desgaste
- Boa resistência à corrosão
- Baixo custo

## Desvantagens

- Grande fragilidade e baixa ductilidade
- Deformação plástica pequena na TA.
- Soldagem muito limitada

- O diagrama Fe-C apresenta dois eutéticos. provenientes de dois equilíbrios: estável e metaestável.
- O eutético estável é formado pela austenita e grafita.
- O eutético metaestável por austenita e cementita.
- Resfriamento rápido está relacionado ao o diagrama metaestável

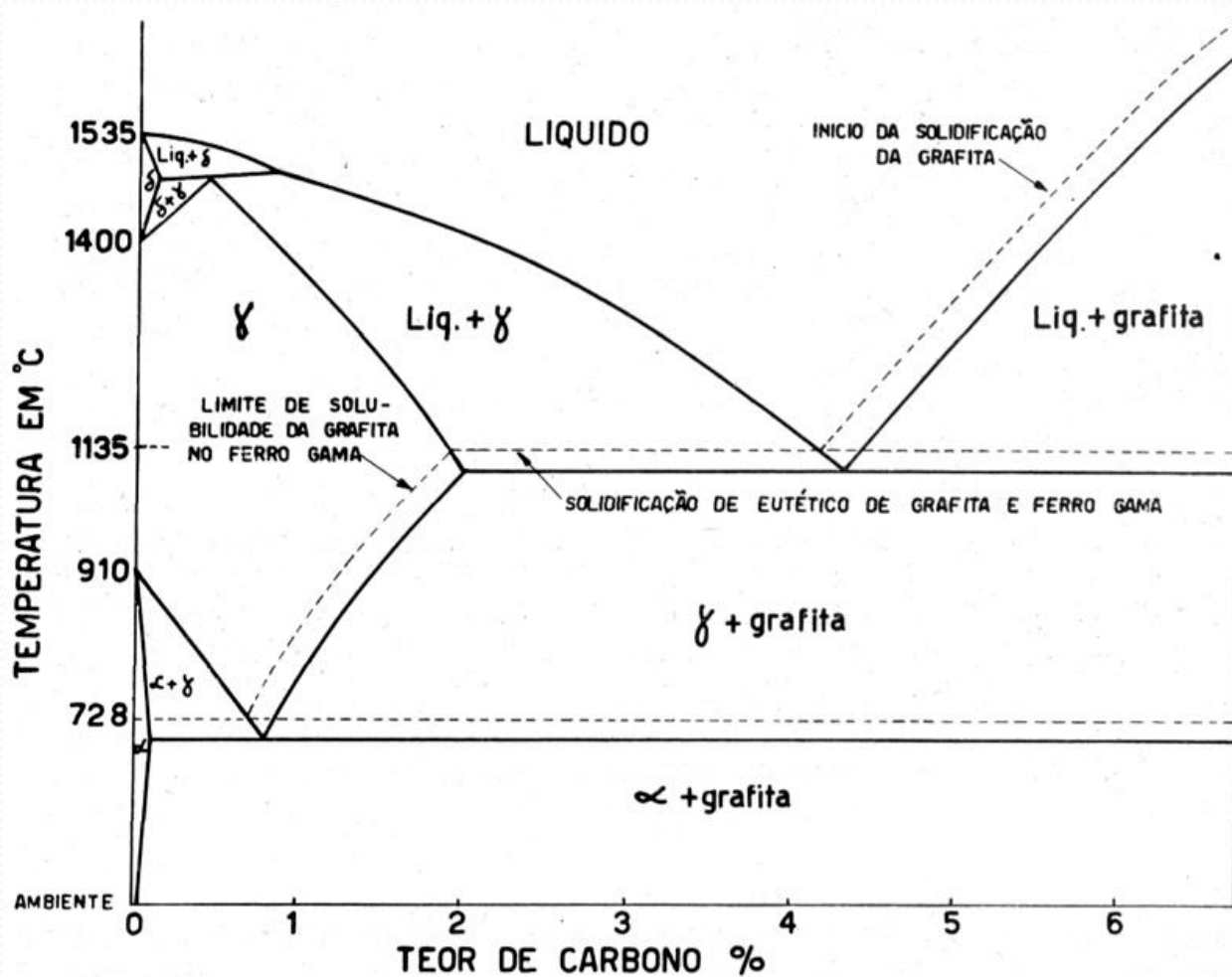


Fig. 521 — Diagrama de equilíbrio ferro-carbono simplificado mostrando em pontilhado o diagrama estável ferro-grafita.

# Ferros Fundidos - Classificação

- Os ferros fundidos apresentam uma extensa gama de resistências mecânicas e de durezas, sendo, na maioria dos casos, de fácil usinagem.
- Pela da adição de elementos de liga é possível se obter excelente resistência ao desgaste, à abrasão e à corrosão. 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** – Superfície de fratura branca
- **Cinzento** - Superfície de fratura cinza
- **Maleável** – um pouco mais dútil que os outros
- **Dúctil (nodular)** – o mais dútil



# Ferros Fundidos - composição química

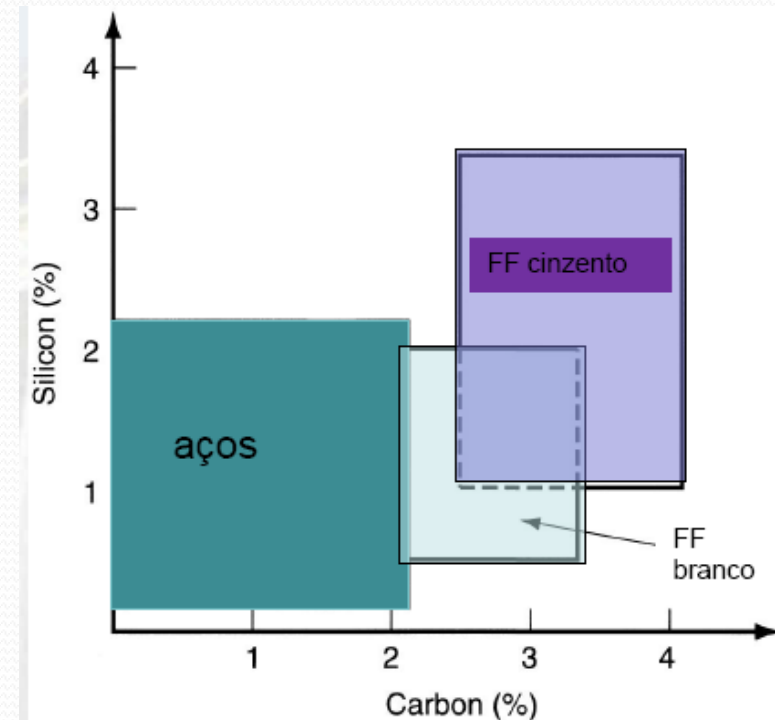
Aços carbono: Si 0,15 a 0,35

	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	0,5-1,8	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.
Nodular	3,0-4,0	1,8-2,8	0,10-1,0	0,03 máx.	0,10 máx.

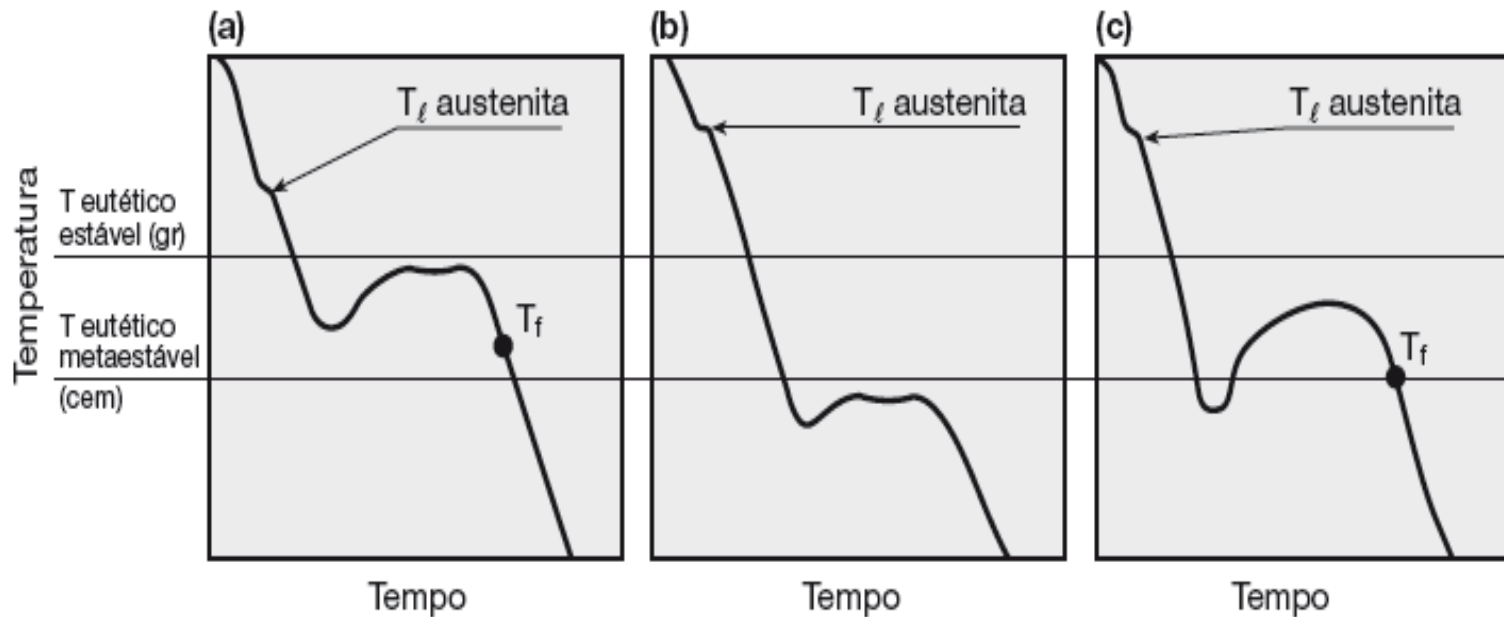
Mg ou Ce

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

Relação entre os teores de Carbono e Silício nas famílias de ferros fundidos.



# Ferros Fundidos - curva de resfriamento



**Figura 17.5**

Curvas de resfriamento (esquemáticas) de (a) ferro fundido cinzento, (b) ferro fundido branco e (c) ferro fundido mesclado. Além das temperaturas dos eutéticos estável e metaestável, estão indicados o início da solidificação da austenítica pró-eutética ( $T_{\ell}$ ) e a temperatura de final de solidificação ( $T_f$ ). Adaptado de [7]. (Ver também Figura 17.22).

# Ferro Fundido Branco

## MICROESTRUTURA

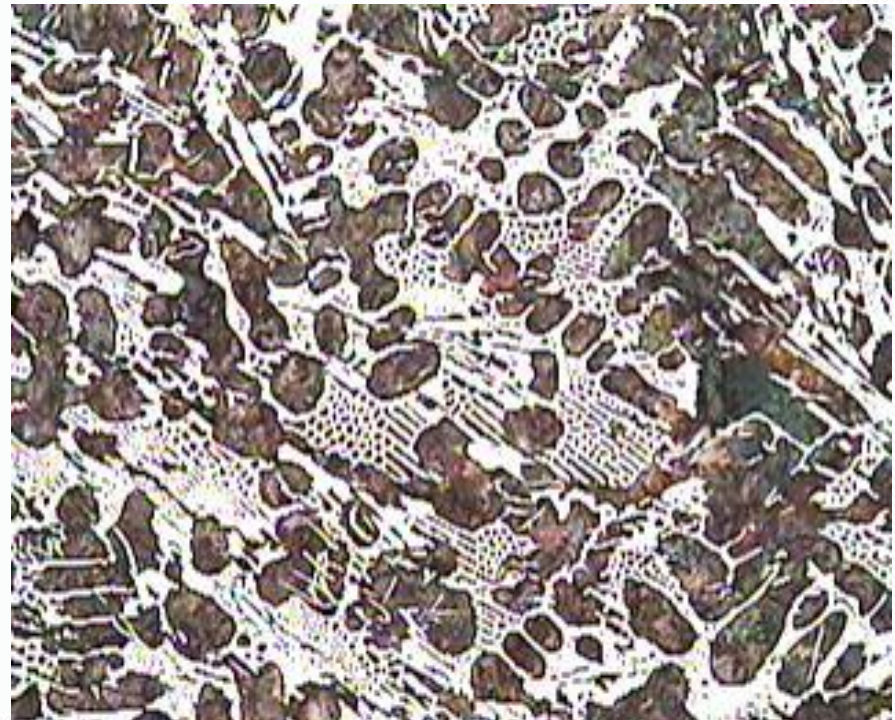
- $2,0 \leq \%C \leq 3,5$ ;  $0,5 \leq \%Si \leq 2,0$ ;  $0,5\%Mn$  (anti-grafitizante)
- Elevada velocidade de arrefecimento => Carb. solidifica sob a forma de cementite
- A elevada dureza e fragilidade da cementite caracterizam este FF
- Em peças de maior tamanho pode obter-se FF branco à superfície 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

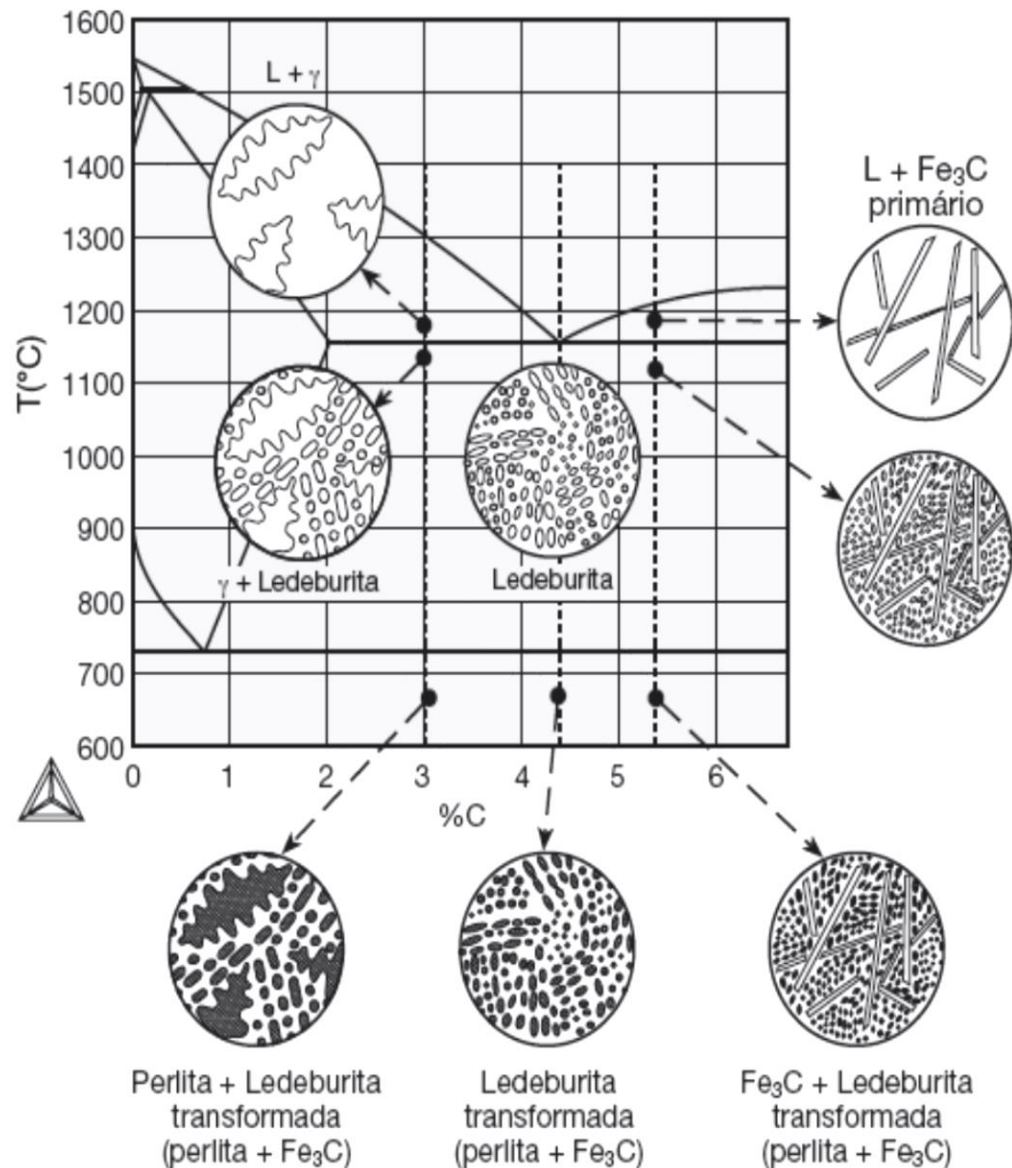
- Elevada resistência à compressão e à abrasão (cementite)
- É muito duro e frágil
- Não pode ser maquinado
- Soldadura impossível
- Baixo custo



# Ferro Fundido Branco

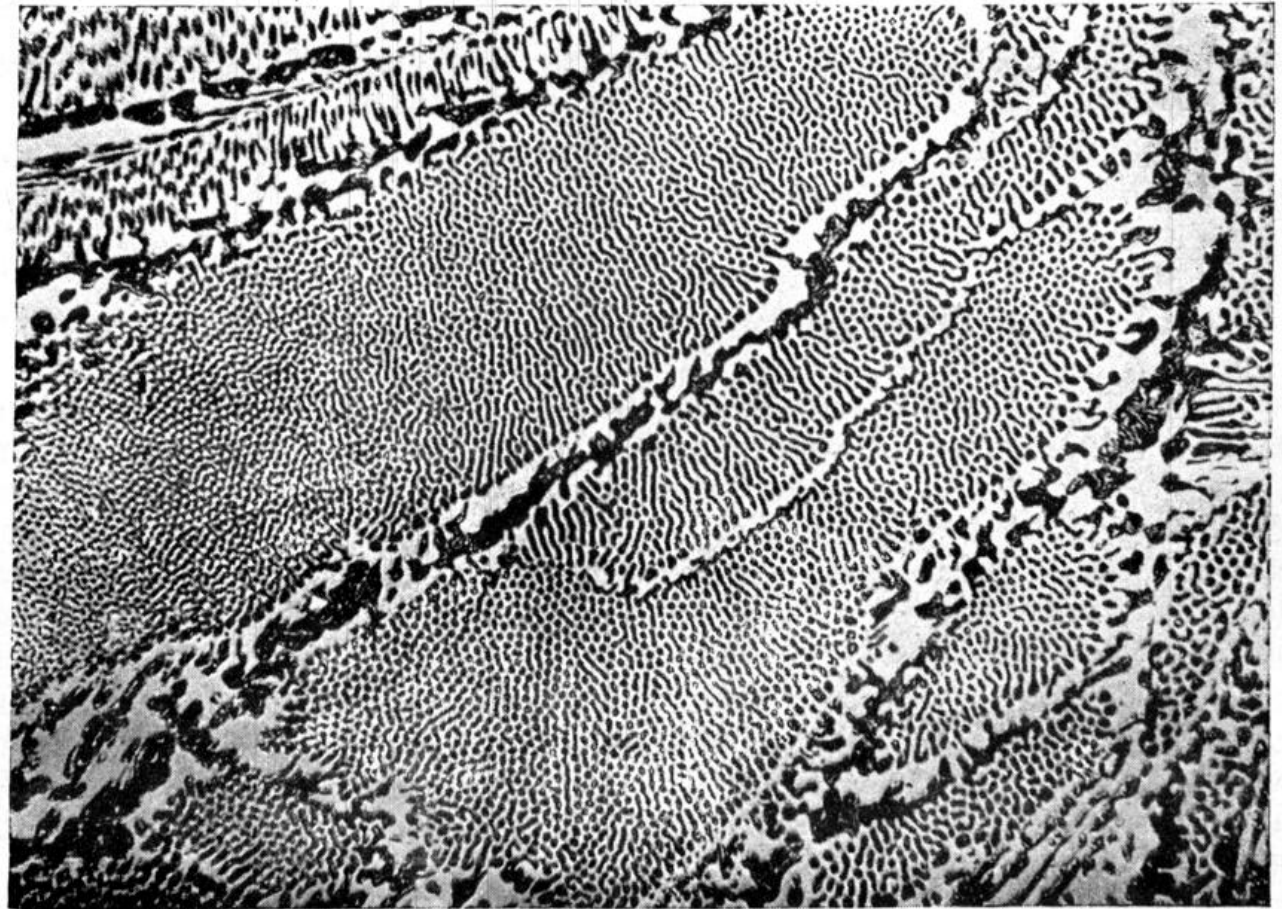
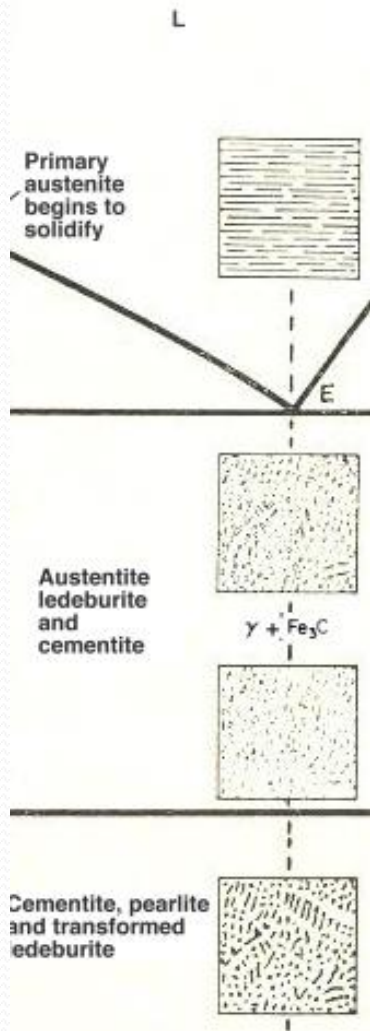
**Figura 17.9**

Diagrama ferro-carbono metaestável. A evolução microestrutural de ferro fundido branco: hipoeutético (3% C), eutético (4,3% C) e hipereutético (5,4% C) é apresentada de forma simplificada, neste sistema binário<sup>(4)</sup>. (Feros brancos hipereutéticos podem não solidificar com cementita pró-eutética).



$\gamma$  = Austenite  
 $\alpha$  = Ferrite  
CM = Cementite

# Ferro Fundido Branco eutético: 4,3%C

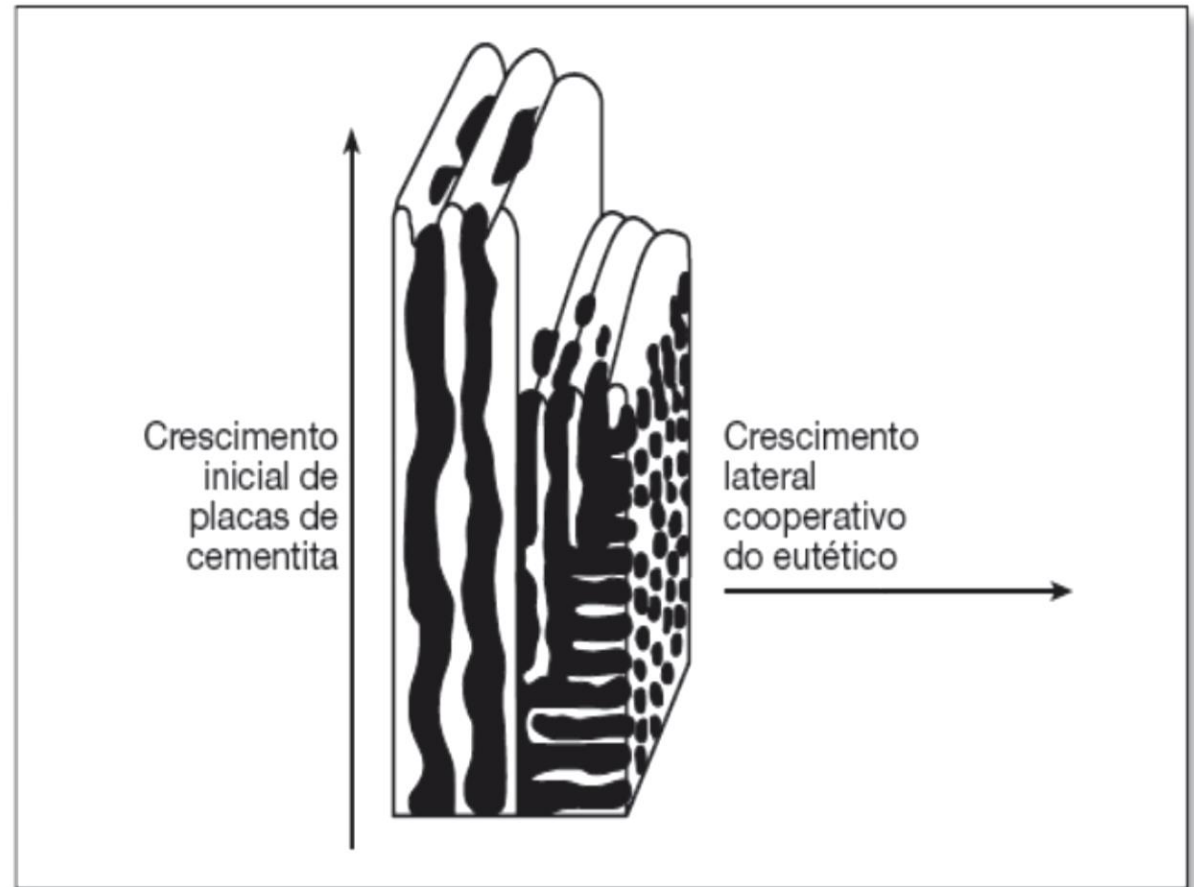


Abaixo de  $727^\circ\text{C}$ , a austenita transforma-se em perlita. Com isso a ledeburita será constituída de glóbulos de perlita sobre um fundo de cementita.

# FORMAÇÃO DA LEDEBURITA

**Figura 17.10**

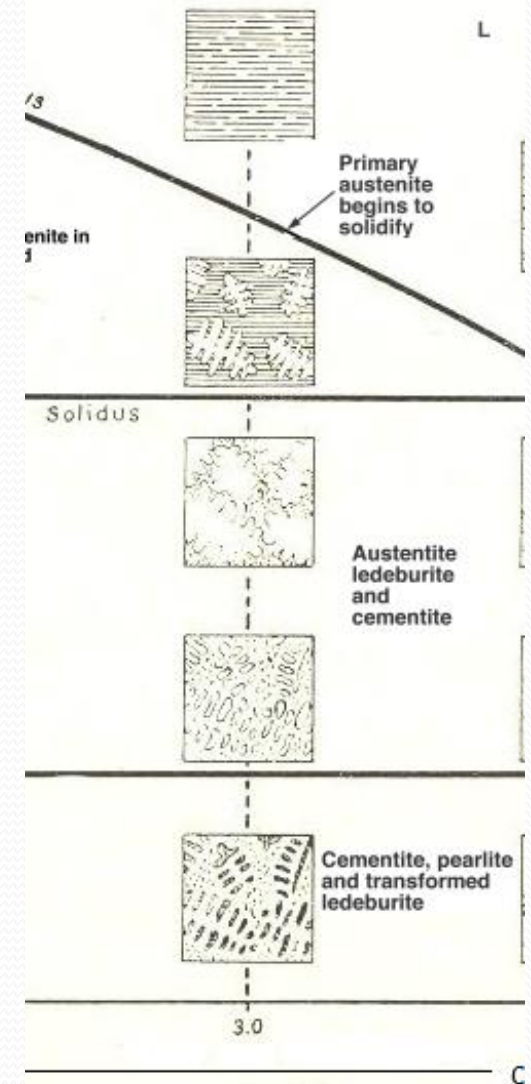
Modelo esquemático da formação da ledeburita, proposto por Hillert e Rao [12]. O crescimento inicial de placas de cementita (clara, no desenho) não ocorre de forma cooperativa com a austenita (escura, no desenho). A partir de um certo ponto estabelecem-se condições para o crescimento cooperativo, lateral, na forma de bastões de austenita em placas de cementita. A cementita mantém orientação cristalográfica preferencial de crescimento.



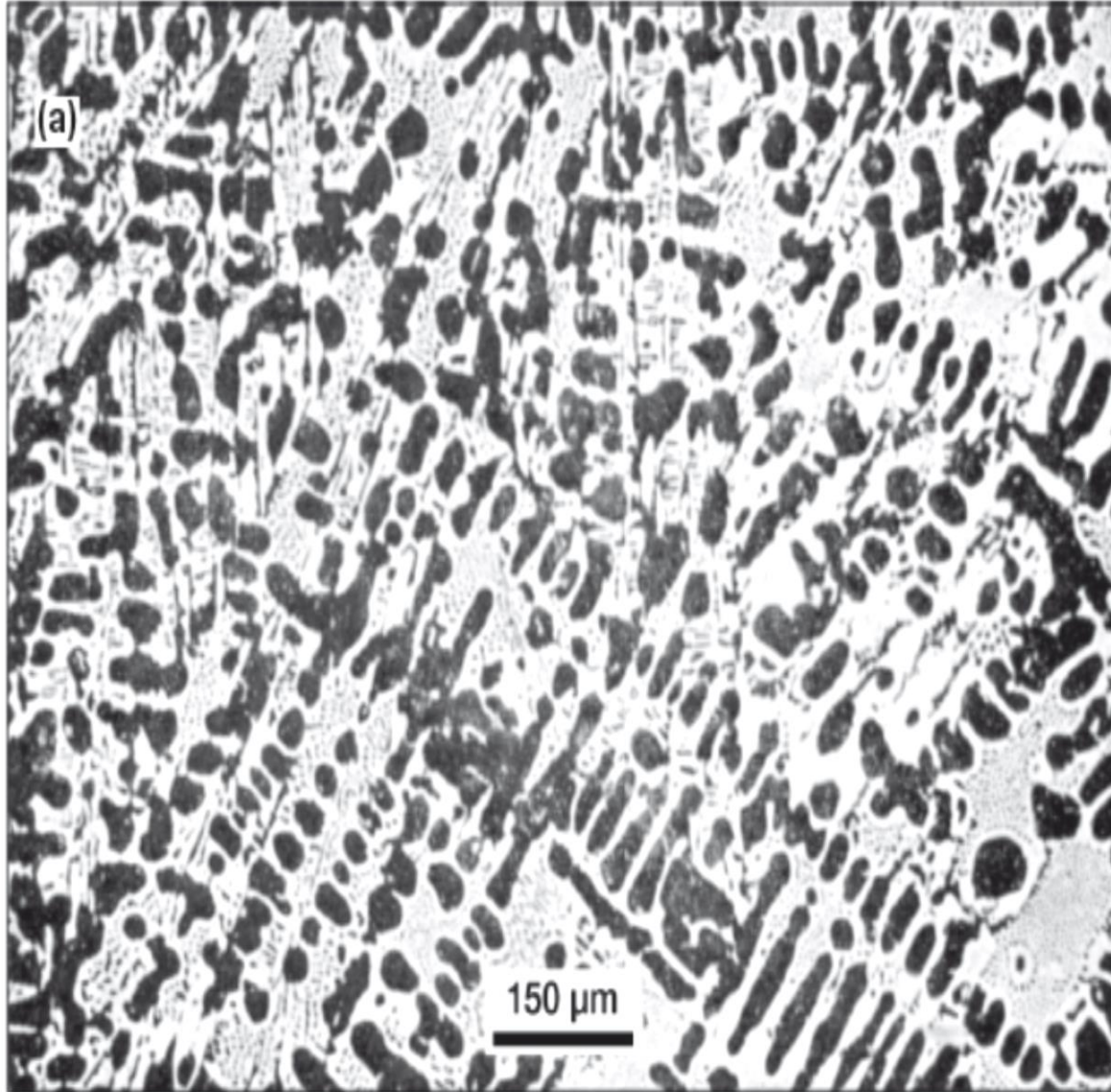
**O líquido se enriquece de carbono, atinge a composição do eutético. A nucleação da placa de cementita ocorre entre as dendritas de austenita, depois, ambas crescem cooperativamente em forma de colunas: ledeburita.**

# 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 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.
- A  $\gamma$  continua a perder C, formando  $\text{Fe}_3\text{C}$  e abaixo de 727°C a austenita (0,8 %C) isolada se transforma em perlita e à temperatura ambiente a microestrutura será, composta de ***perlita e  $\text{Fe}_3\text{C}$  envolvidos por ledeburita.***



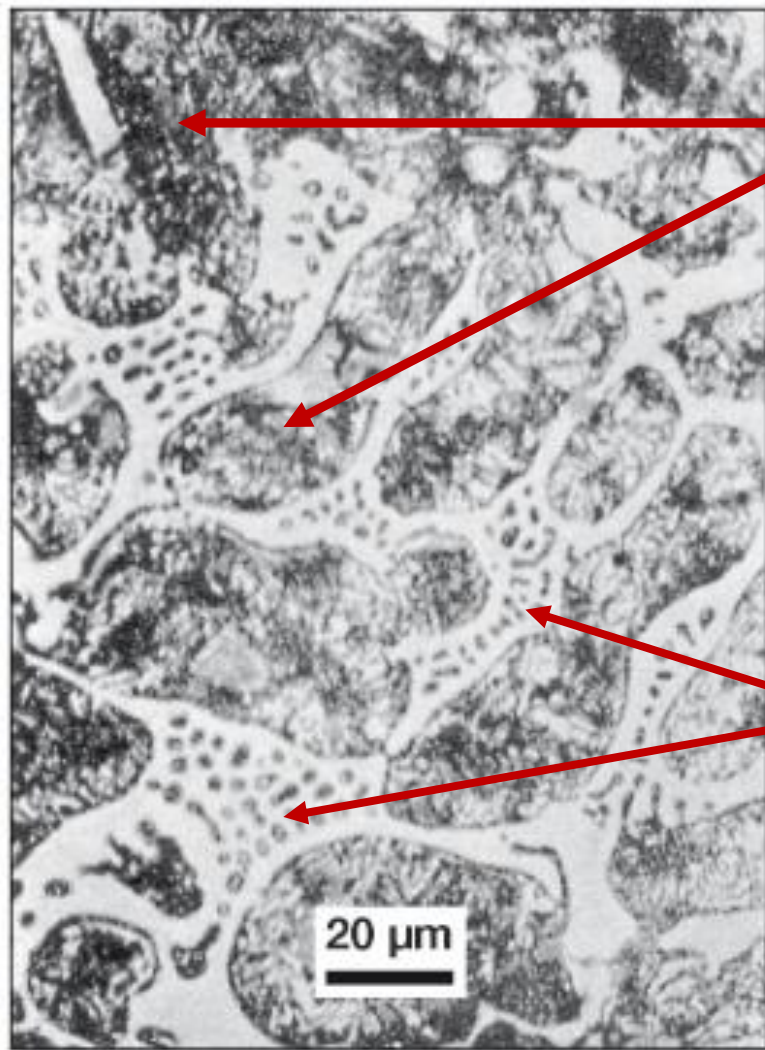
## Ferro fundido branco hipoeutético



**Figura 17.11(a)**

Ferro fundido branco hipoeutético. As dendritas de austenita se transformaram em perlita (escura). A ledeburita transformada, entre as dendritas, é composta por cementita (branca) e perlita (escura, pequenos "pontos"). Ataque: Nital.





**Dendritas de austenita transformadas em perlita.**

**Ledeburita: cementita(clara) e pontos de perlita**

**Figura 17.12**

Aspecto com maior aumento da microestrutura da Figura 17.11(b). Ledeburita transformada entre as dendritas de austenita transformada em perlita. Ataque: Picral.

## Ferro fundido branco hipoeutético

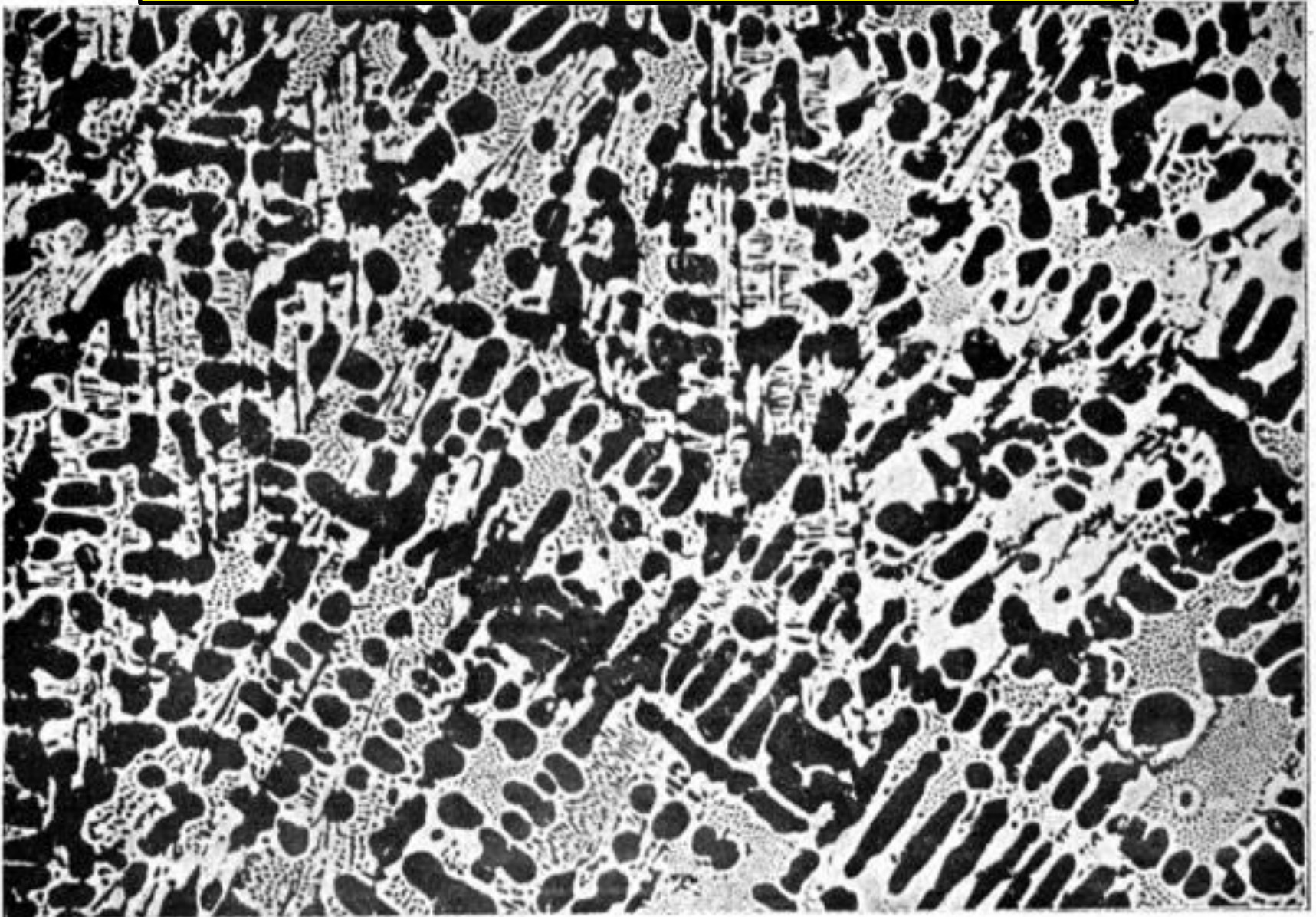
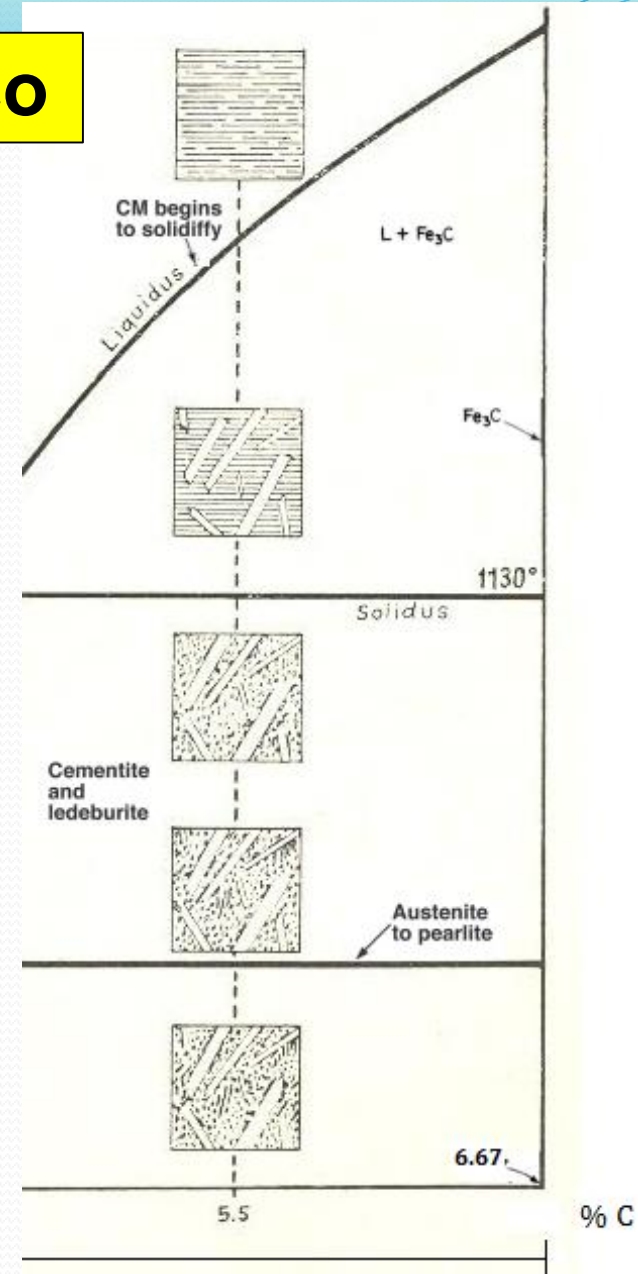


Fig. 523 — Ferro fundido branco hipoeutético. Dendritas de perlita, áreas pontilhadas de ledeburita, áreas brancas de cementita. Ataque: nítrico. 100 x.

# 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  $1130^{\circ}\text{C}$  tem-se cristais alongados de cementita e líquido de composição eutética
- Abaixo de  $1130^{\circ}\text{C}$  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***



## Ferro fundido branco hipereutético

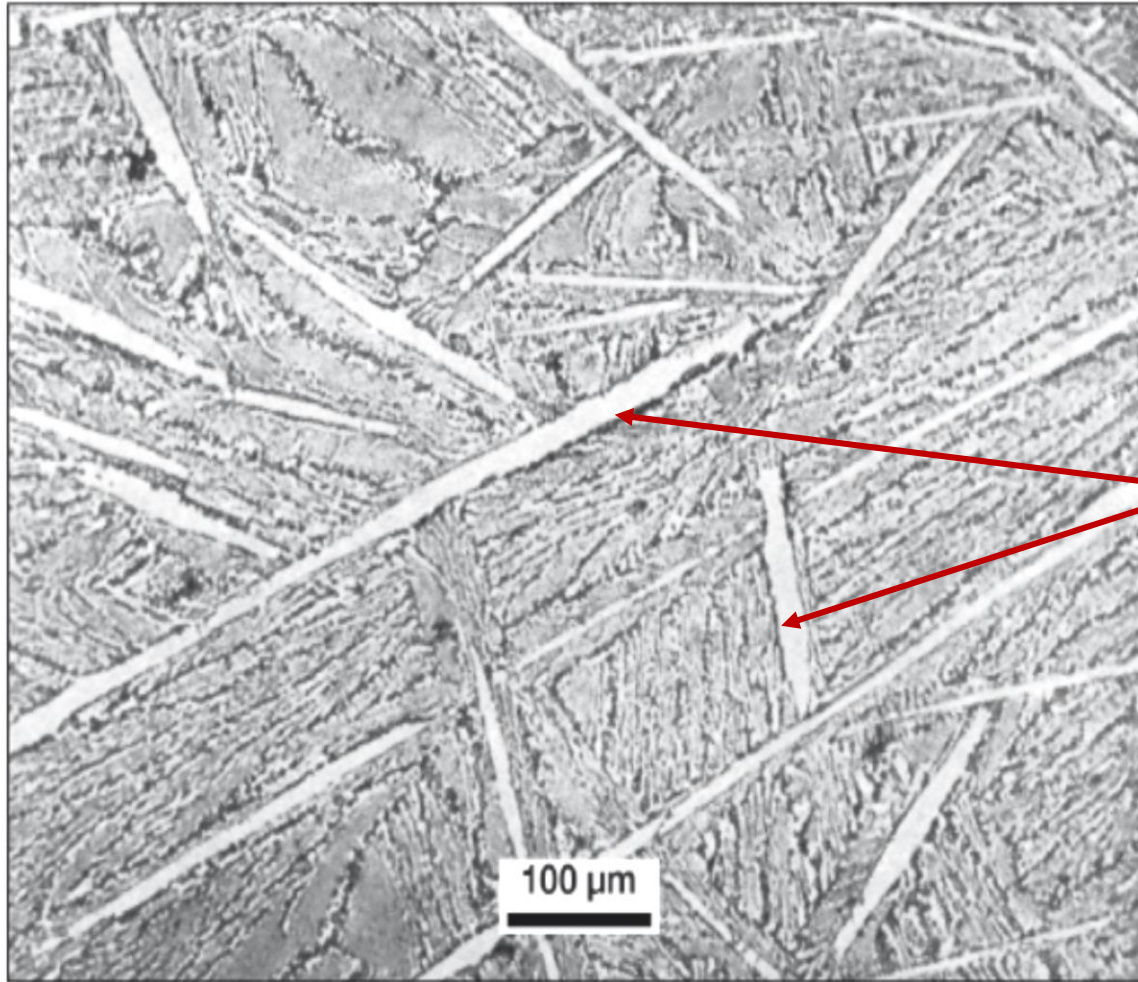


Figura 17.15

Ferro fundido branco hipereutético. Longos cristais de cementita em uma matriz de ledeburita transformada. Ataque: Picral.

**Cementita pró-eutética em placas**

# 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**

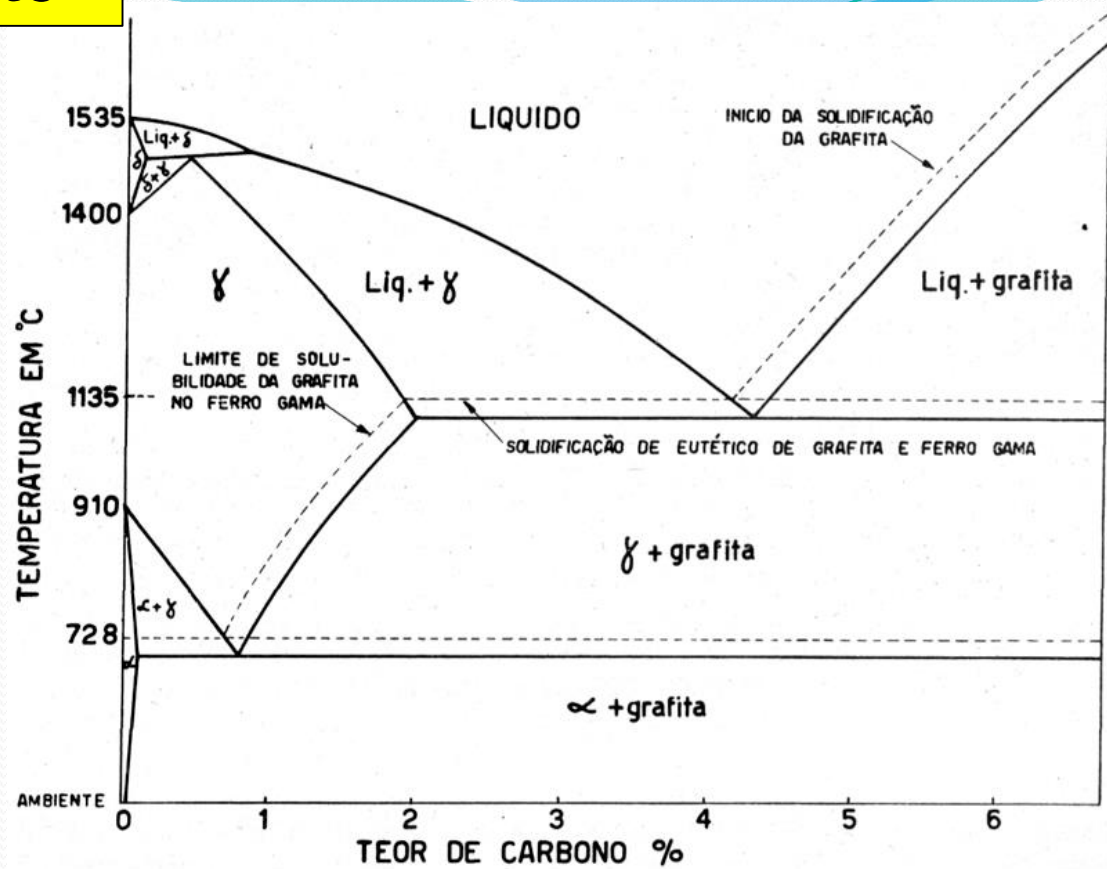
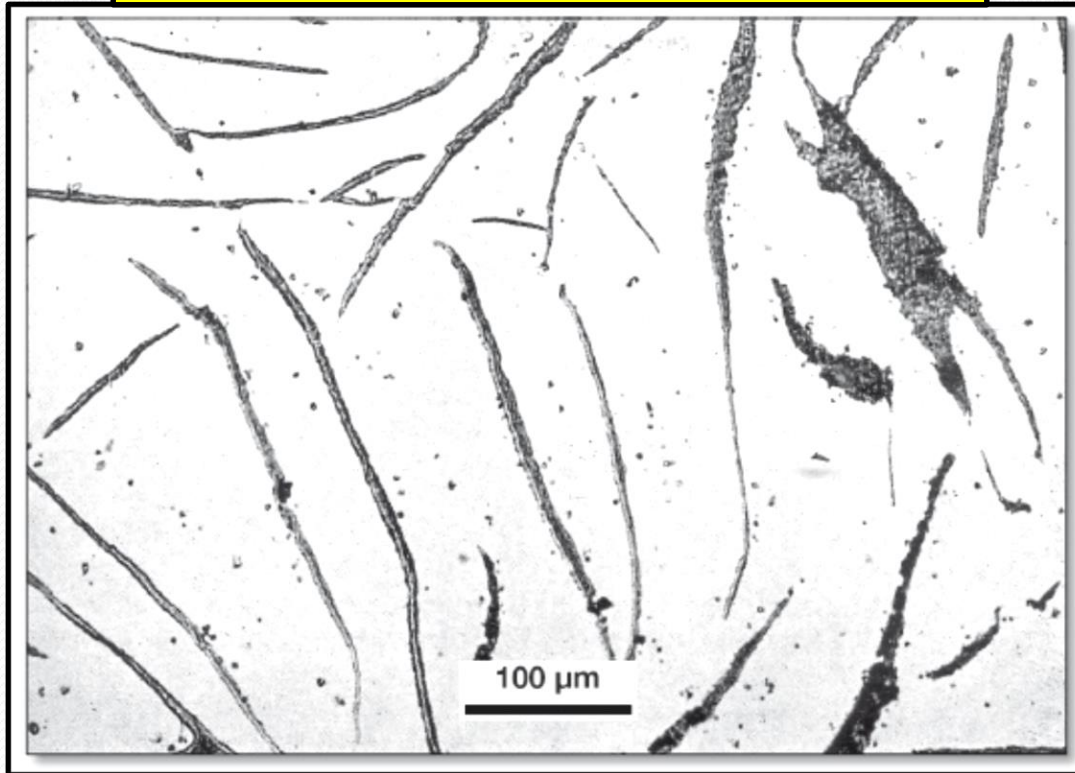


Fig. 521 — Diagrama de equilíbrio ferro-carbono simplificado mostrando em pontilhado o diagrama estável ferro-grafita.

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

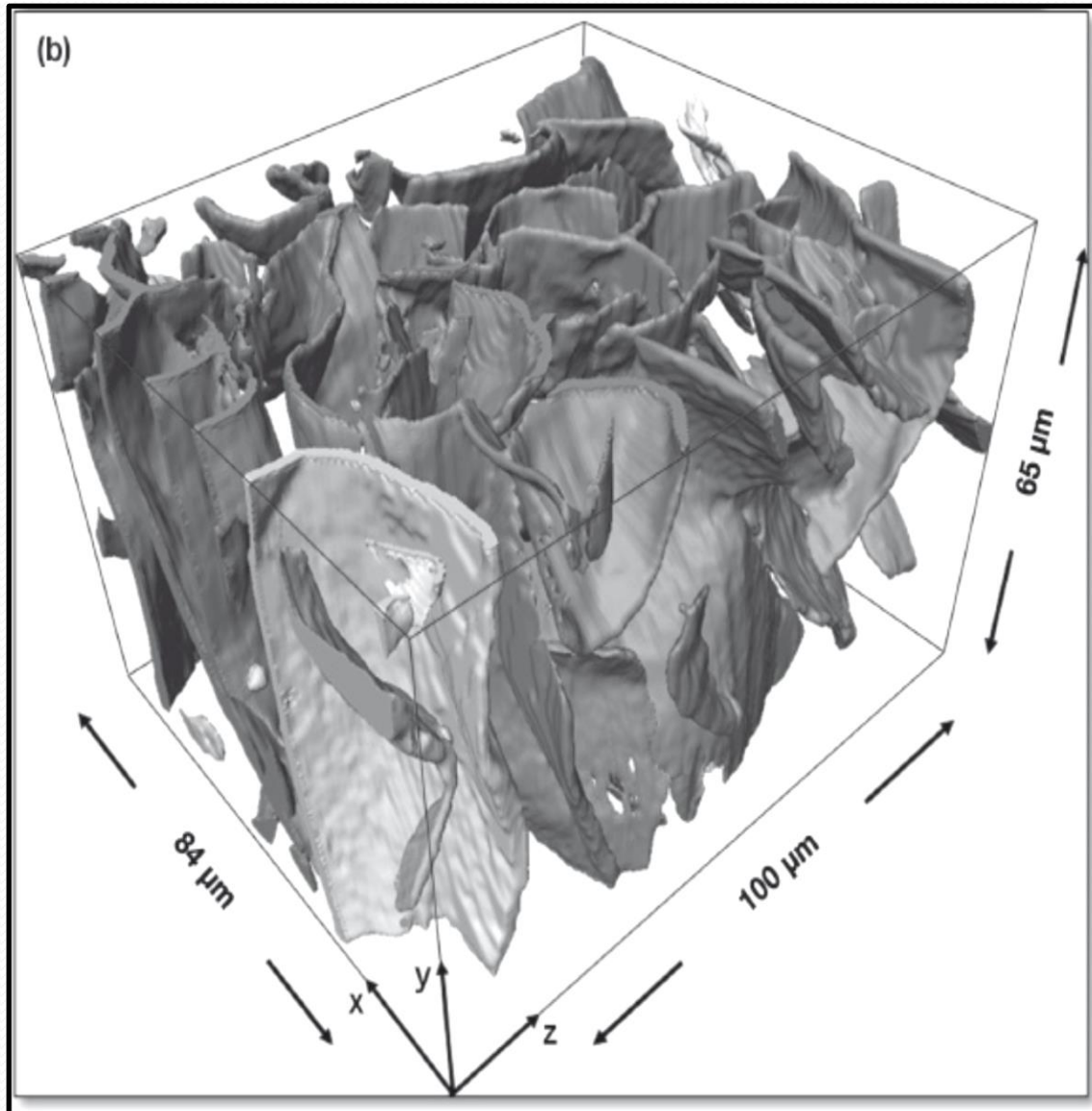
# FERROS FUNDIDOS

## Ferro fundido cinzento



Resfriamento lento: veios de grafita (grafitização) e ferrita

# FERRO FUNDIDO CINZENTO

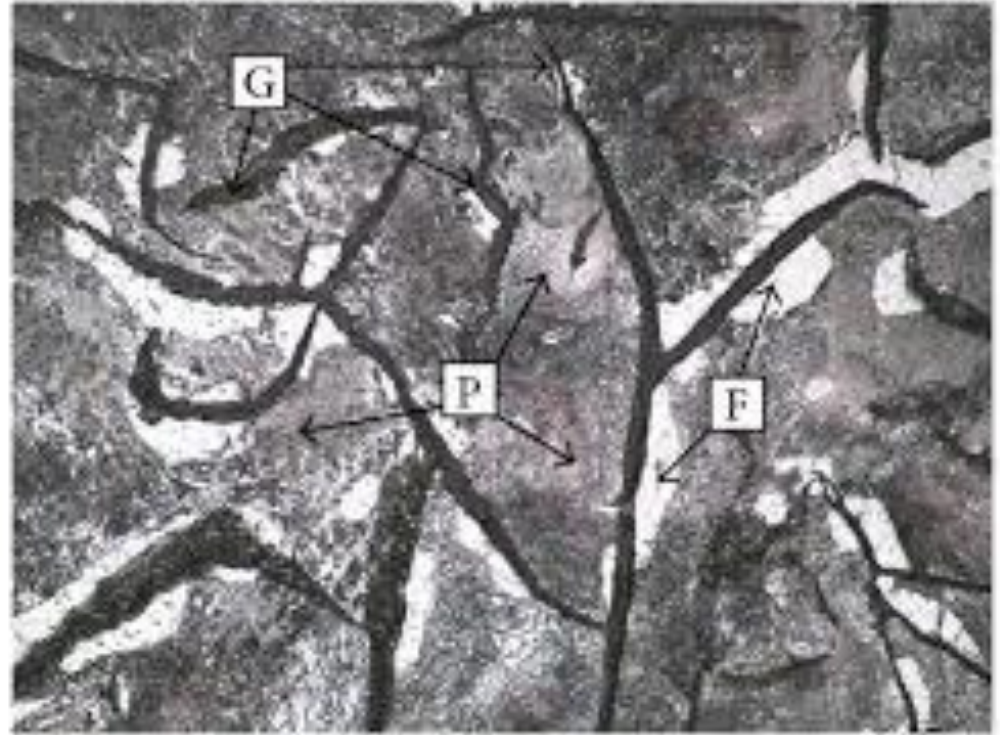


**Figura 17.23(b)**  
Reconstrução tridimensional de grafita lamelar em ferro fundido cinzento. Cortes produzidos por FIB e imagens obtidas por MEV. Cortesia A. Velichko e F. Mücklich, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Alemanha.



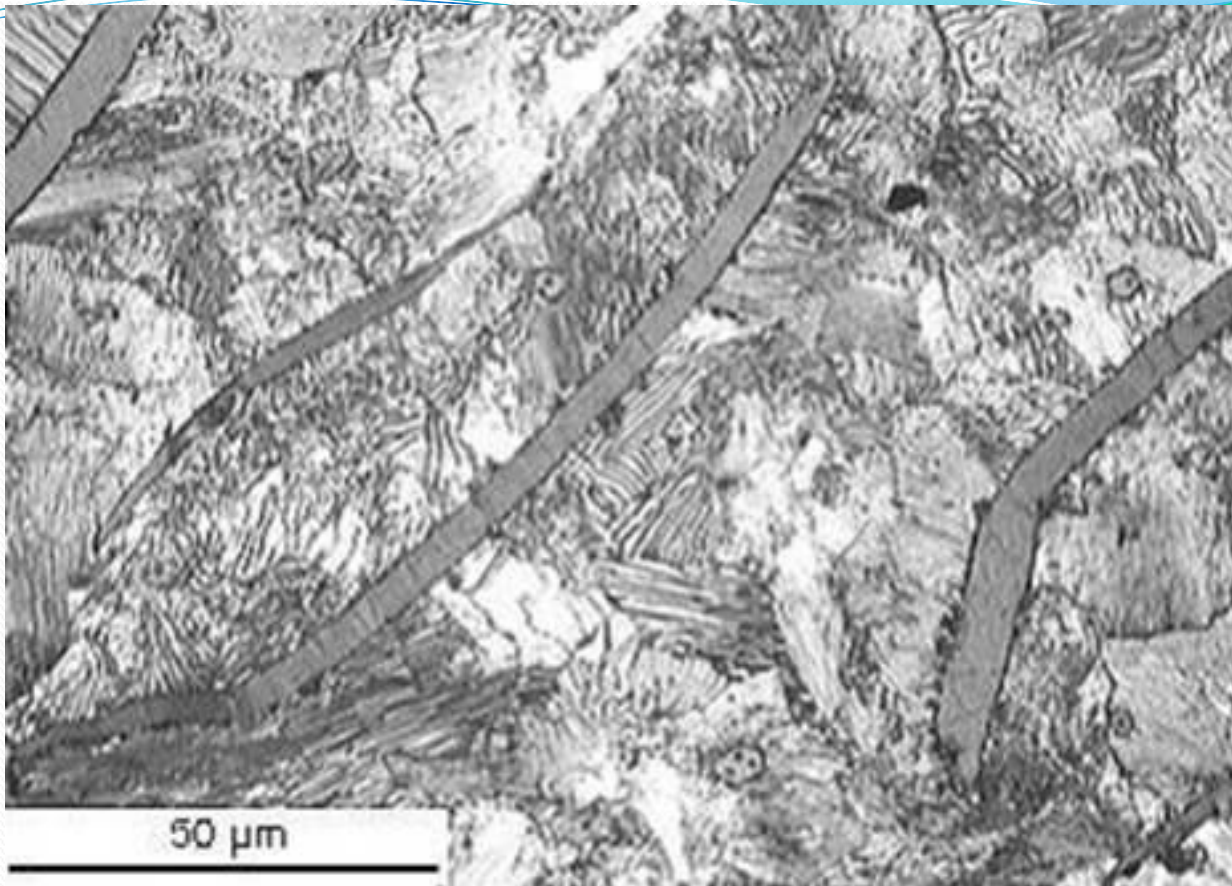
# Ferro Fundido Cinzento Hipoeutético

- 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. A austenita adjacente à grafita, empobrecida de carbono se transforma em ferrita.



- 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**

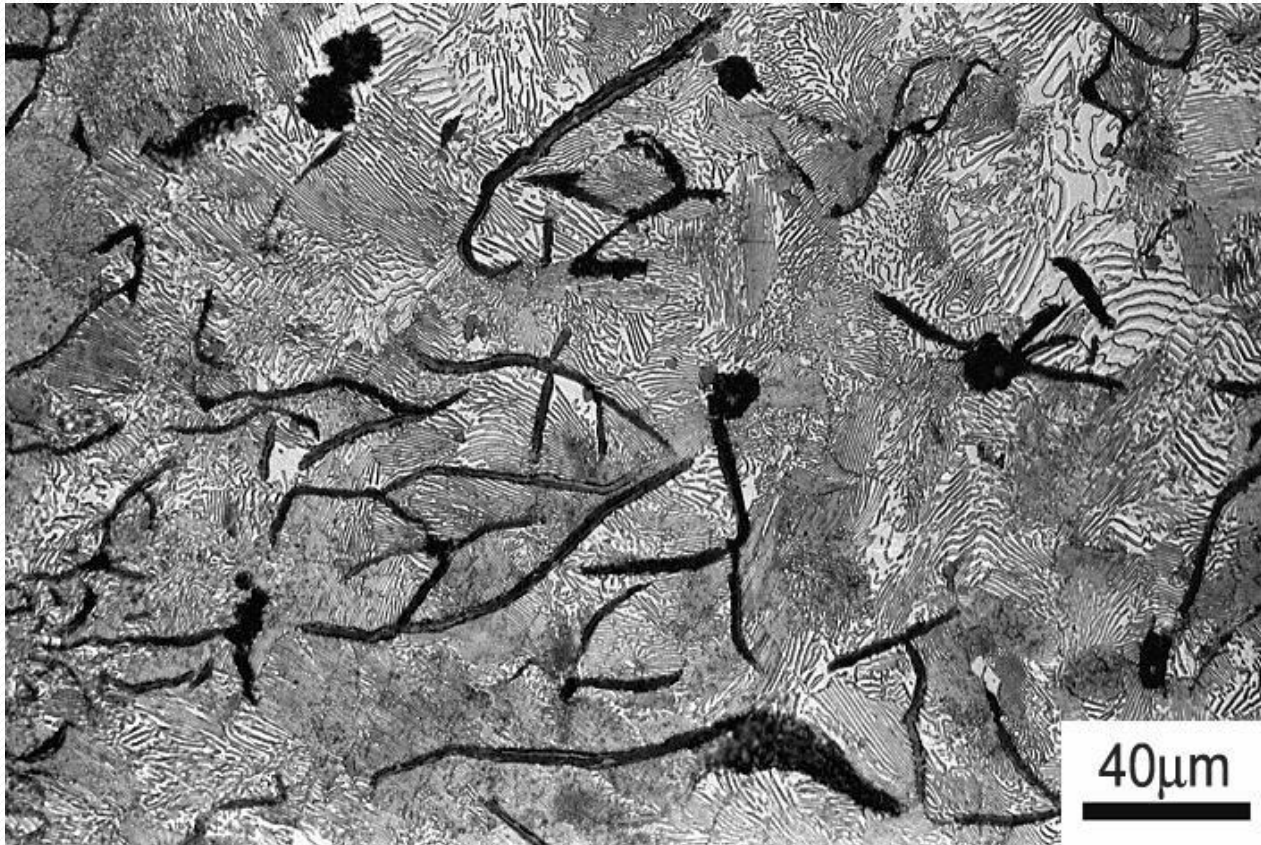
## Ferro Fundido Cinzento Eutético



- 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

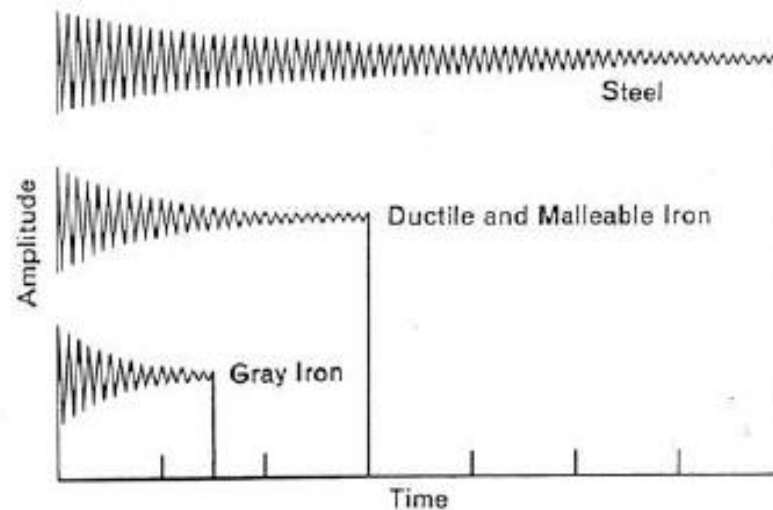
# Ferro Fundido Cinzento Hiperutético

- 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 da grafita da transformação eutética por possuir lamelas mais grossas e retilíneas



## FF cinzento

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



## Classificação dos FoFos

As lamelas de grafita podem ser grossas ou finas , diferenciando-se também quanto à forma e tamanho. Essas alterações originam-se de variáveis do processo de solidificação do eutético, como velocidade de resfriamento e outras como a composição química. Velocidades altas produzem veios finos e velocidades baixas, veios grossos de grafita.

Existem normas que classificam os FoFos conforme a forma da grafita e propriedades mecânicas, como a ASTM A 247.

# FERROS FUNDIDOS

## ASTM A 247

Type A



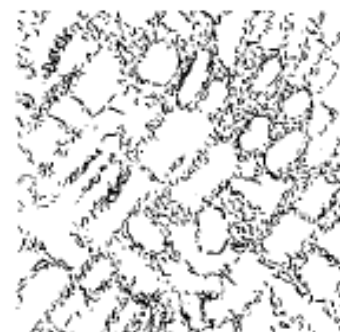
Type B



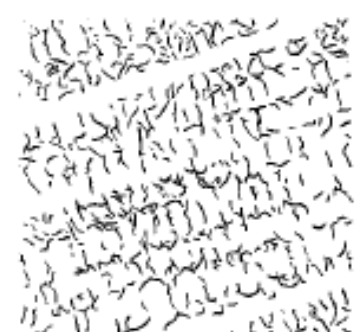
Type C



Type D



Type E

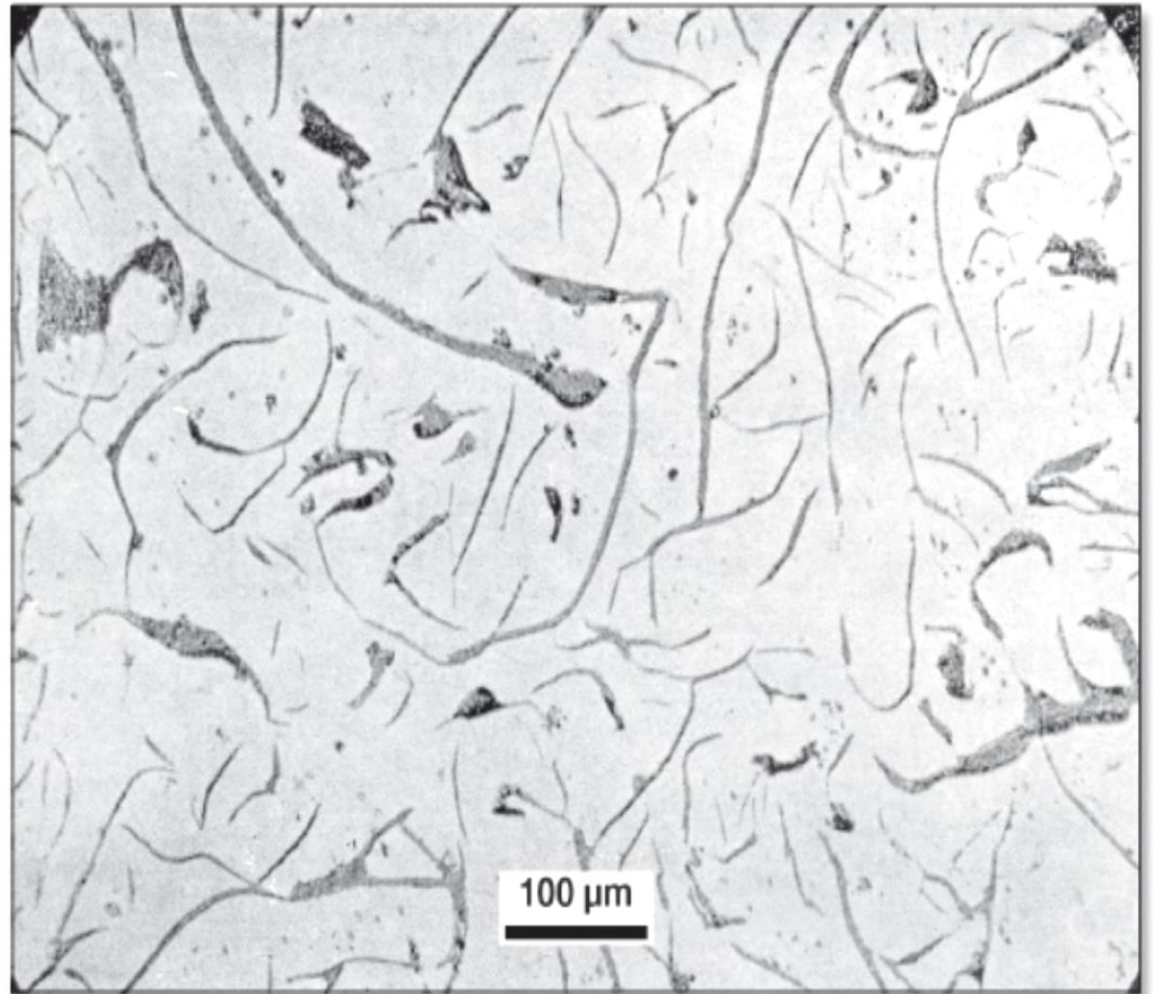


ASTM A 48 class	Resistência à tração		Resistência à torção		Resistência à compressão		Limite de fadiga em dobramento		dureza (HB)
	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
20	152	22	179	26	572	83	69	10	156
25	179	26	220	32	669	97	79	11.5	174
30	214	31	276	40	752	109	97	14	210
35	252	36.5	334	48.5	855	124	110	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

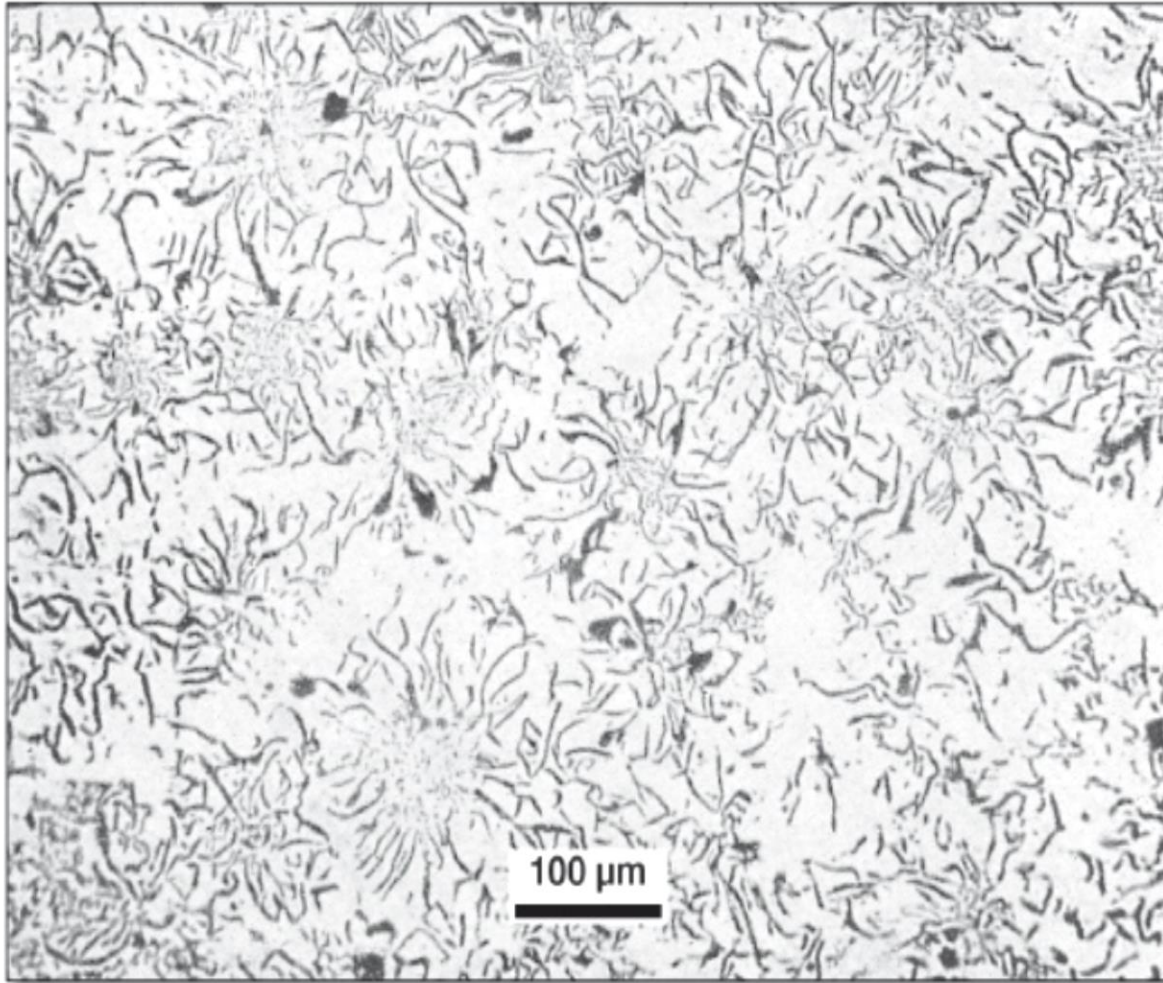
## ASTM A 247 – tipo A-melhores propriedades mecânicas

Figura 17.24(b)

Ferro fundido cinzento, grafita tipo A.  
Sem ataque.



## ASTM A 247 – tipo B

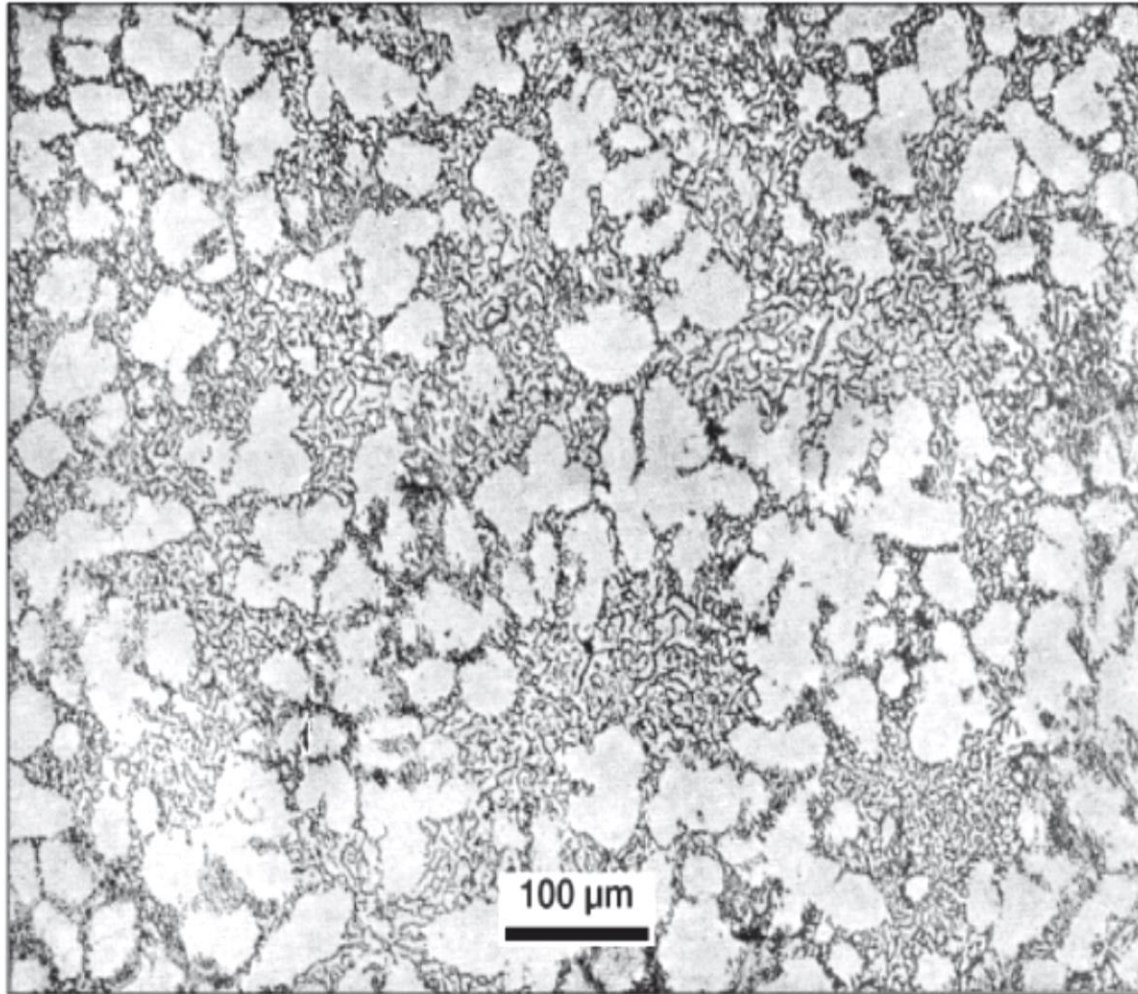


**Figura 17.25(b)**

Ferro fundido cinzento, grafita tipo B.  
Sem ataque.



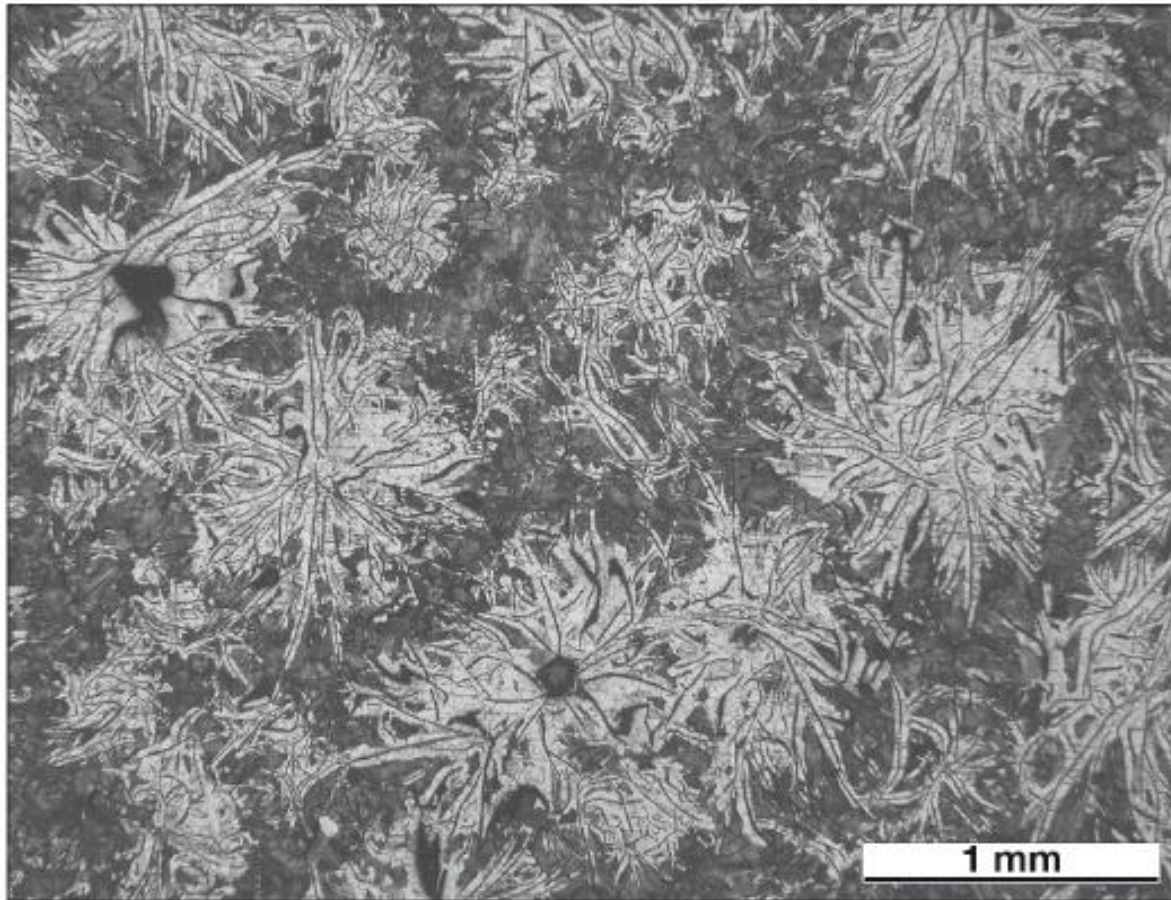
## ASTM A 247 – tipo D



**Figura 17.28(b)**

Ferro fundido cinzento, grafita tipo D.  
Sem ataque.

## Ferro Fundido Cinzento com Grafita lamelar



**Figura 17.37**

Ferro fundido cinzento. Grafita lamelar. Ferrita e perlita. Observam-se as colônias eutéticas esquematizadas por Hillert apresentadas na Figura 17.32 (b). Cortesia J. Sertucha, Azterlan, Centro de Investigación Metalúrgica, Durango, Bizkaia, Espanha.

# Ferro Fundido Nodular

## MICROESTRUTURA

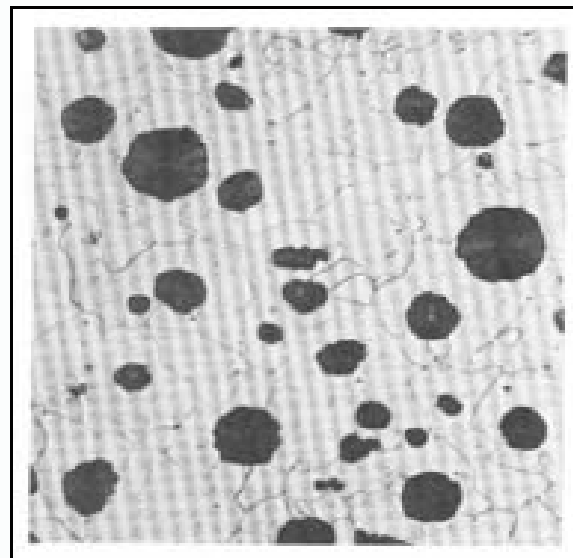
- $3,5 \leq \%C \leq 4,0$ ;  $1,8 \leq \%Si \leq 3,0$
- Pequenas adições de Mg
- Em vez de flocos formam-se nódulos
- A matriz é ferrítica (veloc. baixa) ou perlítica (veloc. moderada)
- Grafite em nódulos origina maior resistência, ductilidade e tenacidade

## 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

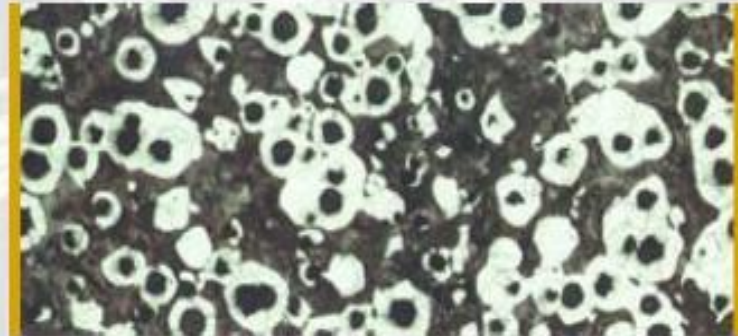
- Microestruturas:

GN + ferrita

GN + perlita

GN + ferrita/perlit →

GN + austenita/ferrita (ADI)



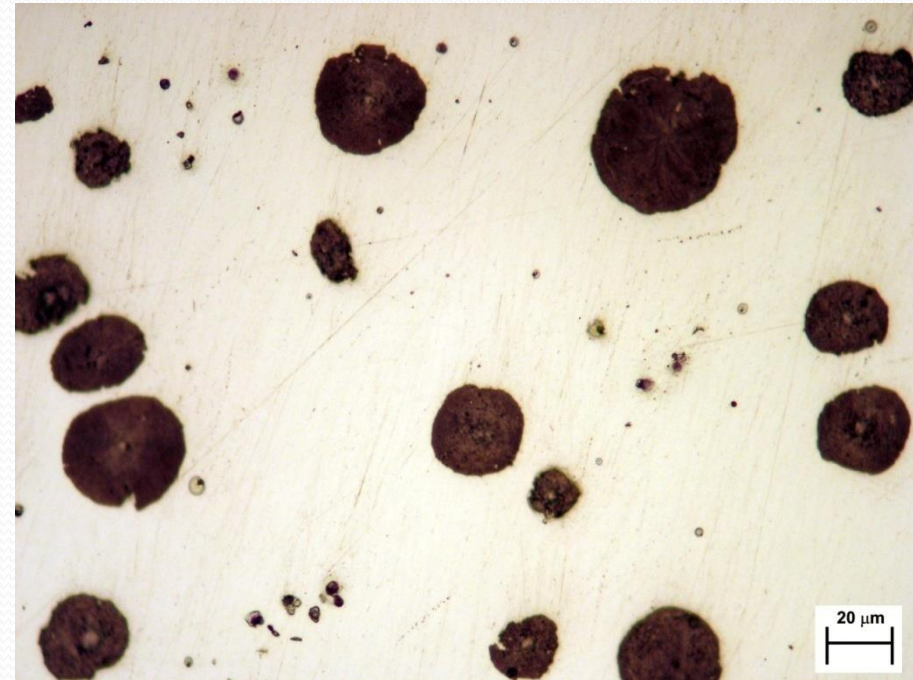
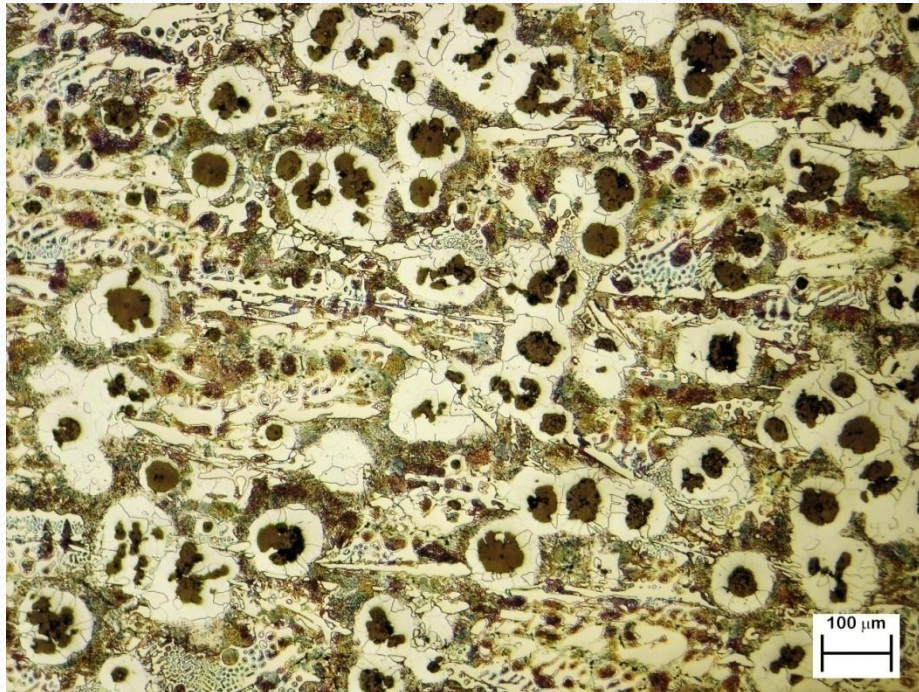
- Algumas aplicações: tubos centrifugados para saneamento válvulas para vapor e produtos químicos, cilindros para papel, virabrequins, engrenagens, etc.



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 cério** antes da fundição

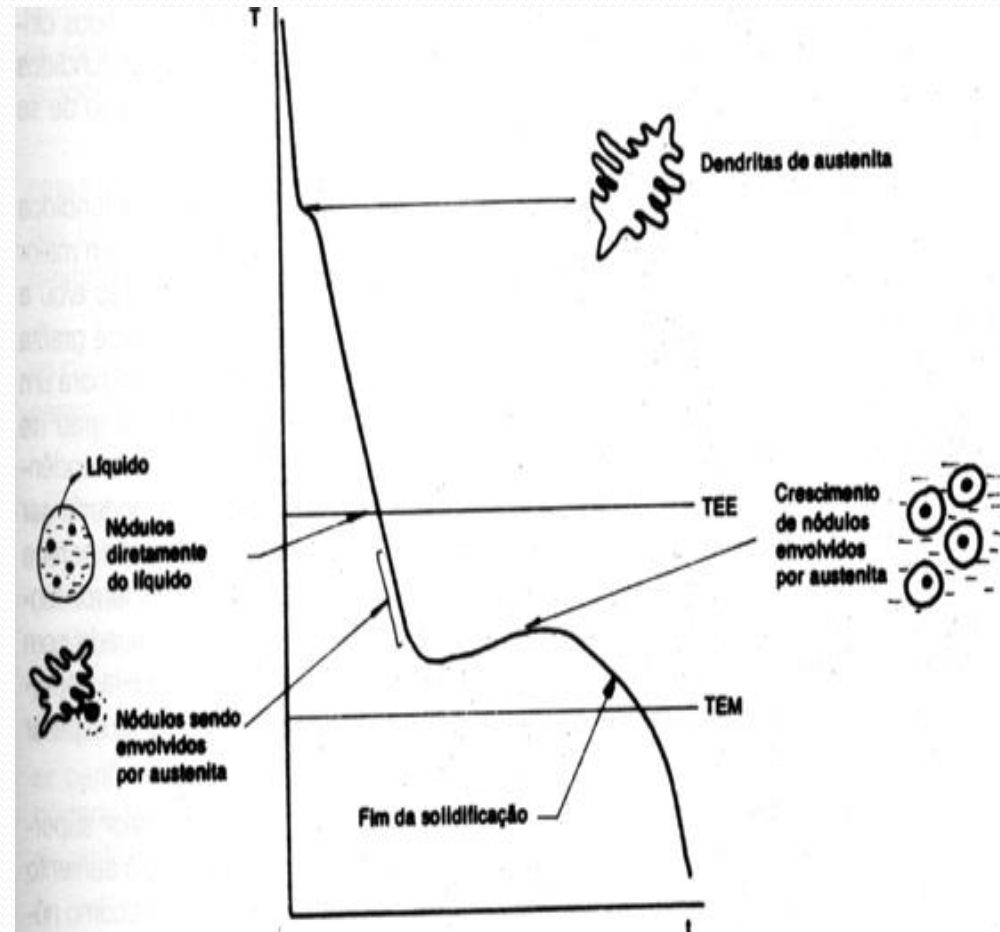
Impurezas, tais como o “P” e o “S”, dentre outras, devem ser mantidas em níveis muito baixos, uma vez que interferem com a formação dos nódulos de grafita nos ferros fundidos dúcteis, os quais formam-se durante a solidificação.



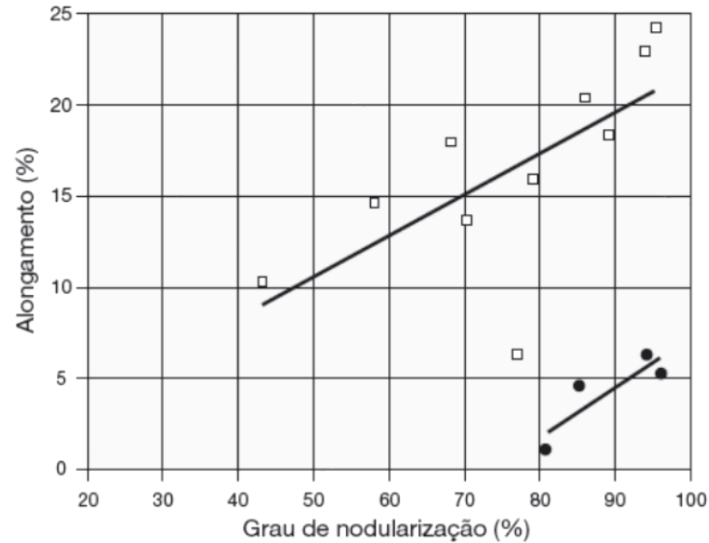
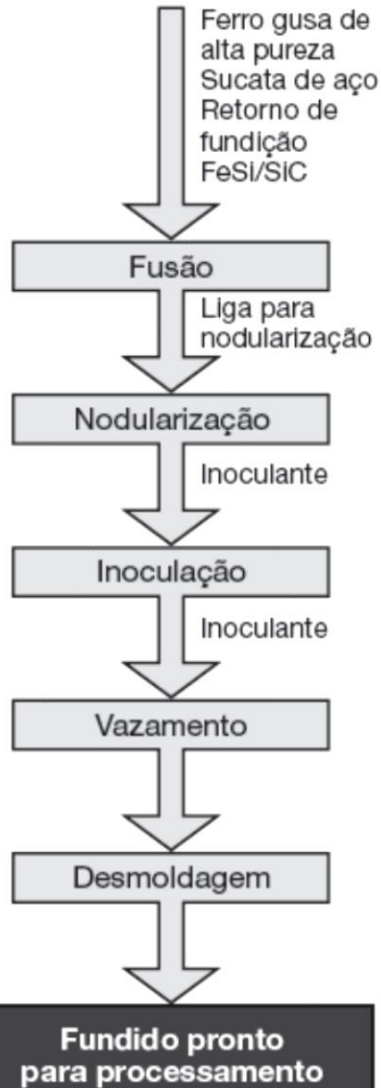
# Ferros Fundidos Nodulares – Sequência de solidificação

✓ 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 pela 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.



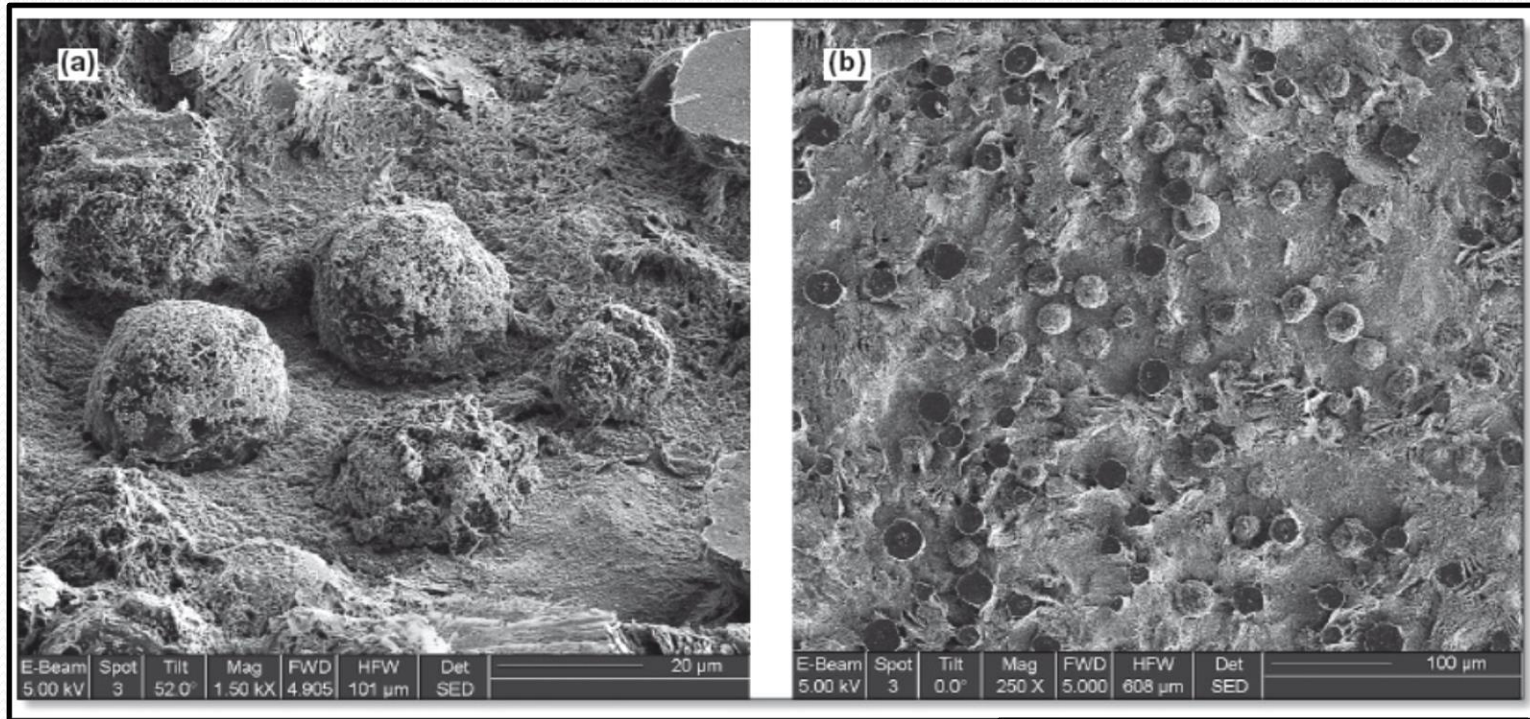
# FERRO FUNDIDO NODULAR – FABRICAÇÃO EM FORNO CUBILÔ A PARTIR DO FERRO GUSA



**Figura 17.77**

Efeito do grau de nodularização (medido por metalografia quantitativa) sobre o alongamento medido no ensaio de tração para dois tipos de ferro fundido nodular. Adaptado de [38].

# FERROS FUNDIDOS

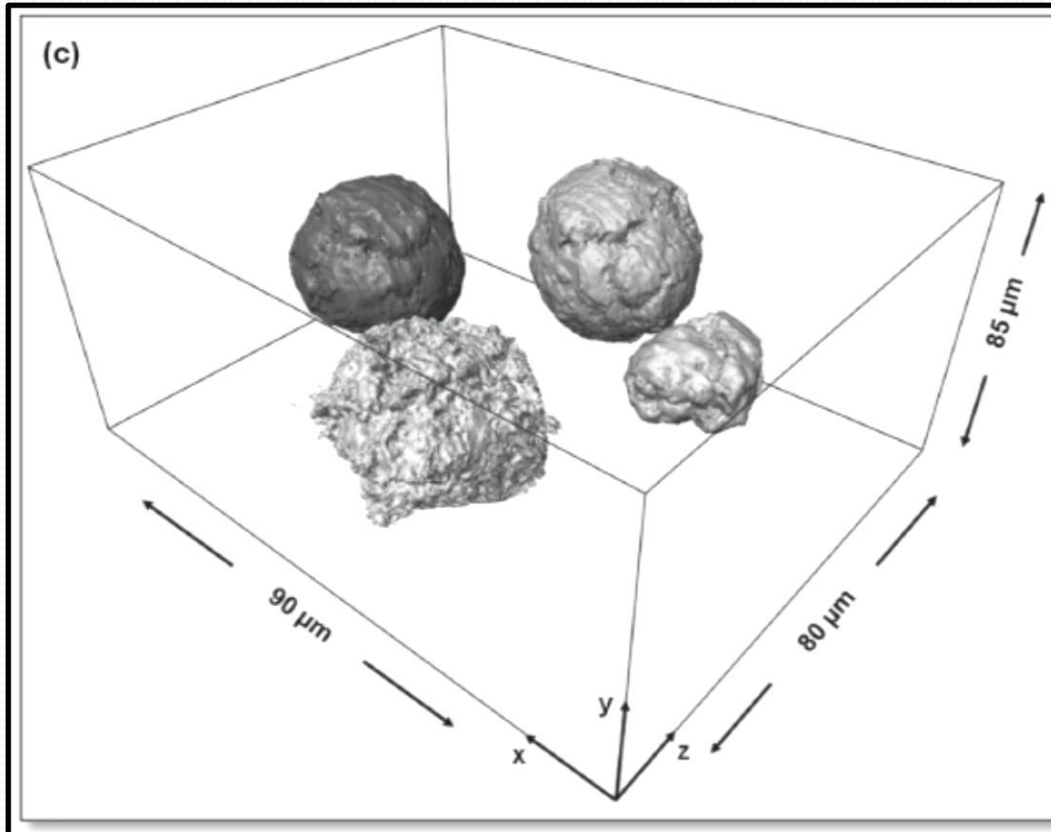


**Figura 17.78(a) e (b)**

Aspecto da grafita nodular em ferro fundido submetido a ataque químico profundo. Alguns nódulos foram cortados na metalografia original, antes do ataque. MEV, ES. Cortesia A. Velichko e F. Mücklich, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Alemanha.



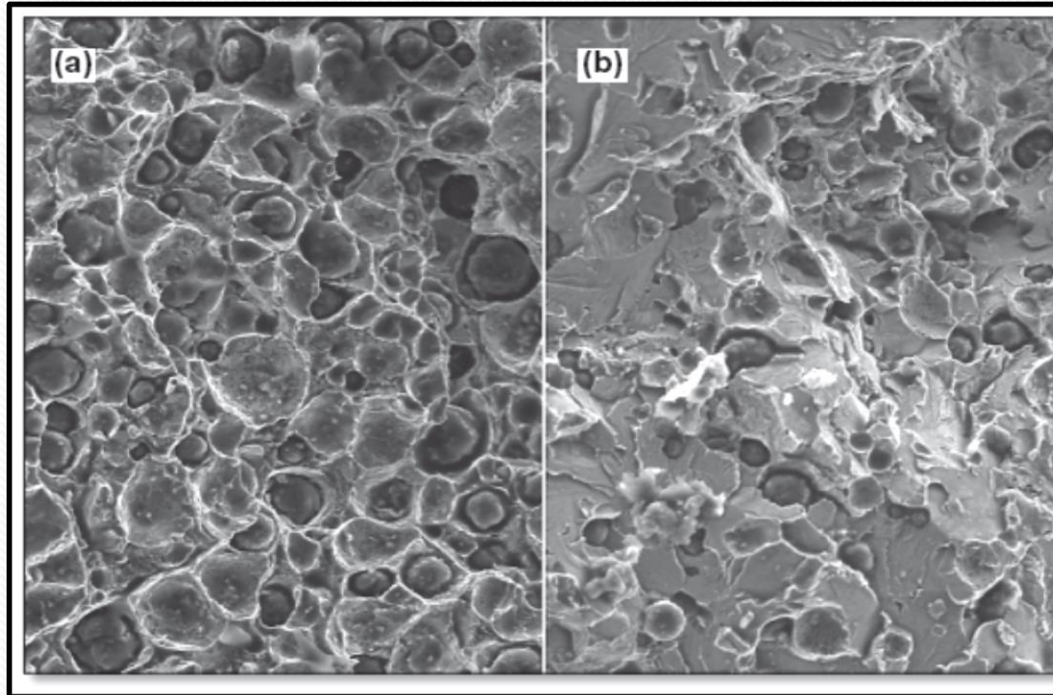
# FERROS FUNDIDOS



**Figura 17.78(c)**

Reconstrução tridimensional de grafita esferoidizada em ferro fundido nodular. Cortes produzidos por FIB e imagens obtidas por MEV. Cortesia A. Velichko e F. Mücklich, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Alemanha.

# FERROS FUNDIDOS



**Figura 17.79**

(a) Fratura dúctil e (b) fratura frágil em ferro fundido nodular. MEV, ES. Sem ataque. O aspecto da grafita e sua participação no processo de fratura são evidentes. Cortesia J. Sertucha, Azterlan, Centro de Investigacion Metalurgica, Durango, Bizkaia, Espanha.

## **FERRO FUNDIDO MALEÁVEL**

### **Ferro fundidos maleáveis:**

- **Réaumur (1720) – Maleável branco ou de núcleo branco;**
- **Seth Boyden (EUA-1821) – Maleável preto ou de núcleo preto.**

### **Maleável branco ou de núcleo branco:**

- **Parte do FoFo branco- descarbonetação por tratamento térmico/recozimento;**
- **Fratura de núcleo claro.**

### **Maleável preto ou de núcleo preto:**

- **Parte do FoFo branco- tratamento térmico para decomposição da cementita em grafita.**

## FERRO FUNDIDO MALEÁVEL

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 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) transformam-se em grafita (nódulos de carbono).

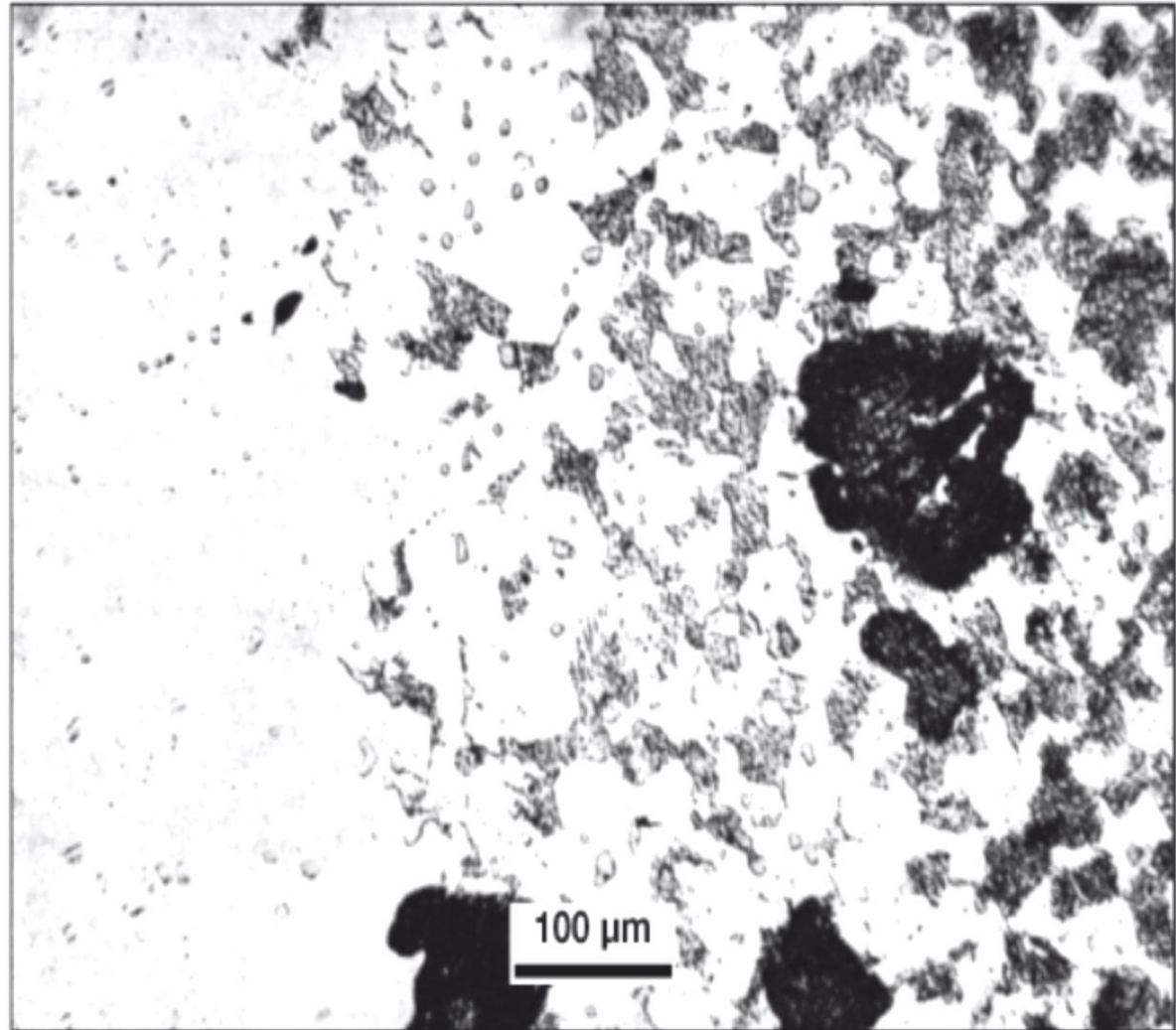
O modo de resfriamento após o tempo de encharque para grafitização é que determinará a matriz da microestrutura formada por nódulos de carbono revenido, como segue:

- Fofa Maleável Ferrítica: resfriamento rápido até 740°C a 760°C, seguido de resfriamento lento.
- Fofa Maleável Perlítico: resfriamento lento até 870°C seguido de resfriamento ao ar
- Fofa 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.

# FERRO FUNDIDO MALEÁVEL DE NÚCLEO BRANCO

**Figura 17.100**

Ferro fundido maleável de núcleo branco. Zona de transição entre a parte central e a região periférica. À esquerda, ferrita. À direita, ferrita, perlita e grafita em nódulos. A fração volumétrica de perlita aumenta para a direita. Ataque: Picral.

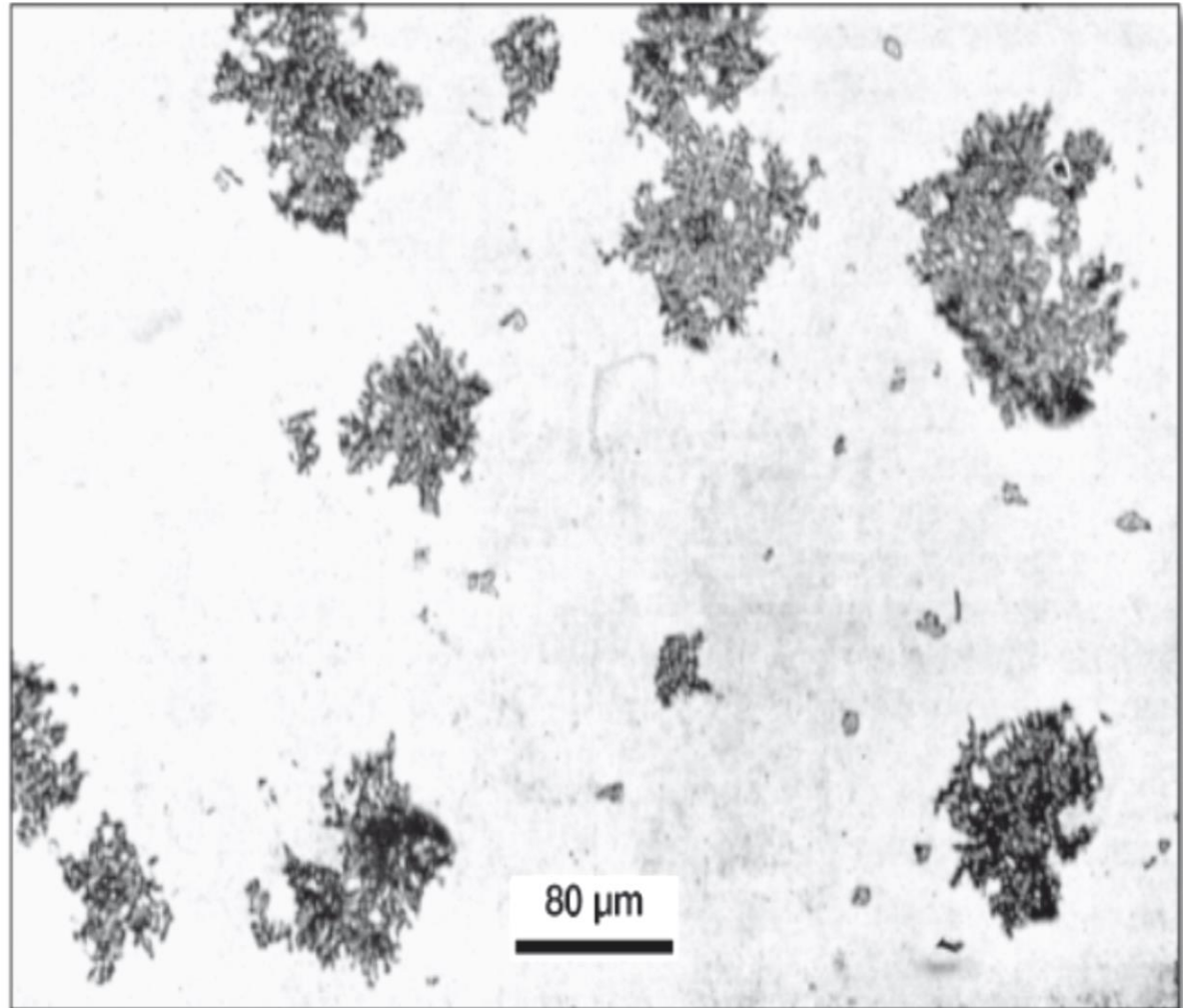


**Nódulos de grafita difusos**

# FERRO FUNDIDO MALEÁVEL DE NÚCLEO PRETO

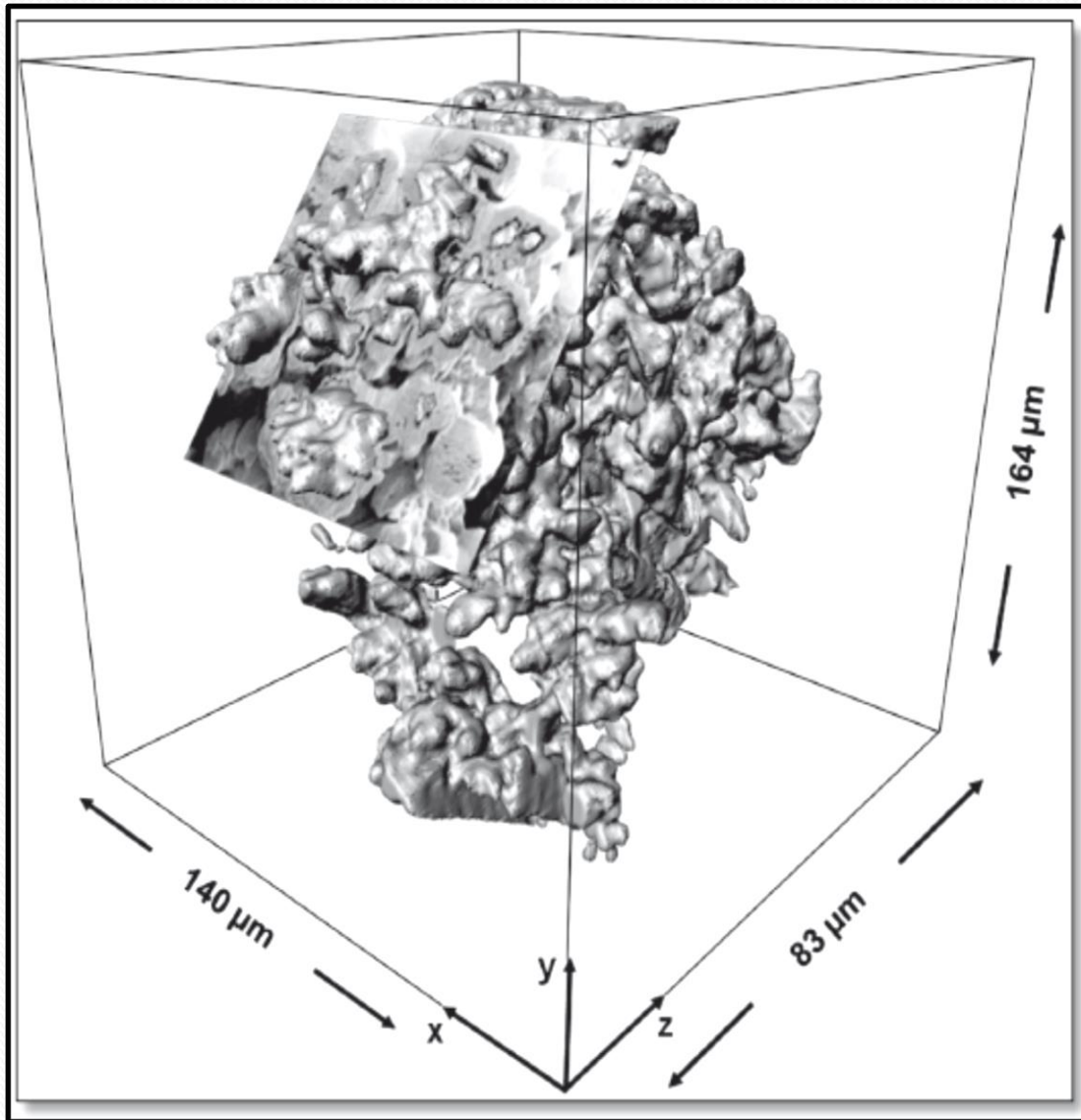
Figura 17.102

Ferro fundido maleável de núcleo preto.  
Nódulos de grafita. Sem ataque.



**Nódulos de grafita difusos**

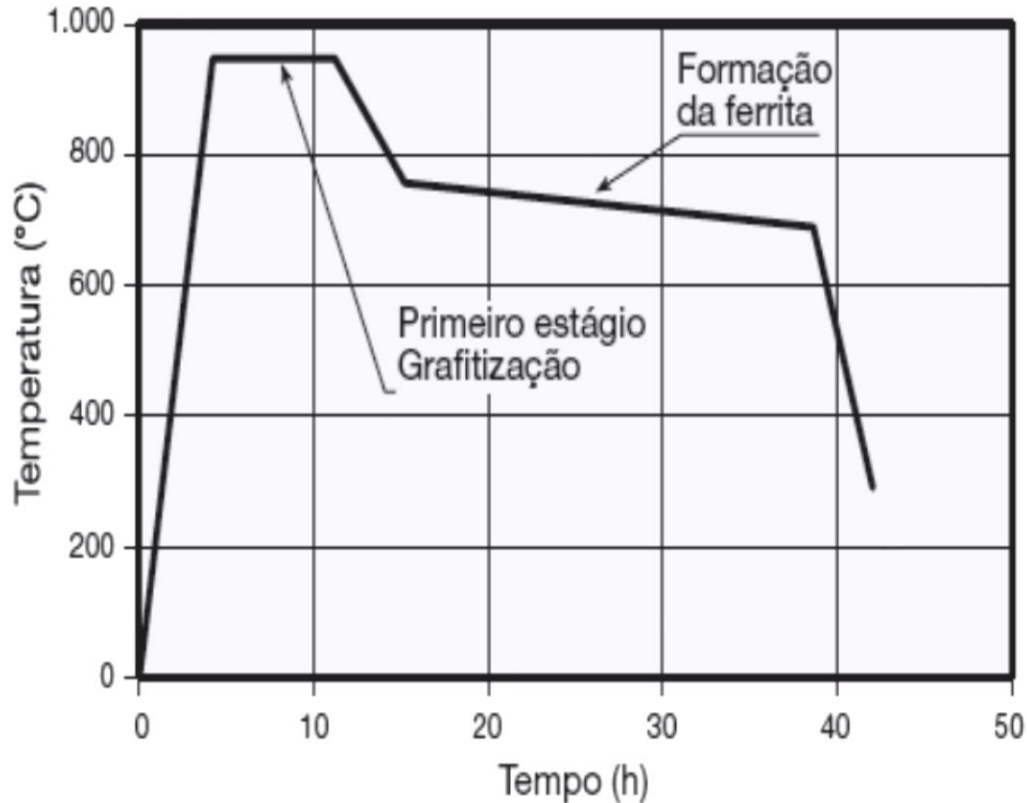
# ESTRUTURA TRIDIMENSIONAL DOS NÓDULOS DIFUSOS



**Figura 17.101**

Reconstrução tridimensional de nódu-  
lo de grafita em ferro fundido maleável.  
Cortes produzidos por FIB e imagens  
obtidas por MEV. Observa-se que, de-  
pendendo do plano do corte, é possível  
produzir seções não conectadas, no pla-  
no de corte, a partir de uma única par-  
tícula de grafita. Cortesia A. Velichko e  
F. Mücklich, Universität des Saarlandes,  
Saarbrücken, Alemanha.

# TRATAMENTO TÉRMICO TÍPICO PARA OBTENÇÃO DE FoFo MALEÁVEL FERRÍTICO

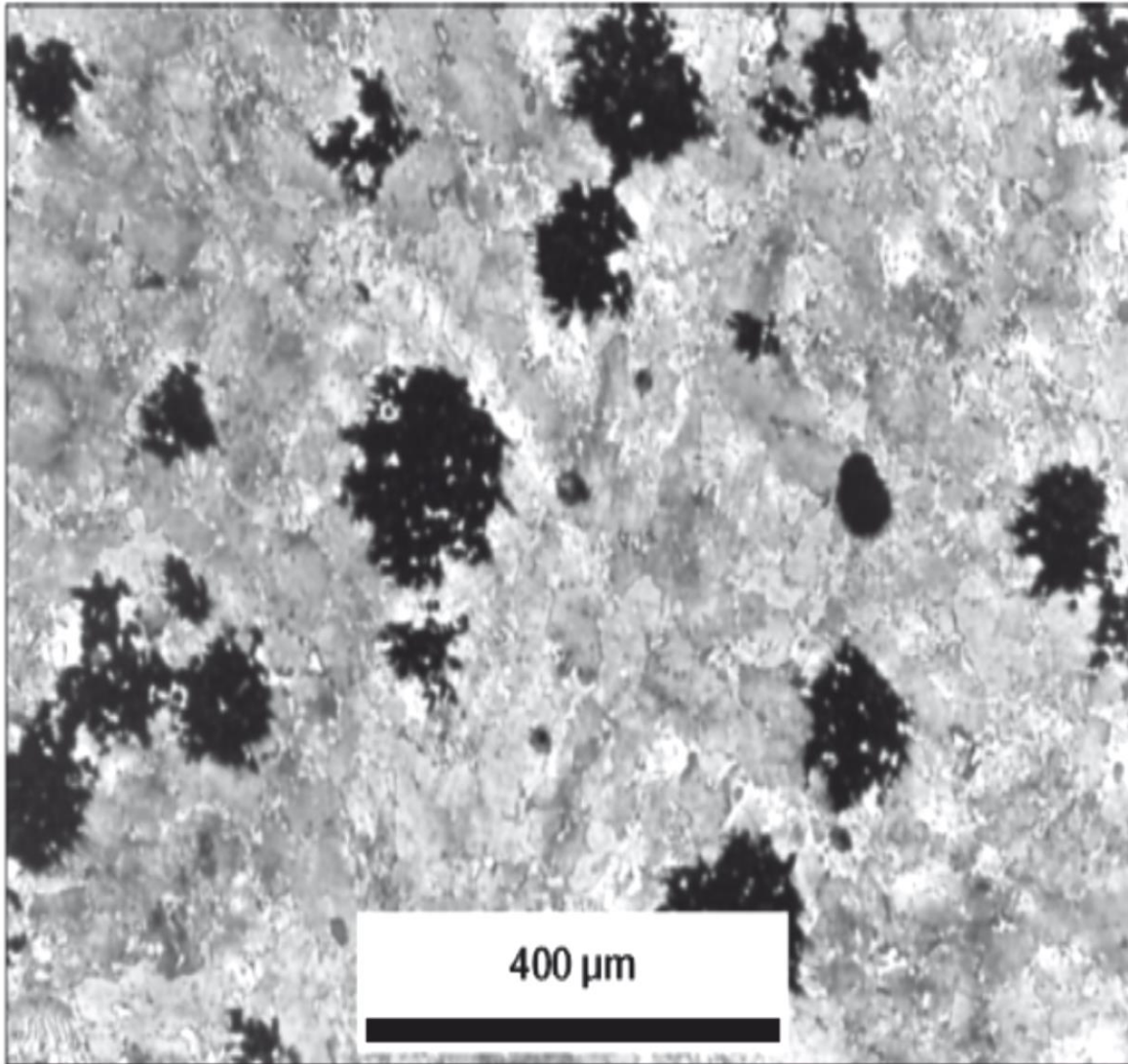


**Figura 17.103**

Ciclo de tratamento térmico típico para a obtenção de ferro fundido maleável preto ferrítico. O primeiro estágio em que a cementita é transformada em grafita pode levar cerca de 8 h. O resfriamento, no campo austenítico, deve levar à precipitação adicional de grafita, evitando a supersaturação da austenita em carbono. Por fim, o resfriamento lento na região crítica permite que a ferrita cresça, rejeitando o carbono para a austenita e precipitando-o como grafita.



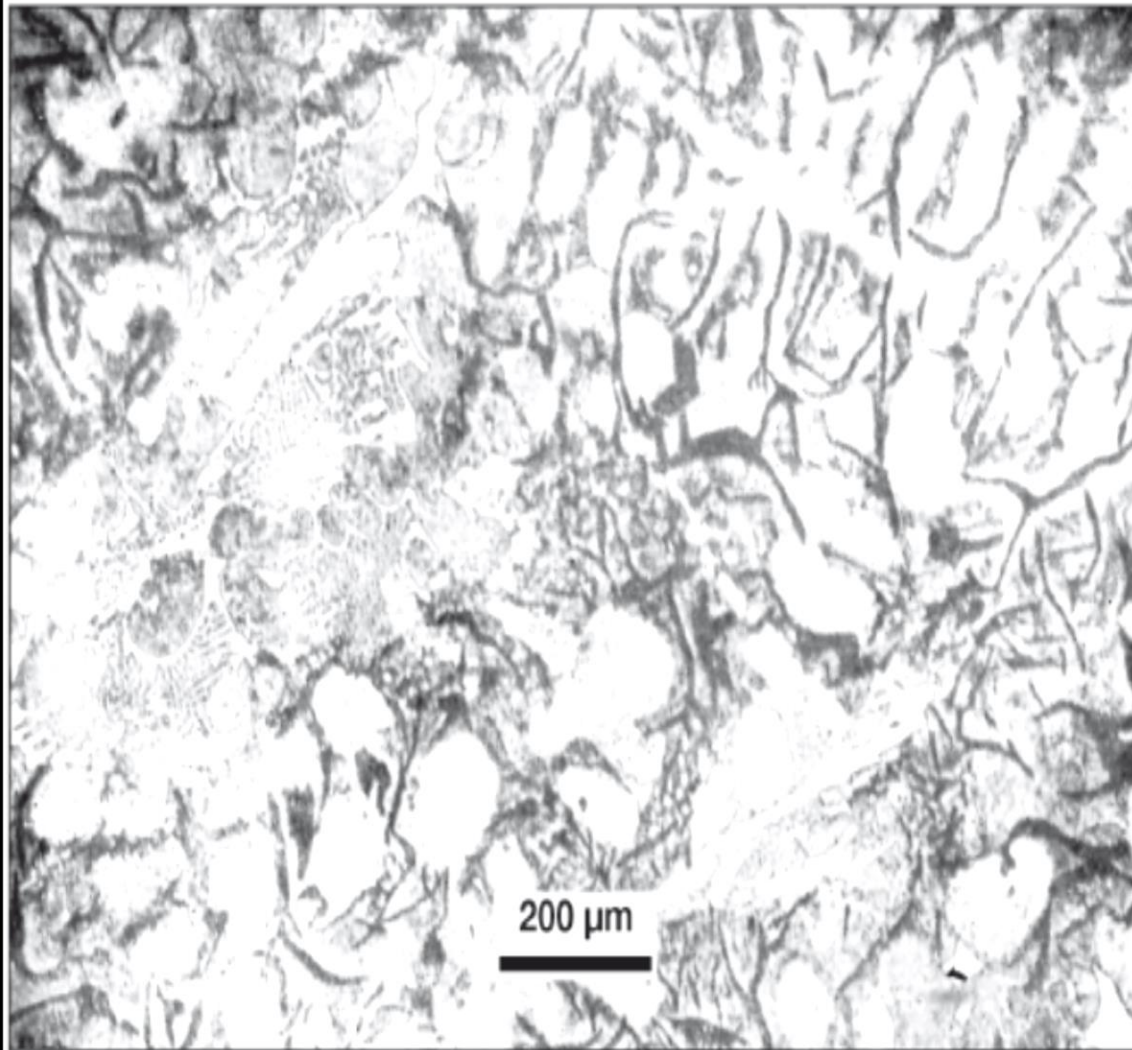
## FoFo MALEÁVEL DE NÚCLEO PRETO FERRÍTICO



**Figura 17.114**

Ferro fundido maleável de núcleo preto, perlítico. Nódulos de grafita em matriz perlítica. Algumas pequenas regiões de ferrita. Cortesia de DoITPoOS, Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge [46].

# Ferro fundido mesclado: composição e resfriamento intermediários



**Figura 17.66**

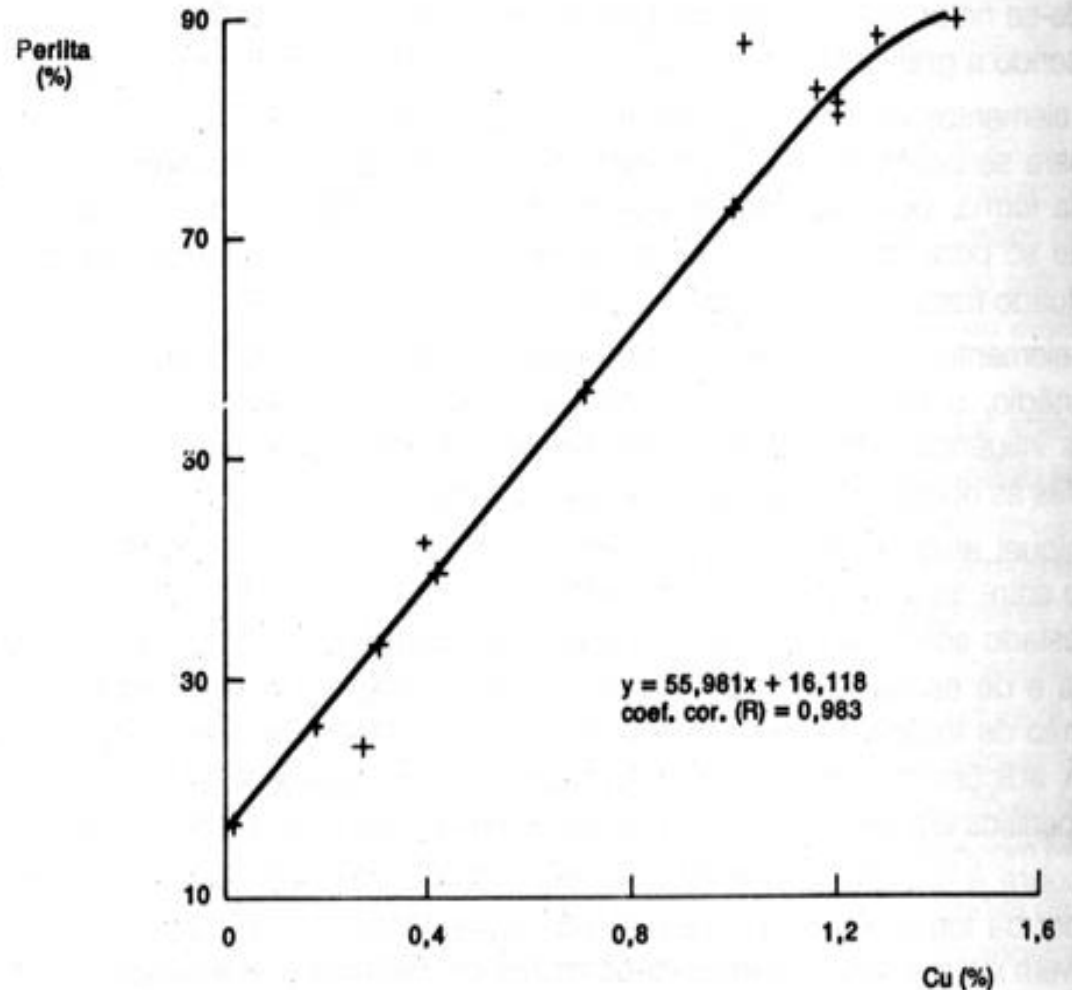
Ferro fundido mesclado. Dendritas transformadas em perlita, com grafita tipo E e áreas de ledeburita e cementita. Ataque: Picral.

# Ferros Fundidos - Influência de Elementos de Liga

A adição de elementos de liga a ferros fundidos, via de regra, possibilita a obtenção de propriedades mecânicas mais elevadas, tanto no estado bruto de fusão como após tratamento térmico

- A adição desses elementos baseia-se no aumento da quantidade de perlita na estrutura e diminuição do espaçamento interlamelar (obtenção de perlita mais fina)

- No caso do silício há ainda um endurecimento da ferrita por solução sólida



# Ferros Fundidos - Influência de Elementos de Liga

- **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 **perlitzante** 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

## 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**

## Alívio de Tensões

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

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

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

# Recozimento

O Recozimento objetiva melhorar ainda mais a usinabilidade dos ferros fundidos, e muitas vezes faz-se necessário para eliminar ou amolecer zonas coquilhadas que podem ter surgido durante a solidificação, especialmente em seções mais finas. Isto muitas vezes implica na queda das suas propriedades relacionadas com a resistência mecânica.

Diferentes técnicas de recozimento podem ser adotadas, em função do material e da sua aplicação, conforme descrito abaixo e ilustrado na figura a seguir.

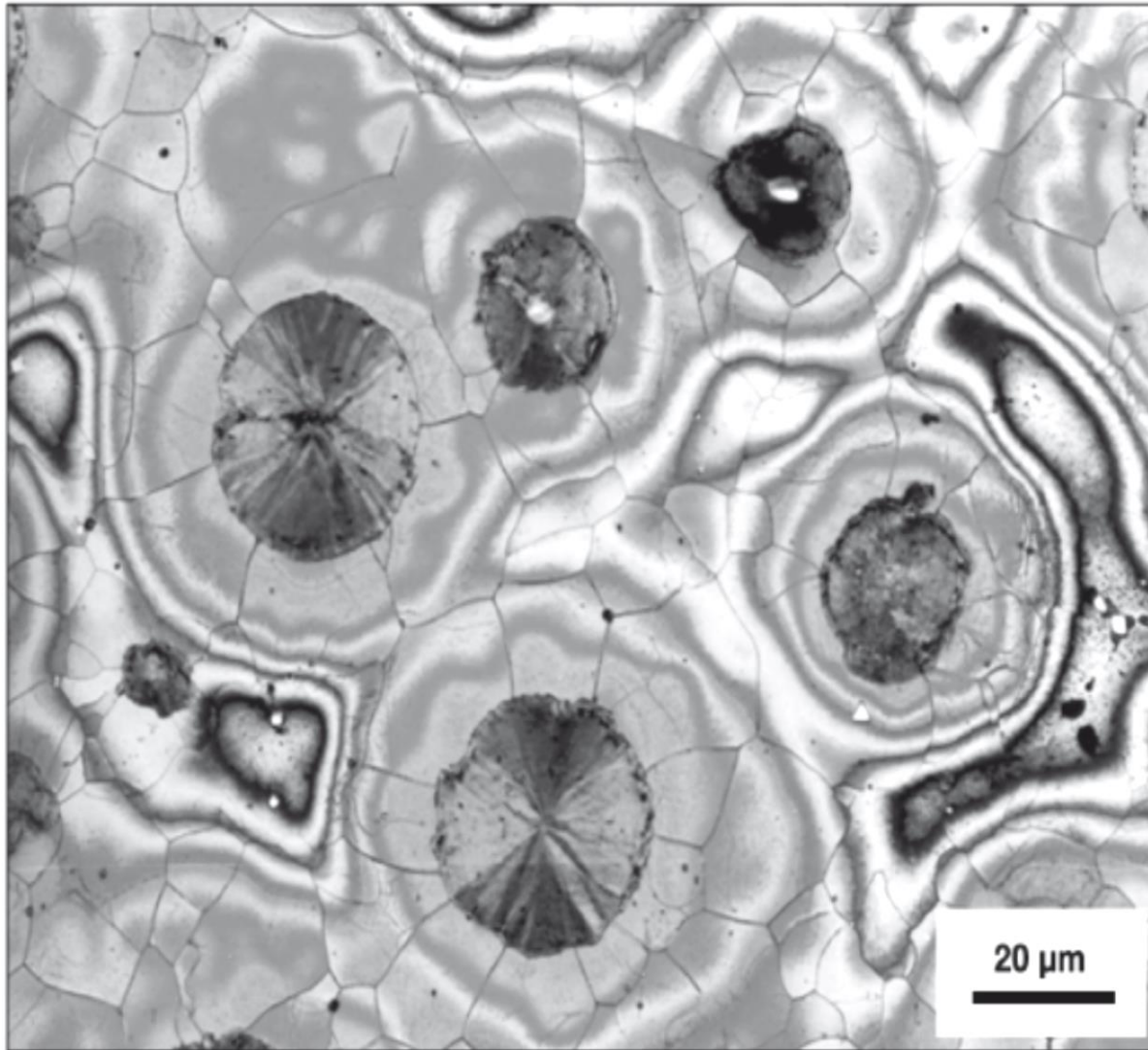
- O recozimento completo ou pleno ocorre numa faixa de temperatura entre  $780^{\circ}\text{C}$  a  $900^{\circ}\text{C}$  e é recomendado quando o ferro fundido apresenta os elementos de liga em teores mais elevados, objetivando-se a eliminação de pequenas quantidades de carbonetos dispersos.
- O recozimento a baixas temperaturas, entre  $700^{\circ}\text{C}$  e  $760^{\circ}\text{C}$ , chamado de recozimento de ferritização, objetiva a transformação dos carbonetos perlíticos em ferrita e grafita, de modo a melhorar a usinabilidade. Normalmente destinado a ferros fundidos não ligados ou com baixos teores de liga. O tempo de encharque depende da quantidade de grafitização desejada.
- O recozimento grafitizante, destinam-se a ferros fundidos que apresentam carbonetos maciços (em geral brancos ou mesclados), requerendo temperaturas entre  $900^{\circ}\text{C}$  a  $950^{\circ}\text{C}$ . Cuidado especial deve ser tomado quanto ao percentual de fósforo na liga, pois o eutético de fósforo pode fundir nestas temperaturas.

# Normalização

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



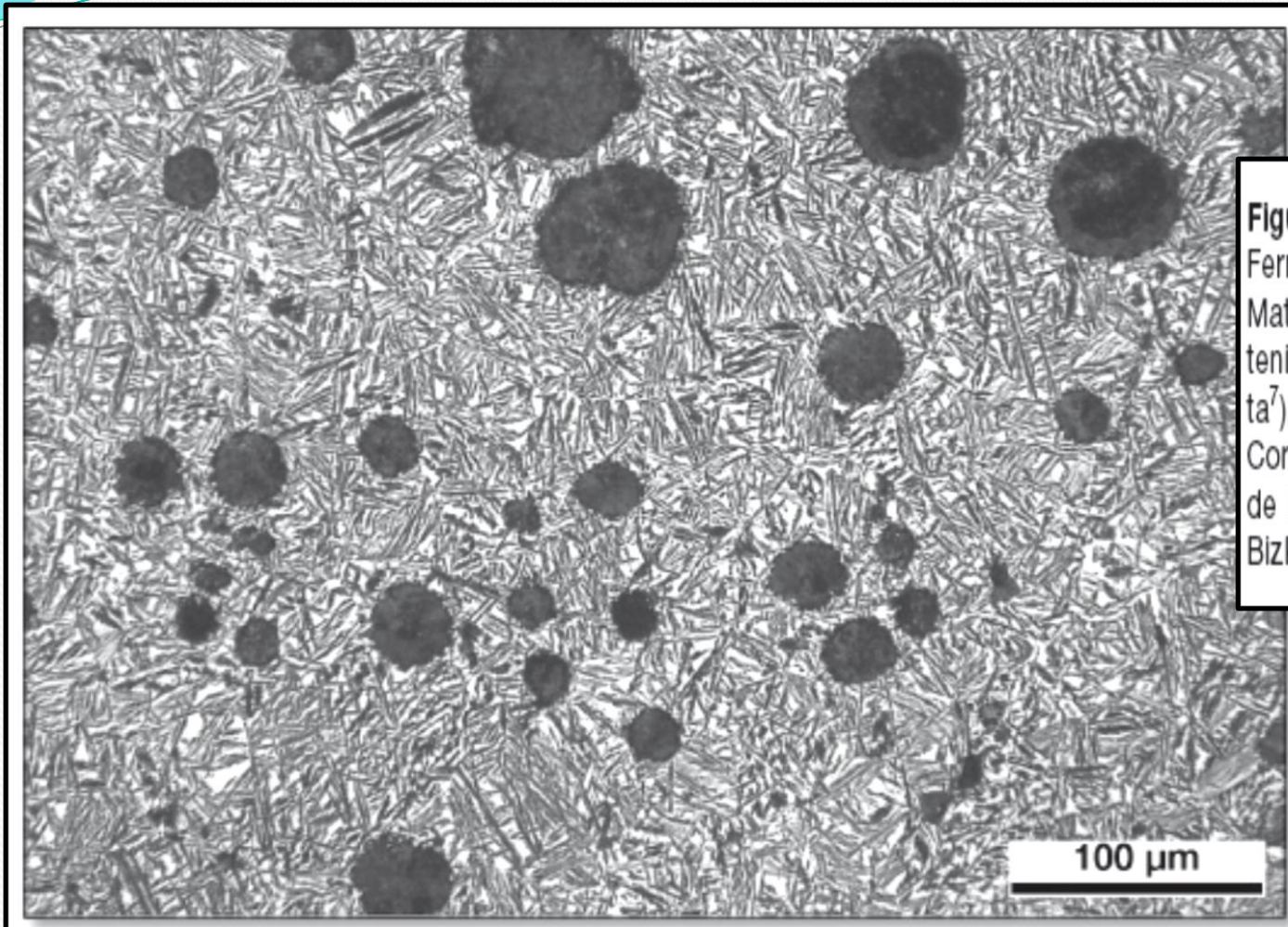
# FERRO FUNDIDO NODULAR RECOZIDO



**Figura 17.82**

Ferro fundido nodular, recozido (Fe-3.9%, C-2.9%, Si-0.32%, Mn-0.06%, P-0.037%, Mg-1.5%, Ni-0.57% Cu). O ataque<sup>(12)</sup> revela a segregação de silício, cujo teor vai se reduzindo a medida que a distância do nódulo aumenta. Cortesia de J. Radzikowska, Foundry Research Institute-Krakow, Polônia.

# FERRO FUNDIDO NODULAR AUSTEMPERADO



**Figura 17.88**

Ferro fundido nodular austemperado. Matriz de bainita (ferrita bainítica) e austenita retida (áreas brancas) (ausferrita<sup>7</sup>). Nódulos de grafita. Ataque: Nital. Cortesia J. Sertucha, Azterlan, Centro de Investigación Metalúrgica, Durango, Bizkaia, Espanha.

## **FoFo CINZENTO:**

- GRAFITA EM VEIOS;
- FRÁGIL SOB TENSÃO TRATIVA;
- RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO;
- RESISTÊNCIA AO DESGASTE;
- EXCELENTE ABSORÇÃO DE VIBRAÇÕES;

## **FoFo MALEÁVEL:**

- MODIFICAÇÃO DO FoFo BRANCO ATRAVÉS DE TRATAMENTO TÉRMICO;
- MAIOR DUTILIDADE QUE O BRANCO;
- GRAFITA EM NÓDULOS DIFUSOS.

DE

## **FoFo DÚTIL OU NODULAR:**

- ADIÇÃO DE Mg OU Ce NO FoFo CINZENTO;
- GRAFITA EM NÓDULOS;
- MATRIZ PERLITICA–MELHOR DUTILIDADE;

## **FoFo BRANCO:**

- DURO E FRÁGIL;
- EXCELENTE RESISTÊNCIA AO DESGASTE;
- <1,0%Si.



**FIM**