

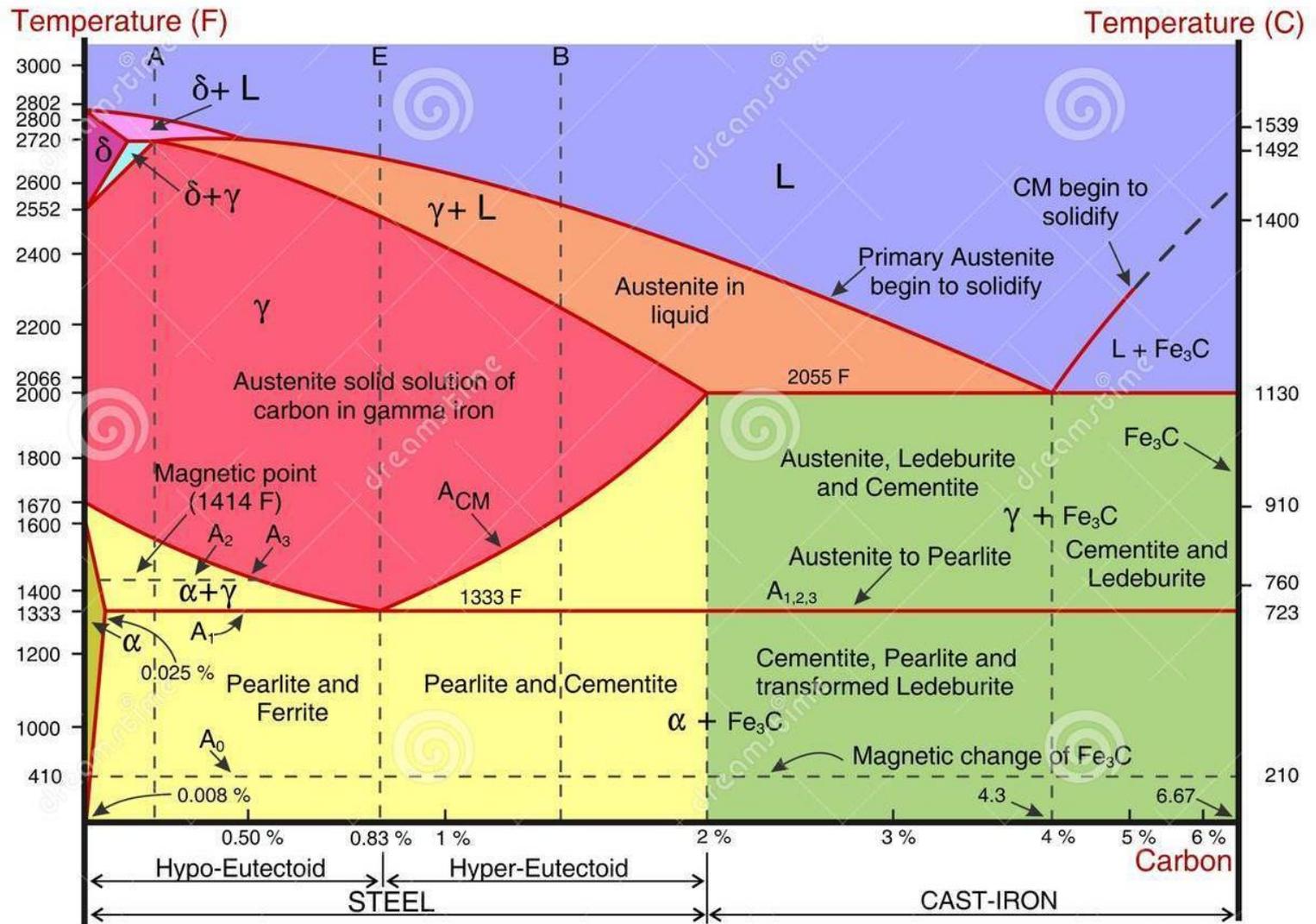
SMM 0193 – ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS I

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;**
- **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos, Wilson Luiz Guessier, 2ª ed., Blücher, 2019.**

FERROS FUNDIDOS



IRON-CARBON DIAGRAM

LEGEND	
δ - delta iron	L - liquid
γ - austenite	CM - cementite
α - ferrite	

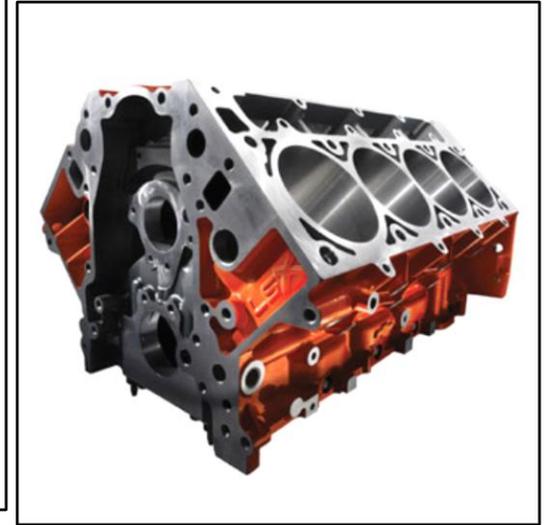
FERROS FUNDIDOS

- **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 **utilização dos FoFos**, em peças **fundidas é superior** a de qualquer outro metal (**exceção os lingotes de aço**).

PRODUÇÃO BRASILEIRA DE PEÇAS FUNDIDAS ABIFA

Metais	2023 (t)
Ferro	2.022.601
Aço	265.634
Não ferrosos	410.940
Cobre	32.735
Zinco	1.175
Alumínio	166.994
Magnésio	5036
Chumbo	205.000
Total	2.699.175

Segundo a revista *Research and Markets*, a produção mundial de FoFo foi de **1.6 bilhões de ton, em 2022. Aço: World Steel Association** publicado em Jan. 2024: **1,849 bilhões de ton.**



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 nas quais 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;**
- **Pouca** deformação plástica em Ta;
- **Baixa** soldabilidade.

➤ O diagrama Fe-C apresenta “dois eutéticos” provenientes de dois equilíbrios: estável e metaestável.

➤ O eutético estável é formado pela austenita e grafita (Si).

➤ O eutético metaestável por austenita e cementita.

➤ Resfriamento rápido: diagrama metaestável

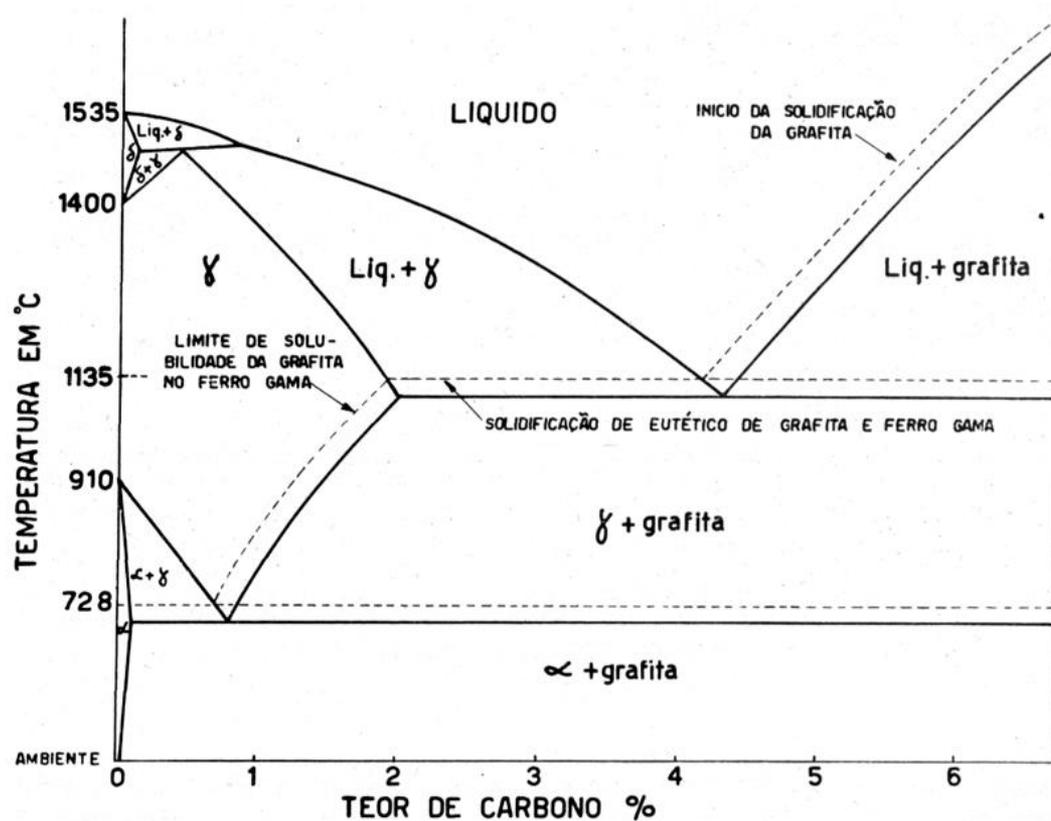


Fig. 521 — Diagrama de equilíbrio ferro-carbono simplificado mostrando em pontilhado o diagrama estável ferro-grafita.

Ferros Fundidos - Classificação

- Extensa gama de resistências mecânicas e de durezas, sendo, na maioria dos casos, de fácil usinagem;
- Podem apresentar excelente resistência ao desgaste, à abrasão e à corrosão. A resistência ao impacto e a ductilidade são relativamente baixas;
- De acordo com a **composição química e microestrutura**, os ferros fundidos podem ser classificados em:

- **Branco** – Superfície de fratura branca;
- **Cinzento** - Superfície de fratura cinza;
- **Mesclado** – Superfície de fratura Cinzenta brilhante;
- **Maleável** – um pouco mais dútil que os outros;
- **Dúctil (nodular)** – o mais dútil.

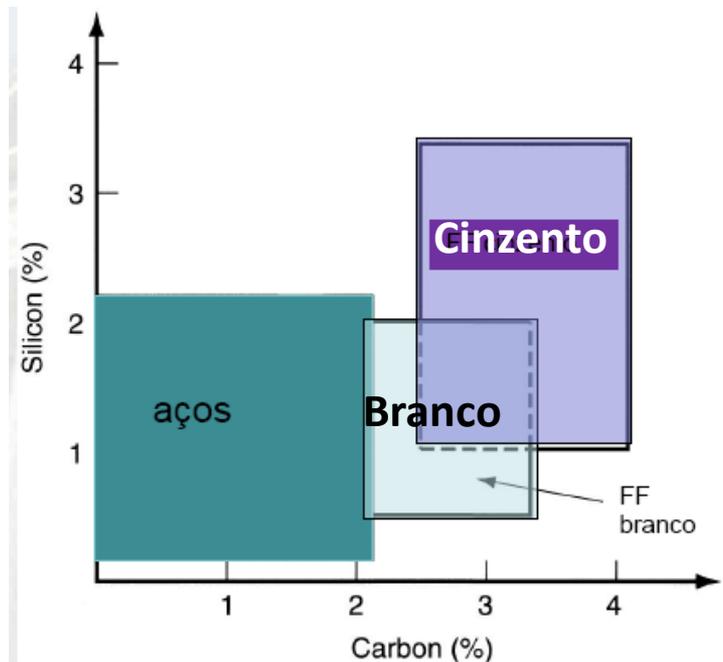
Ferros Fundidos - composição química

Aços carbono: Si 0,15 a 0,35

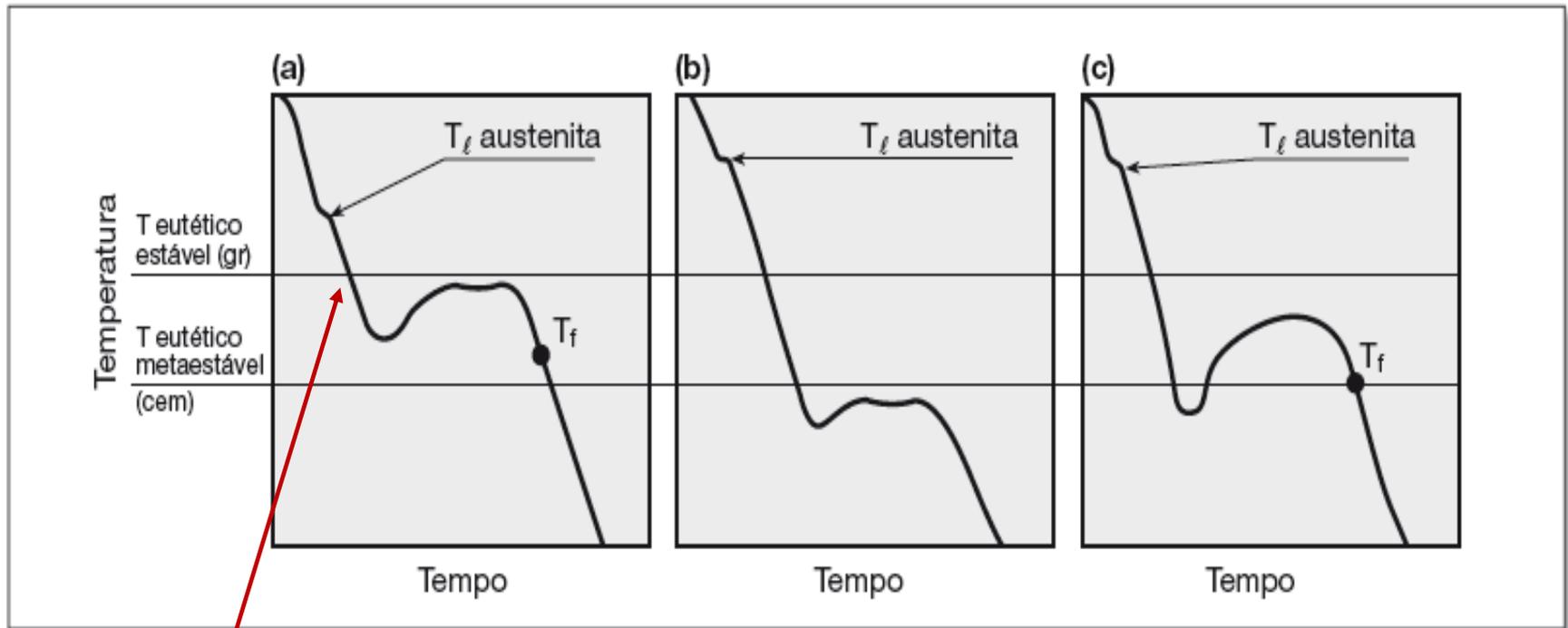
	C	Si	Mn	S	P
Cinzento	2,5-4,0	1,0-3,0	0,25-1,0	0,02-0,25	0,05-1,0
Branco	1,8-3,6	0,5-1,8	0,25-0,80	0,06-0,20	0,06-0,18
Maleável	2,0-2,6	1,1-1,6	0,20-1,0	0,04-0,18	0,18 máx.
Nodular	3,0-4,0	1,8-2,8	0,10-1,0	0,03 máx.	0,10 máx.

Mg ou Ce

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



Ferros Fundidos - curva de resfriamento



Nucleação do eutético

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_{ℓ}) e a temperatura de final de solidificação (T_f). Adaptado de [7]. (Ver também Figura 17.22).

Ferro Fundido Branco

Propriedades

- **Elevada resistência à compressão e desgaste;**
- **Elevada dureza e fragilidade;**
- **Baixa usinabilidade;**
- **Baixa soldabilidade;**
- **Baixo custo.**

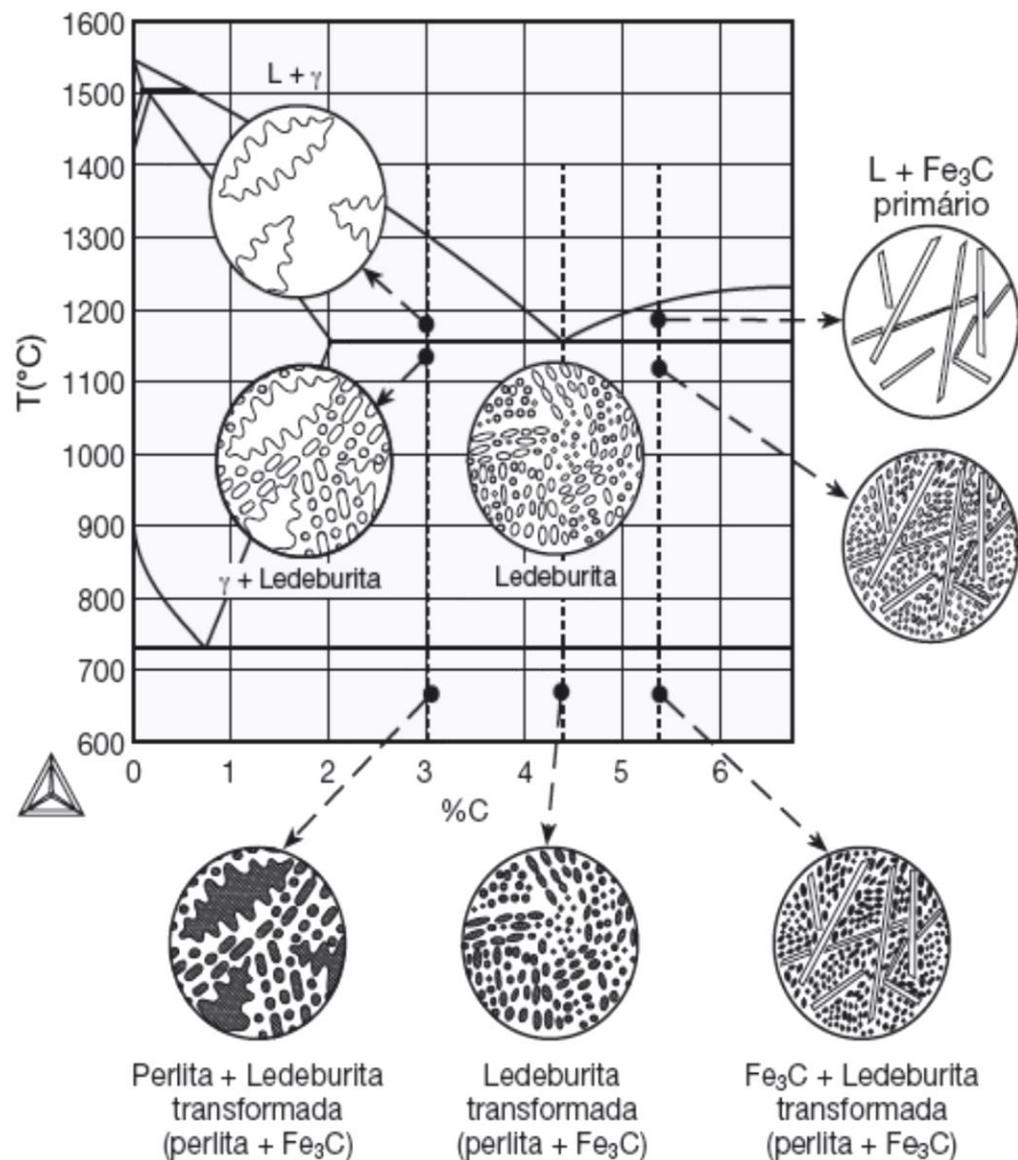
Aplicações

- **Base de máquinas;**
- **Conexões de tubulações;**
- **Sapata de freios;**
- **Matéria prima para fabricação de FoFo maleável.**

Ferro Fundido Branco

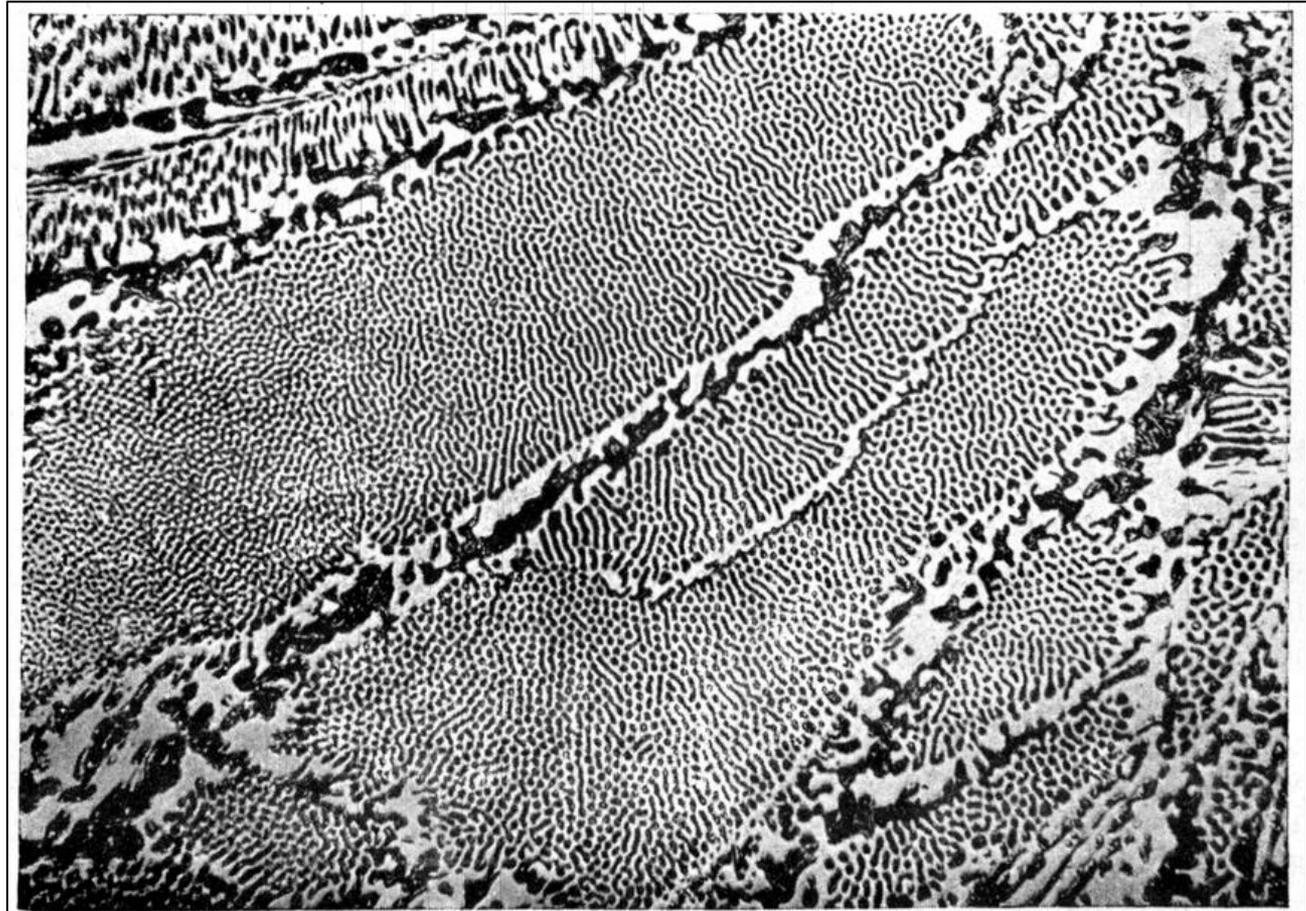
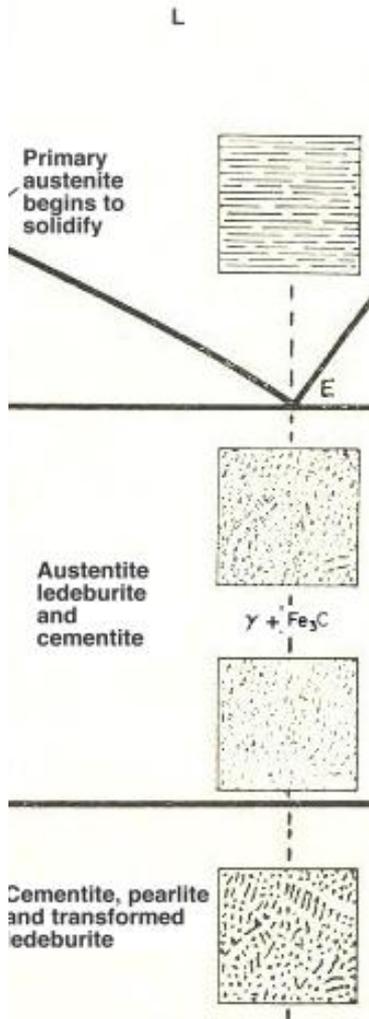
Figura 17.9

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⁽⁴⁾. (Feros brancos hipereutéticos podem não solidificar com cementita pró-eutética).



γ = Austenite
 α = Ferrite
CM = Cementite

Ferro Fundido Branco Eutético: 4,3%C

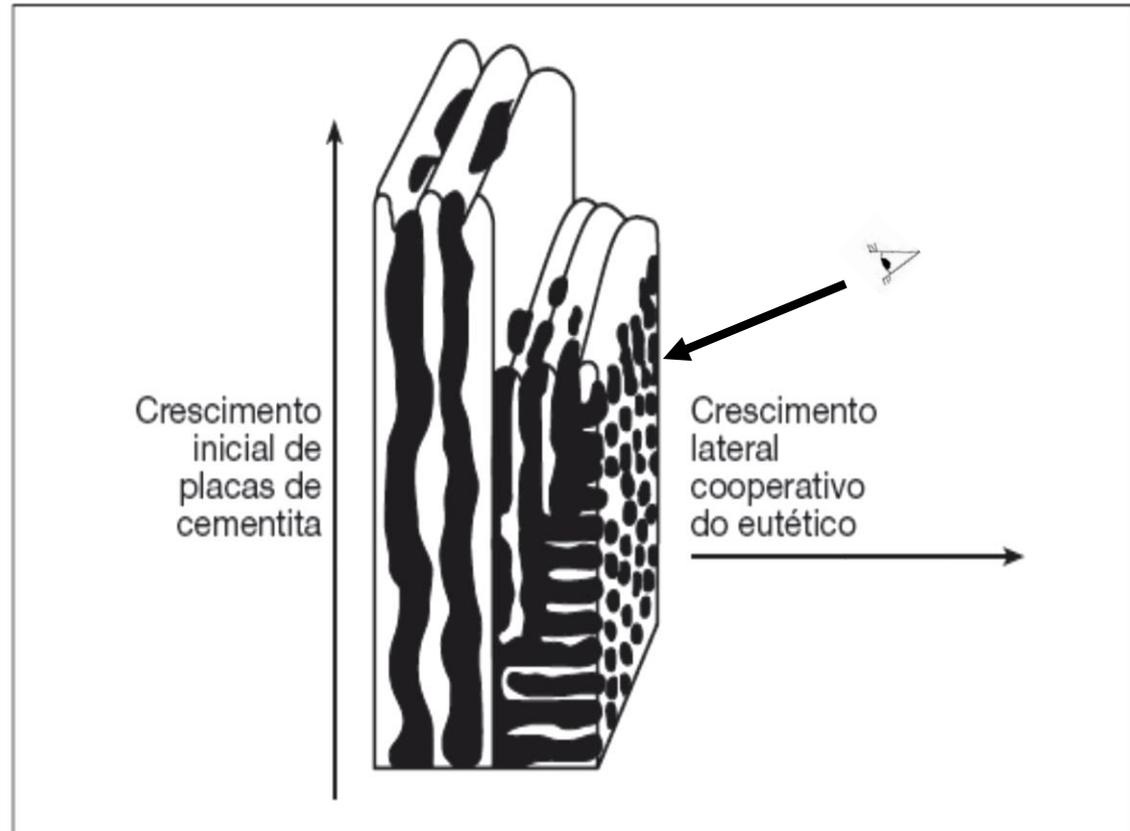


Abaixo de 727°C , a austenita transforma-se em perlita. Com isso a ledeburita será constituída de glóbulos de perlita sobre um fundo de cementita.

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.

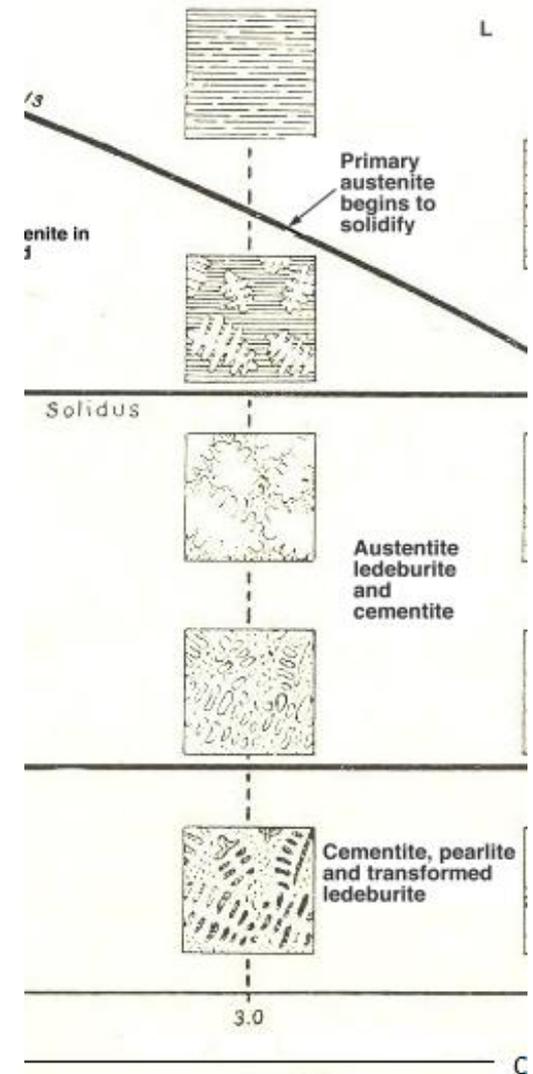


O líquido se enriquece de carbono, atinge a composição do eutético. A nucleação da placa de cementita ocorre entre as dendritas de austenita, depois, ambas crescem cooperativamente em forma de colunas e a austenita se transforma em perlita: ledeburita.

Ferro Fundido Branco Hipoeutético

γ = Austenite
 α = Ferrite
CM = Cementite

- 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**.
- 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 ledeburita**.



Ferro fundido branco hipoeutético

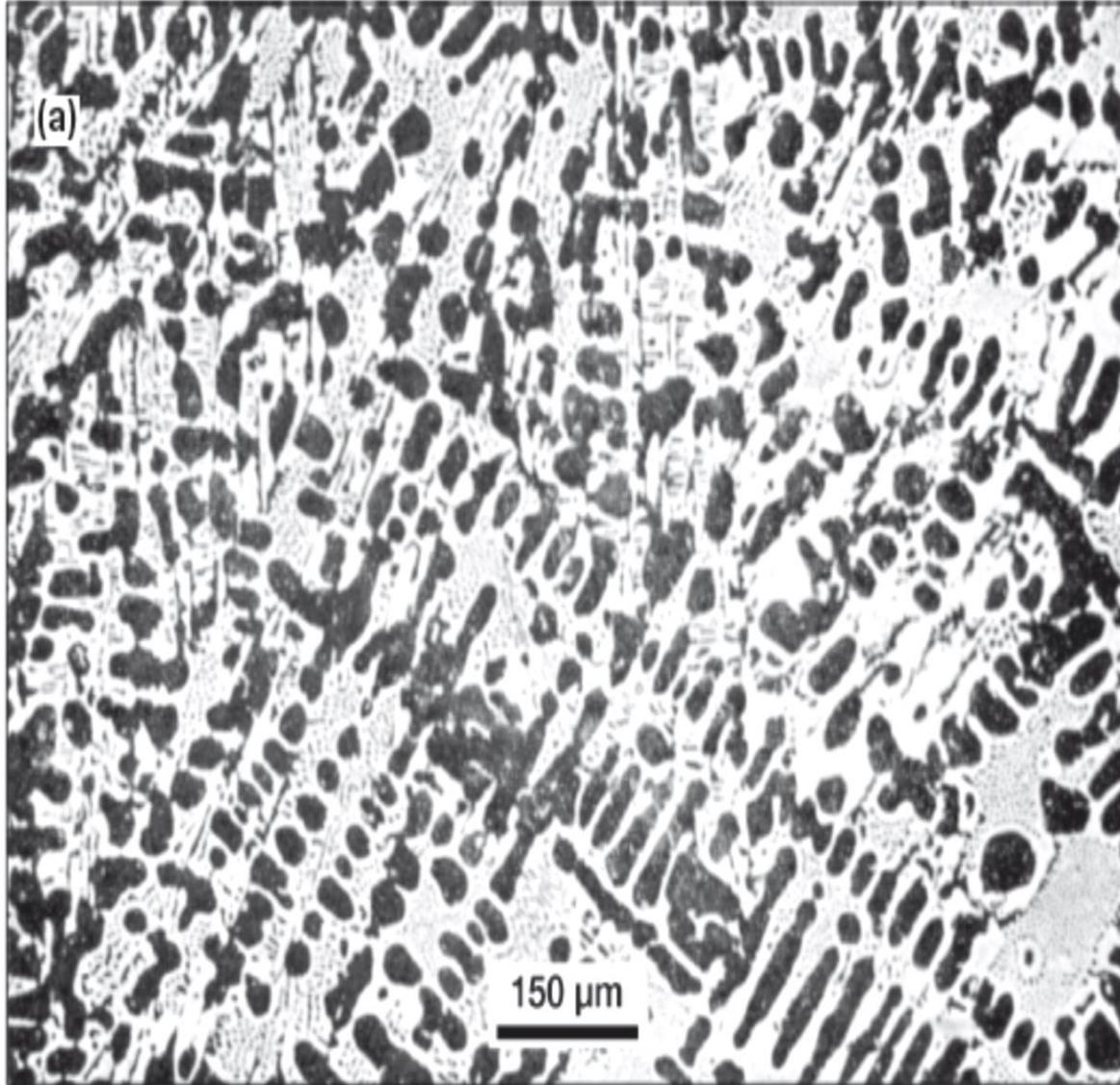
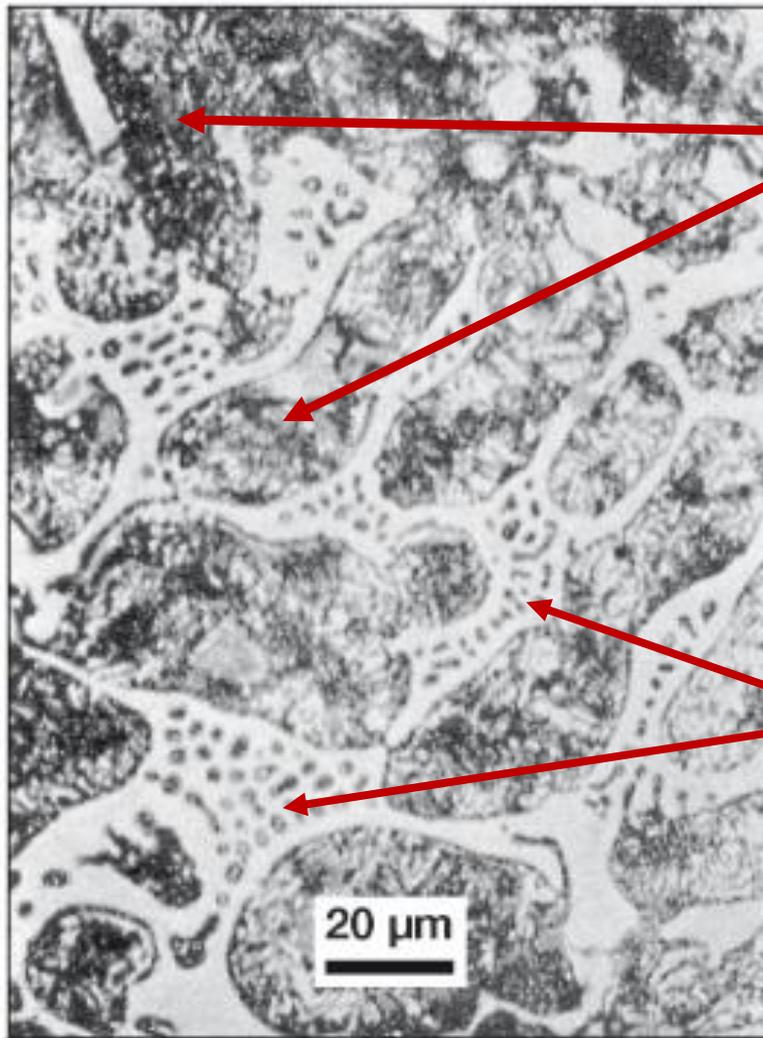


Figura 17.11(a)

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.

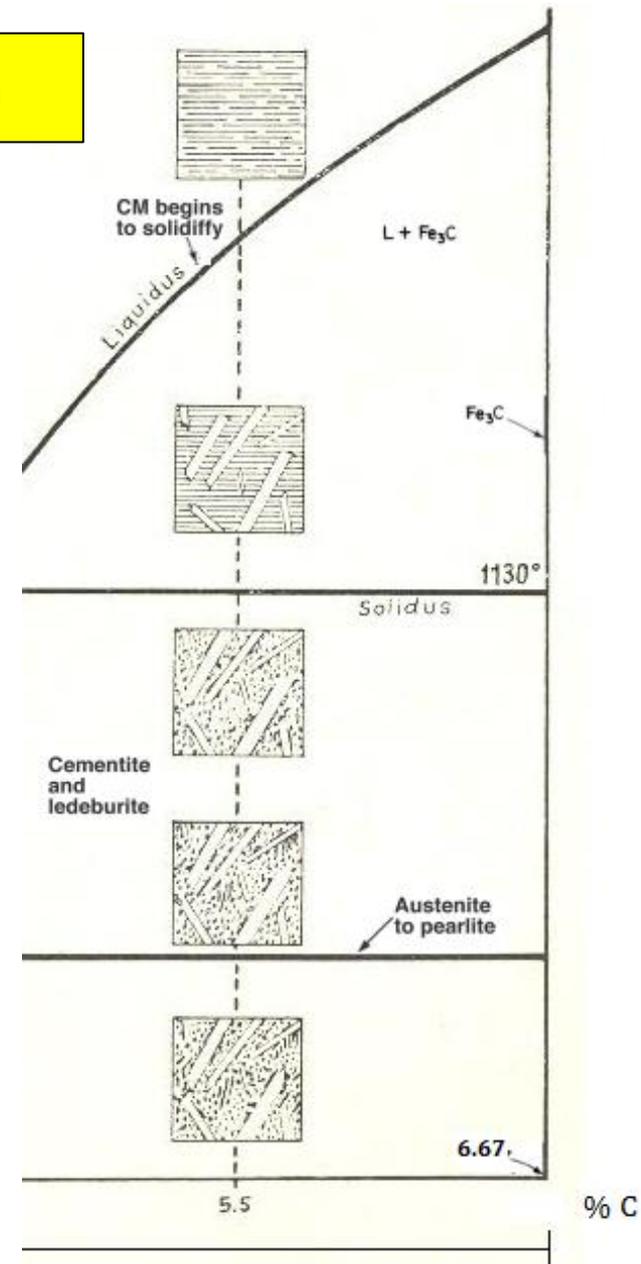
Ledeburita: cementita(clara) e pontos de perlita

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 Hipereutético

- Considerando uma liga **hipereutética**, por exemplo, **5,5% de C**
- No começo da solidificação, formam-se cristais de **cementita**. 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***





EESC • USP

Ferro fundido branco hipereutético

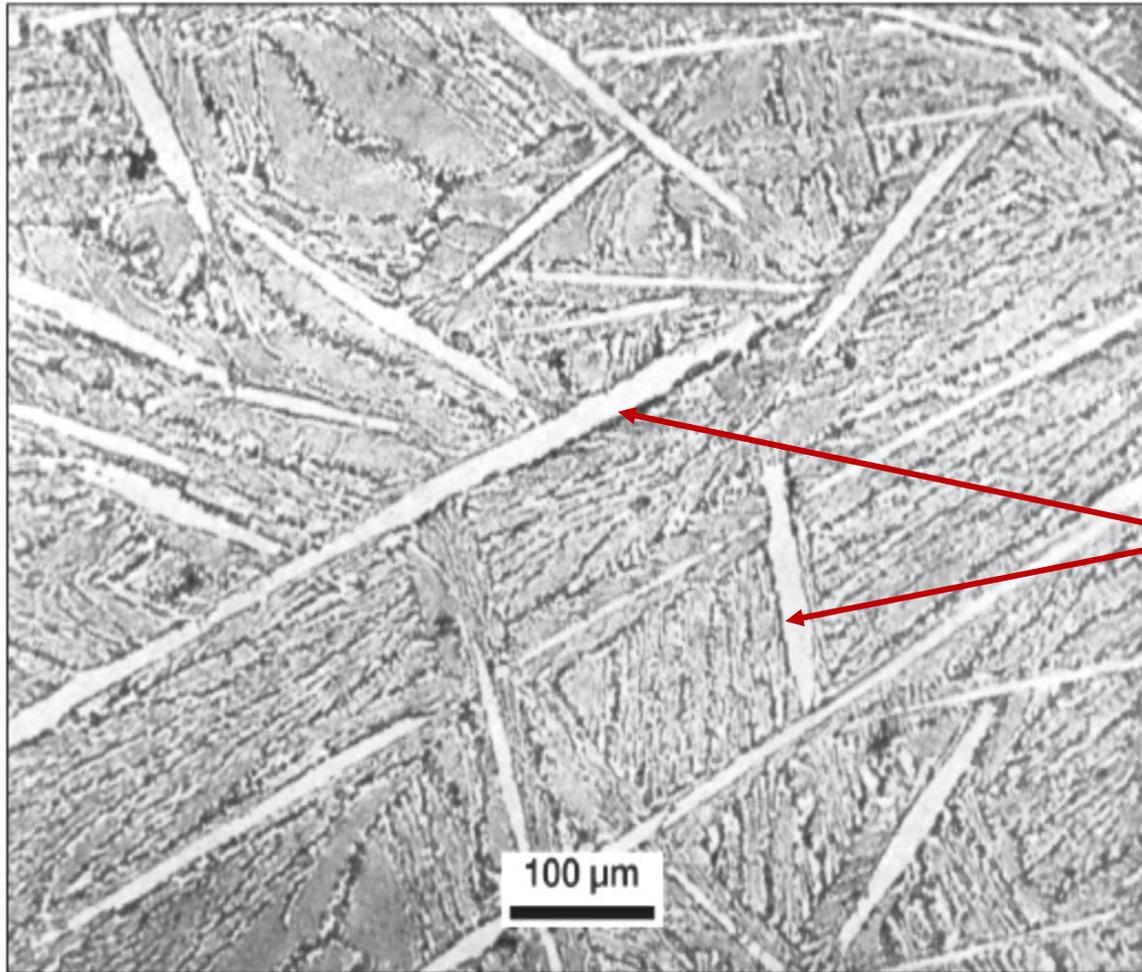


Figura 17.15

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

**Cementita pró-
eutética em
placas**



Propriedades

- **Elevada fluidez na fundição (peças complexas);**
- **Elevada dureza e resistência à compressão e desgaste;**
- **Boa usinabilidade;**
- **Baixa soldabilidade;**
- **Baixa resistência à tração;**
- **Excelente absorção de vibrações;**
- **Baixo custo**

Aplicações

- **Bloco de motor;**
- **Tubulações;**
- **Barramento de torno;**
- **Base de máquinas;**
- **Engrenagens de grandes dimensões.**

• Teor de silício está **acima de 1%**, o que leva a algumas alterações no diagrama Fe-C

• **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**.

Ferro Fundido Cinzento

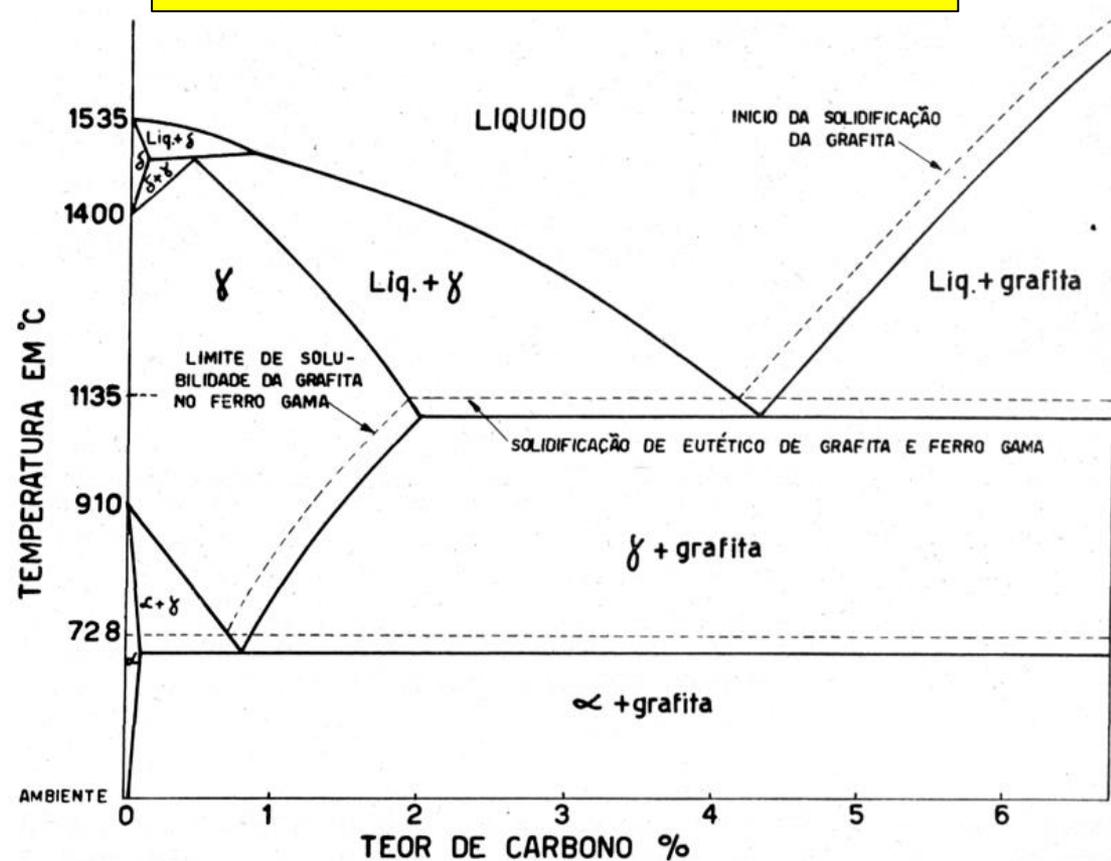
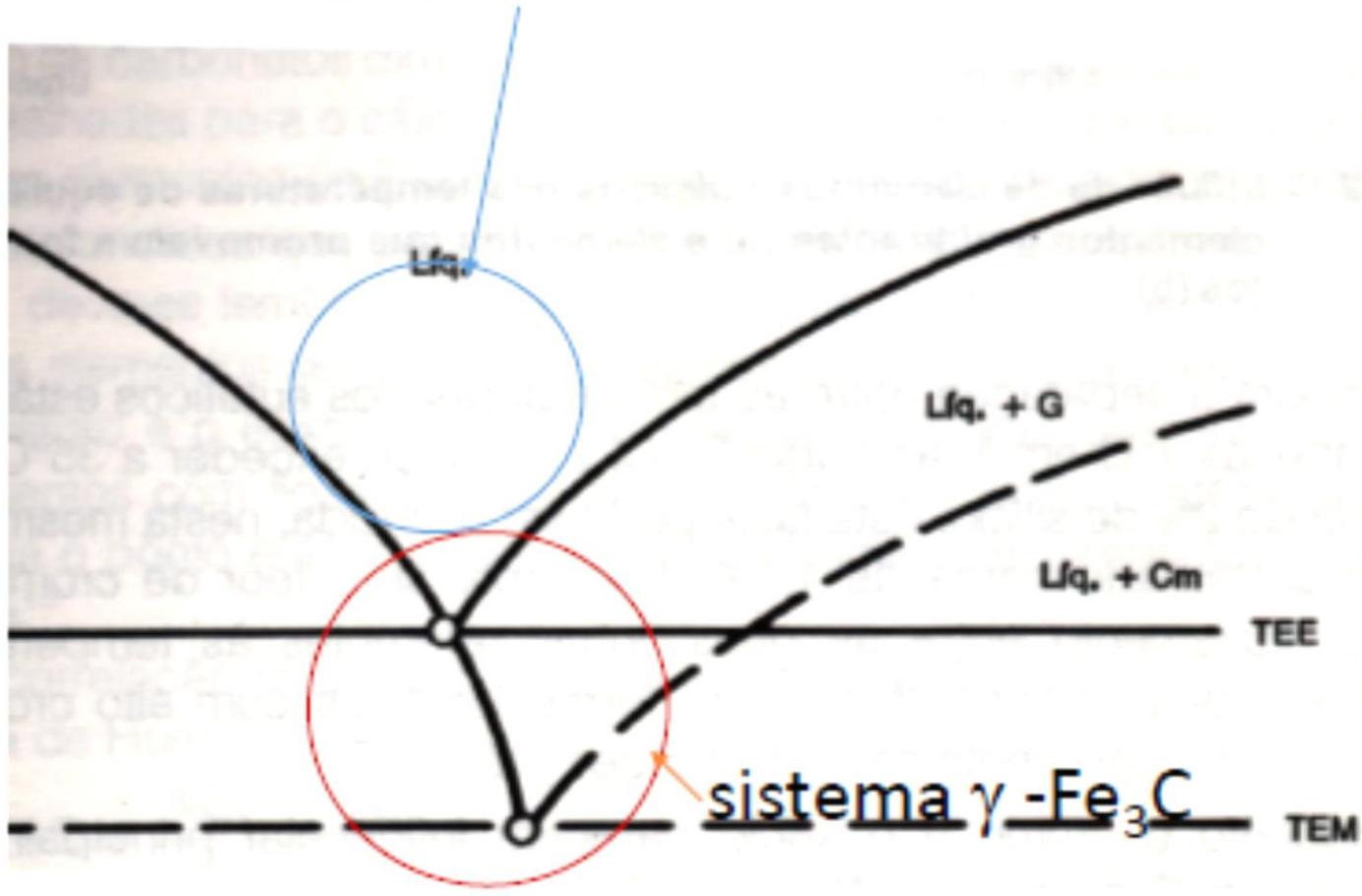


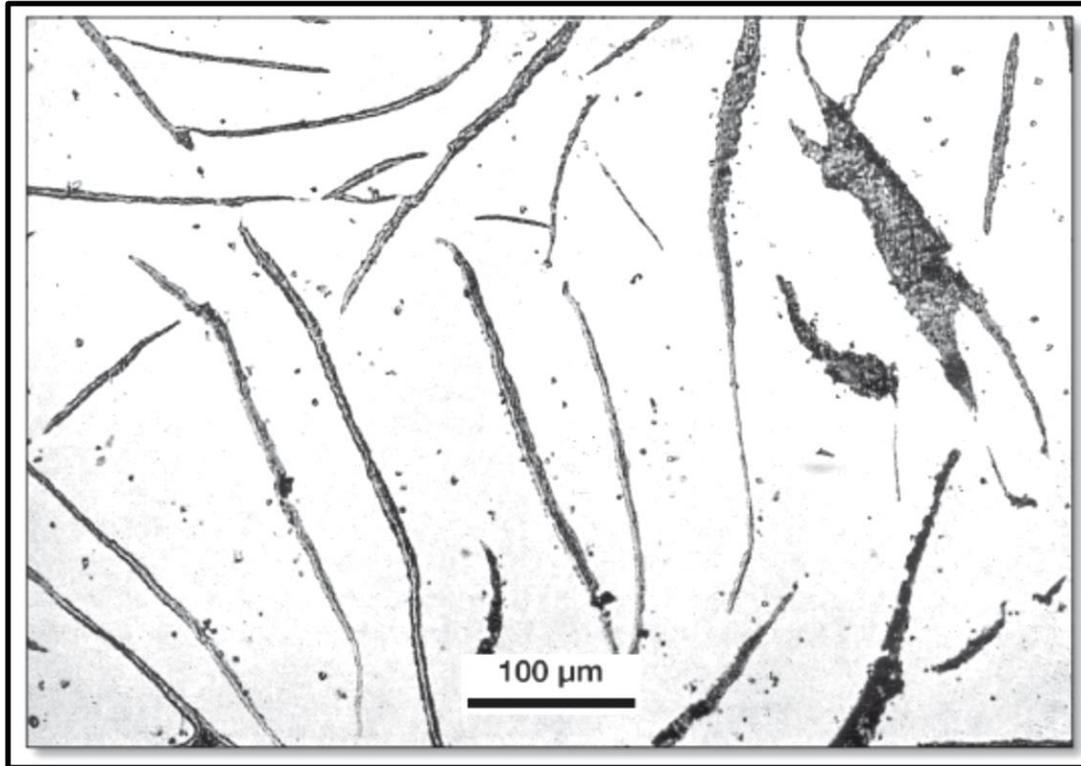
Fig. 521 — Diagrama de equilíbrio ferro-carbono simplificado mostrando em pontilhado o diagrama estável ferro-grafita.

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

sistema γ - grafita



Ferro fundido cinzento



Resfriamento lento: veios de grafita (grafitização) e ferrita

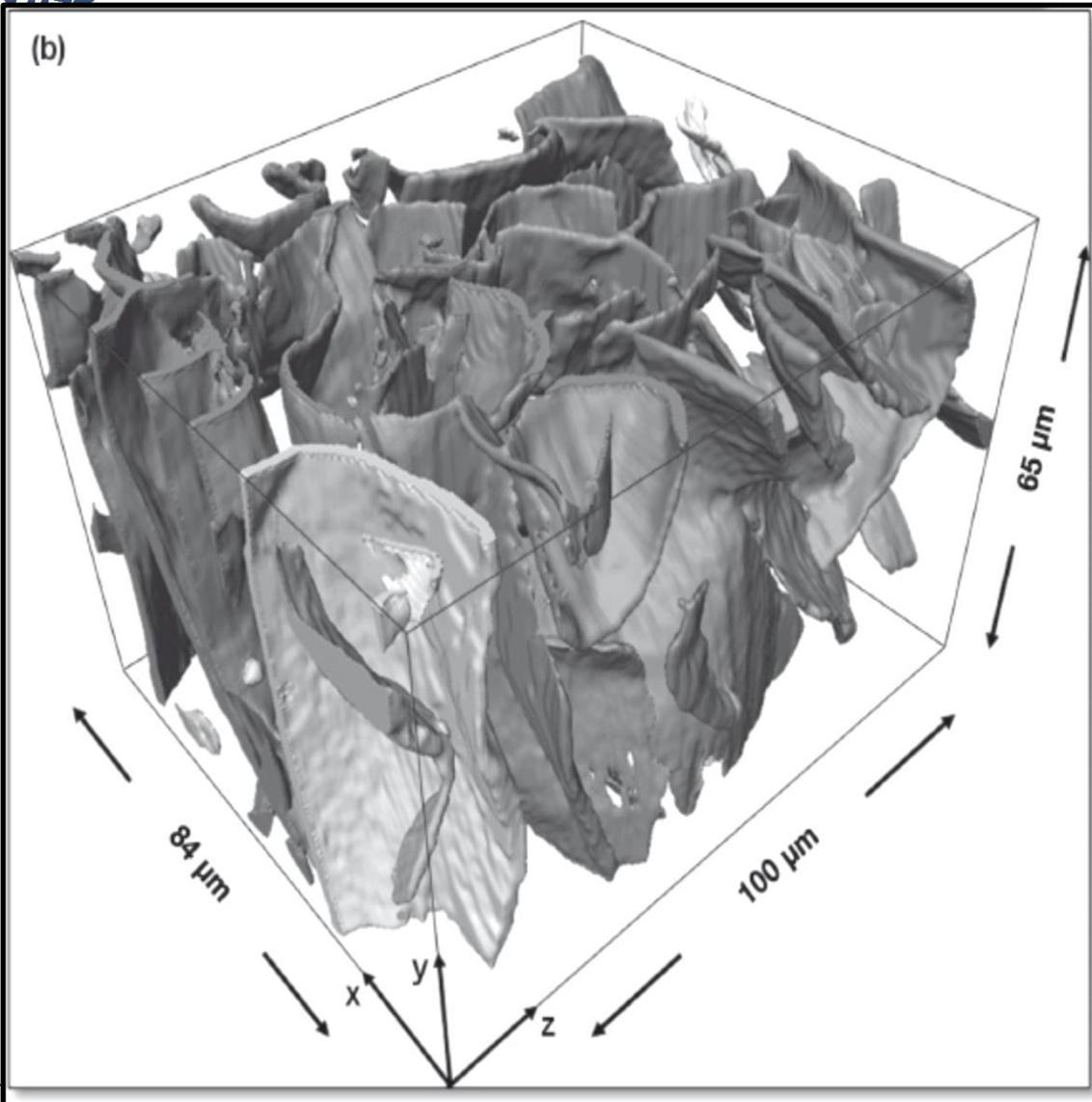


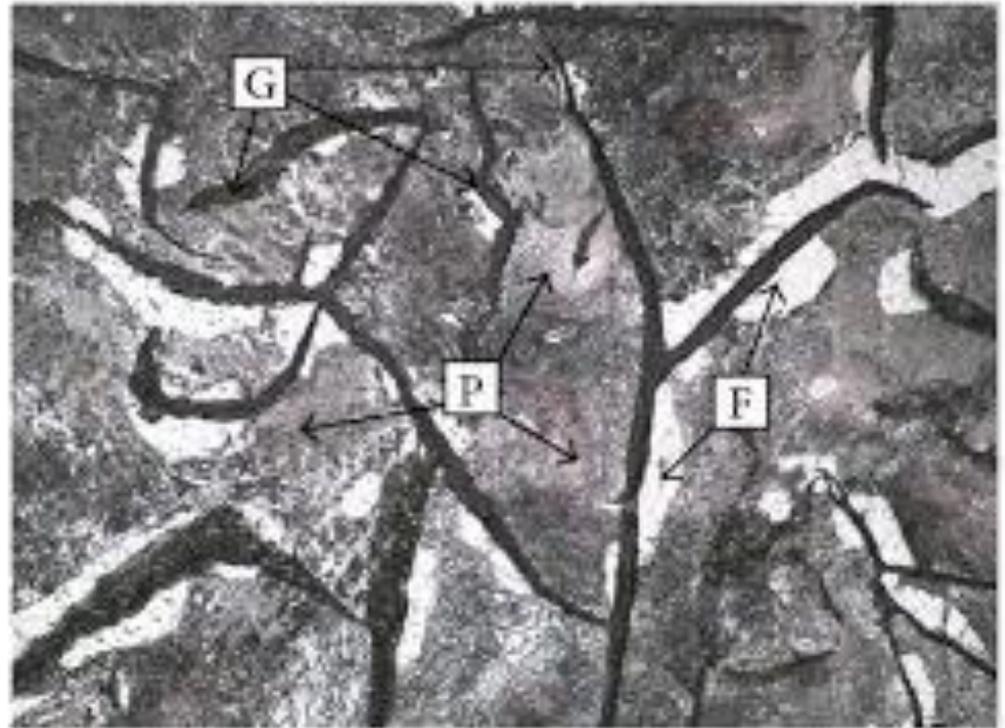
Figura 17.23(b)

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.

- 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**. Na temperatura do eutético seu **carbono equivalente é igual ao do eutético** e precipita **austenita e grafita**. Cada **agregado de austenita e grafita** é chamado **célula** ou **grão eutético**.

Ferro Fundido Cinzento Hipoeutético



- **A austenita adjacente à grafita, pobre em carbono se transforma em ferrita.**

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

Ferro Fundido Cinzento Hipoeutético

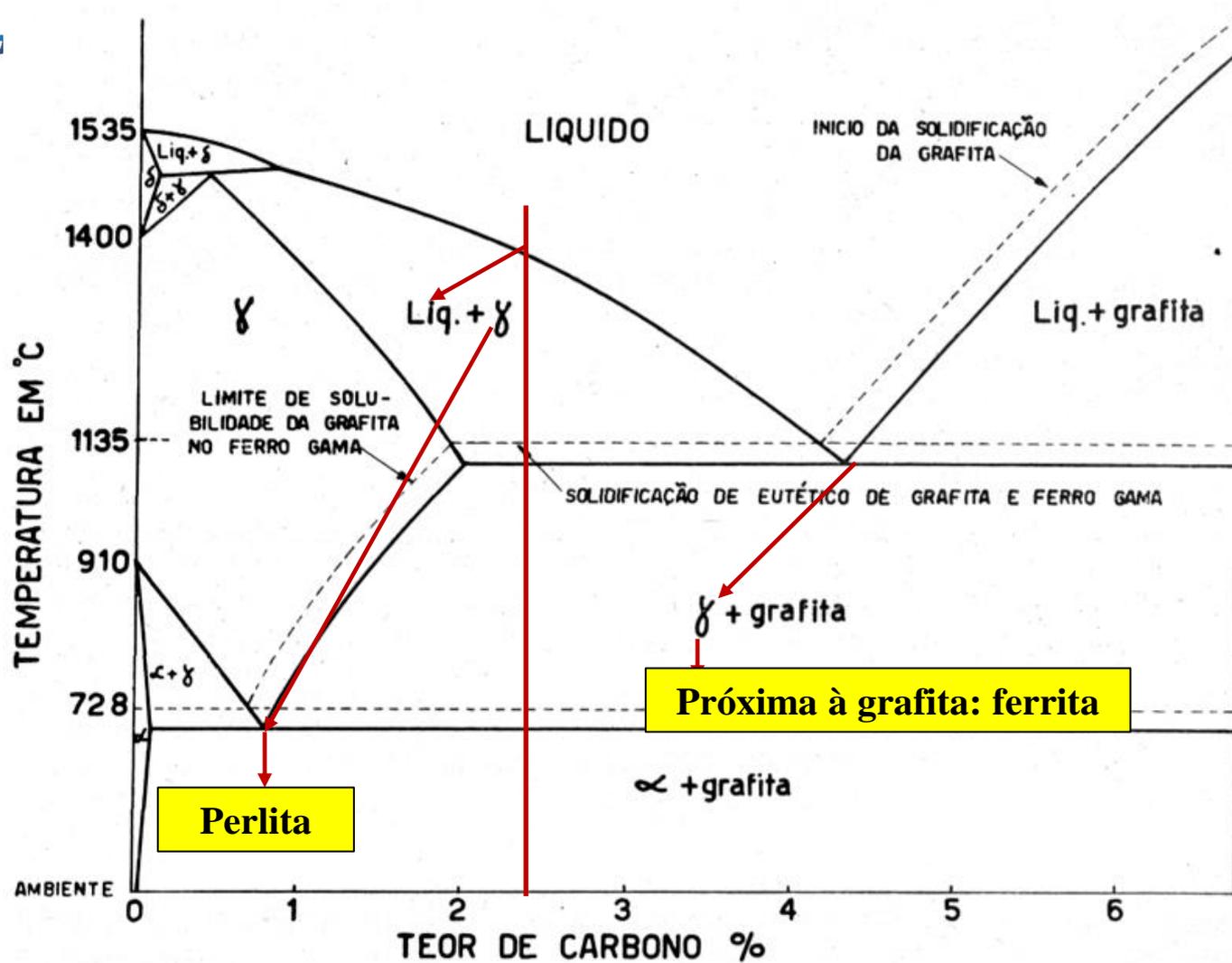
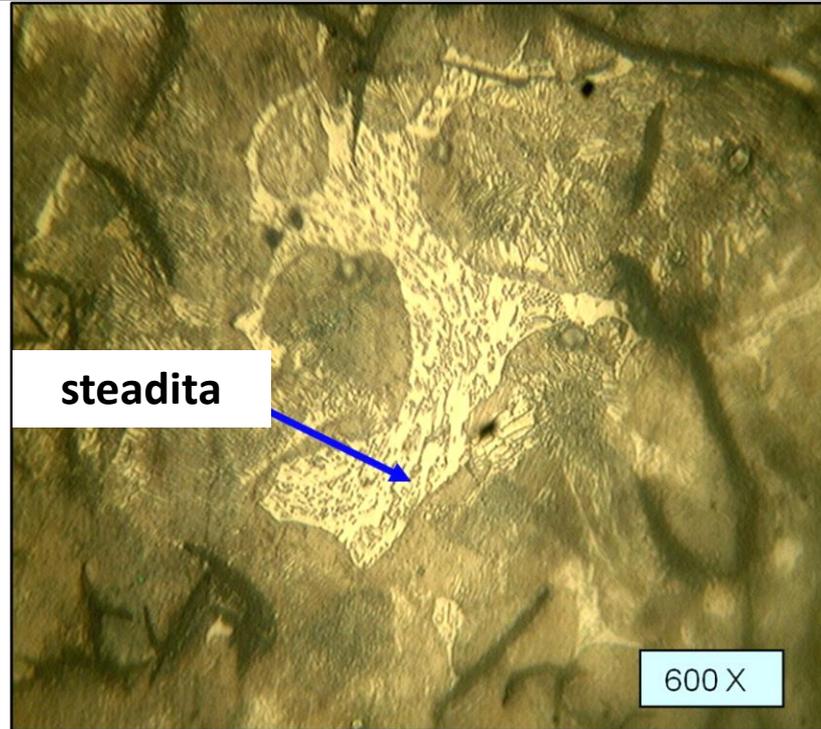


Fig. 521 — Diagrama de equilíbrio ferro-carbono simplificado mostrando em pontilhado o diagrama estável ferro-grafita.

Ferro Fundido Cinzento Eutético



•Eutético normal: Perlita e grafita.

• 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 em teores apreciáveis de **P**.

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

Ferro Fundido Cinzento Eutético

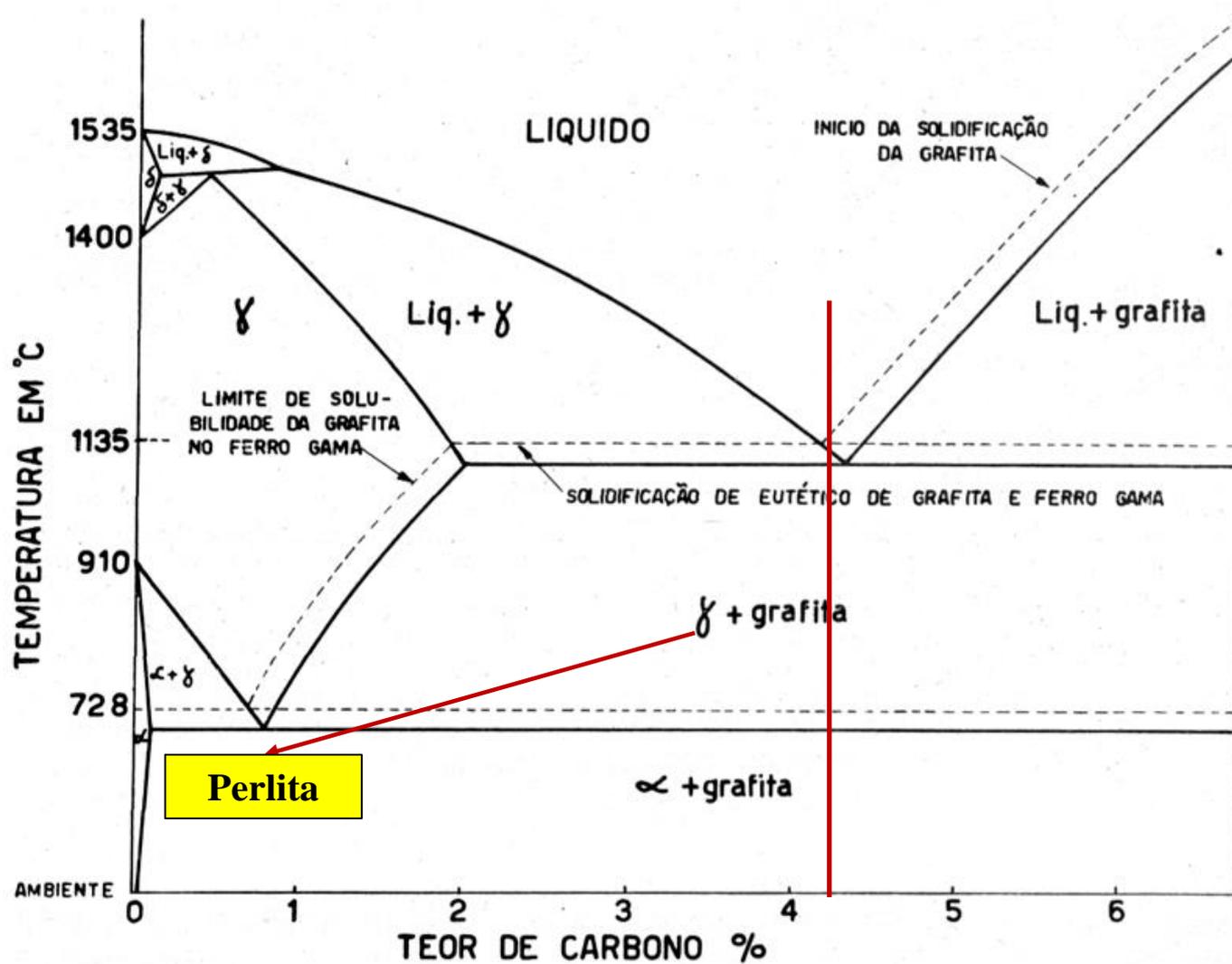


Fig. 521 — Diagrama de equilíbrio ferro-carbono simplificado mostrando em pontilhado o diagrama estável ferro-grafita.

Ferro Fundido Cinzento Hipereutético

- Nos ferros fundidos cinzentos hipereutéticos a **primeira fase** a precipitar é a **grafita hipereutética** na forma de **veios longos, retos e ramificados**.
- 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. São **veios mais espessos e retilíneos**



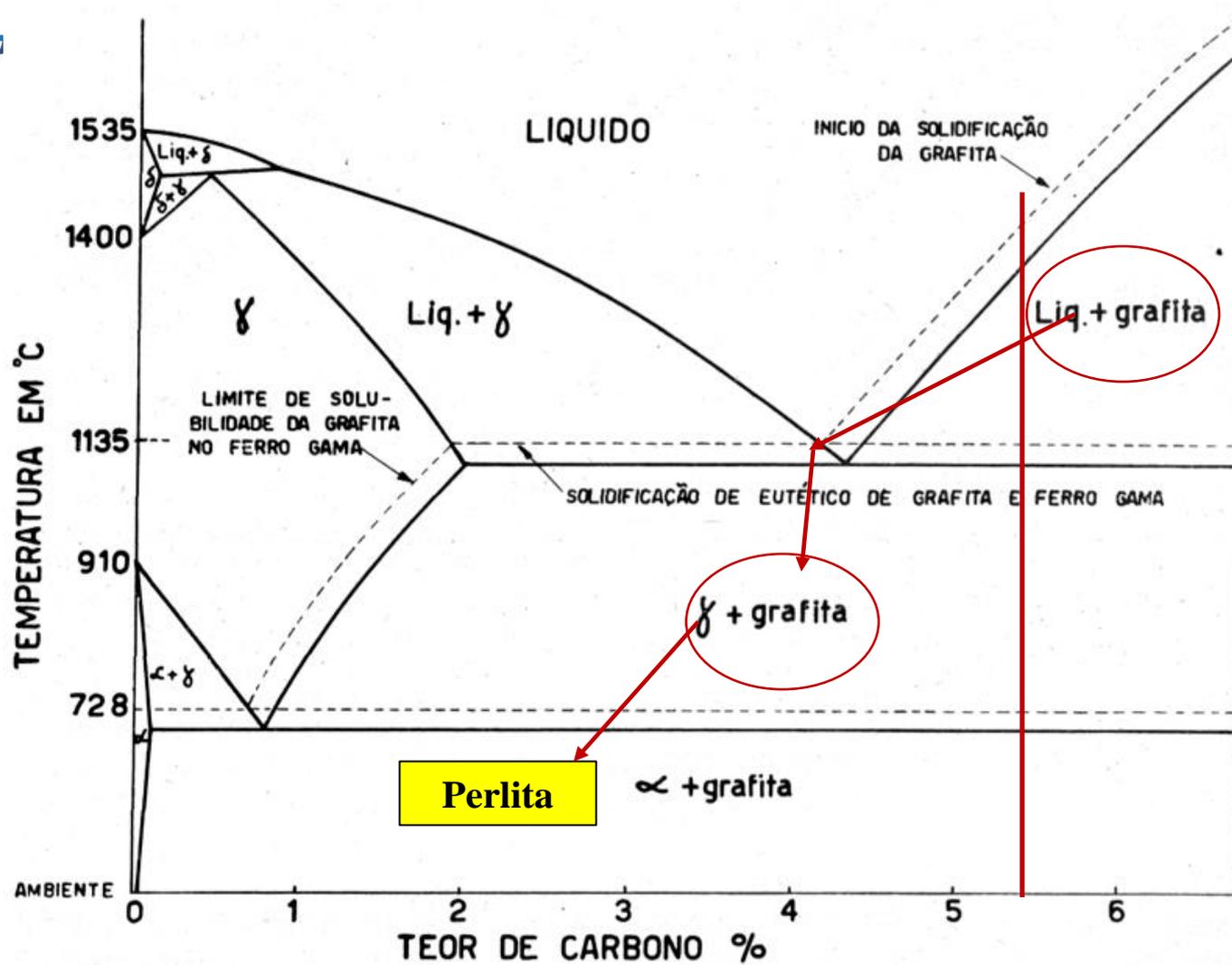


Fig. 521 — Diagrama de equilíbrio ferro-carbono simplificado mostrando em pontilhado o diagrama estável ferro-grafita.

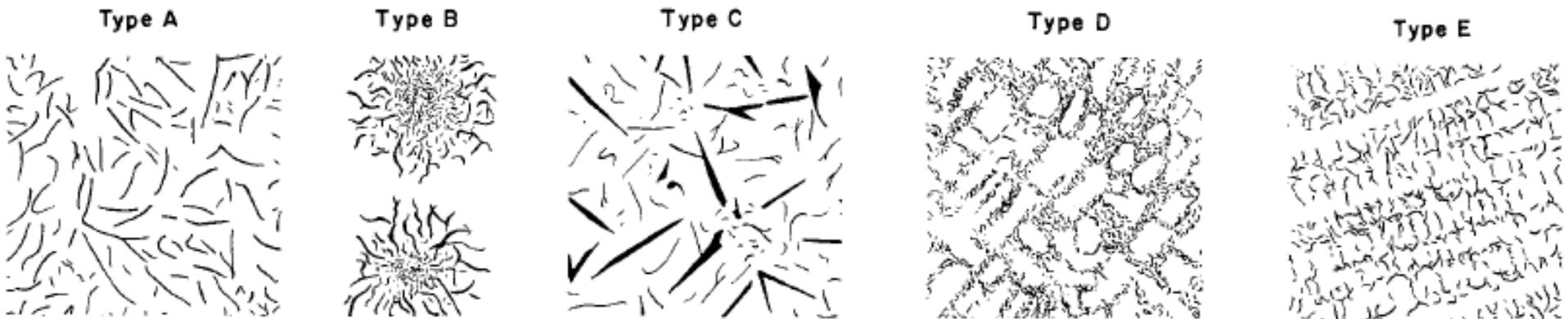
Classificação dos FoFos

As lamelas de grafita podem ser **grossas ou finas** e de diversas **formas e tamanhos**, dependendo da **velocidade** de resfriamento, **composição** química e outros. **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**.

ASTM A 247

Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings

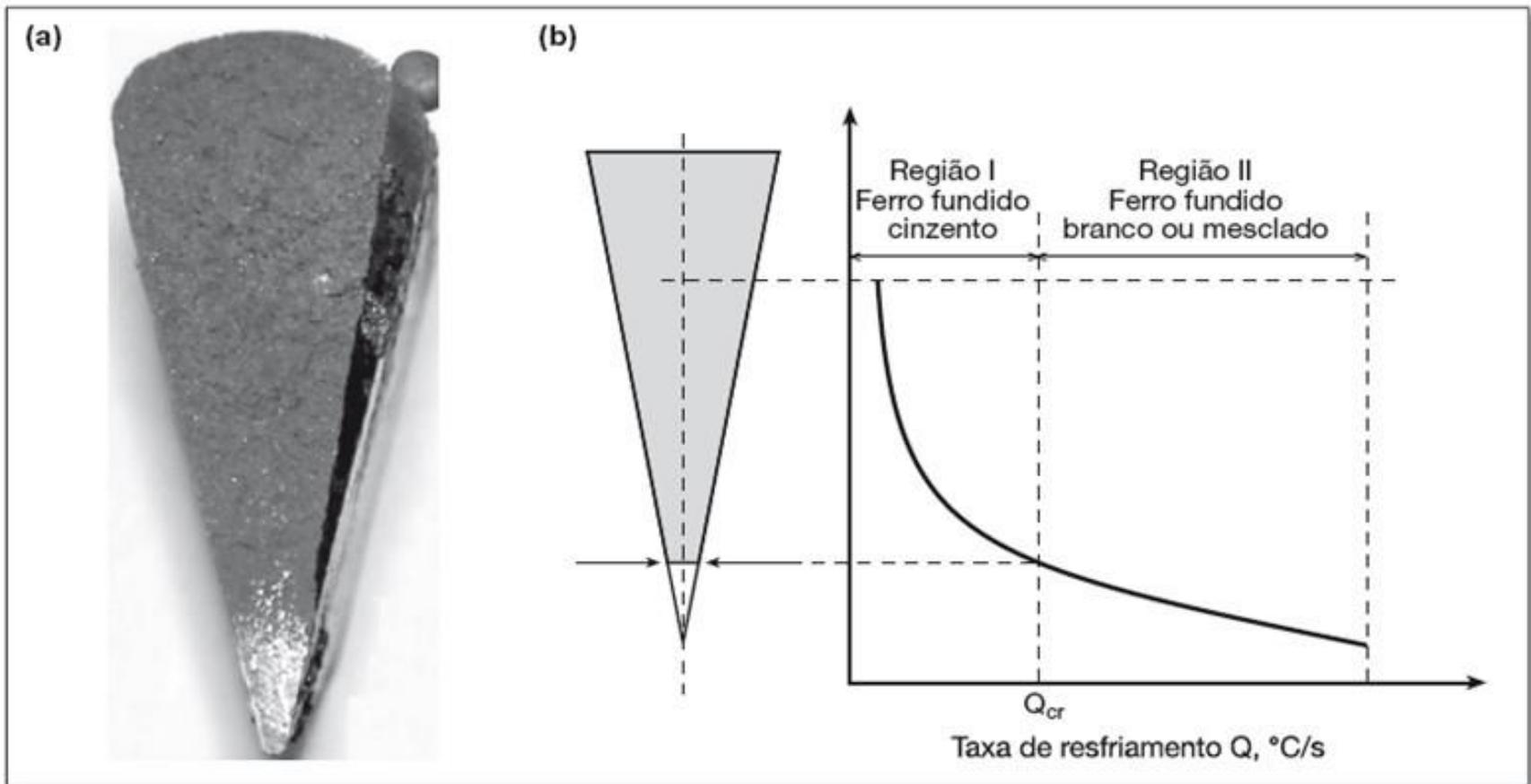


A 48/A 48M – 03 Standard Specification for Gray Iron Castings

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

Ferro Fundido Mesclado

Combinação dos ferros fundidos **cinzento e branco**: **grafita lamelar e cementita**. Superfície de **fratura**: **cinzenta brilhante**. Obtenção: **coquilhamento** (solidificação em molde metálico)



Teste da fundição de cunhas: varia espessura/ velocidade de resfriamento



Ferro Fundido Mesclado

Propriedades

- Resistência ao desgaste e alta dureza (FoFo Branco);
- Capacidade de amortecimento de vibrações e condutividade térmica (FoFo cinzento);

Aplicações

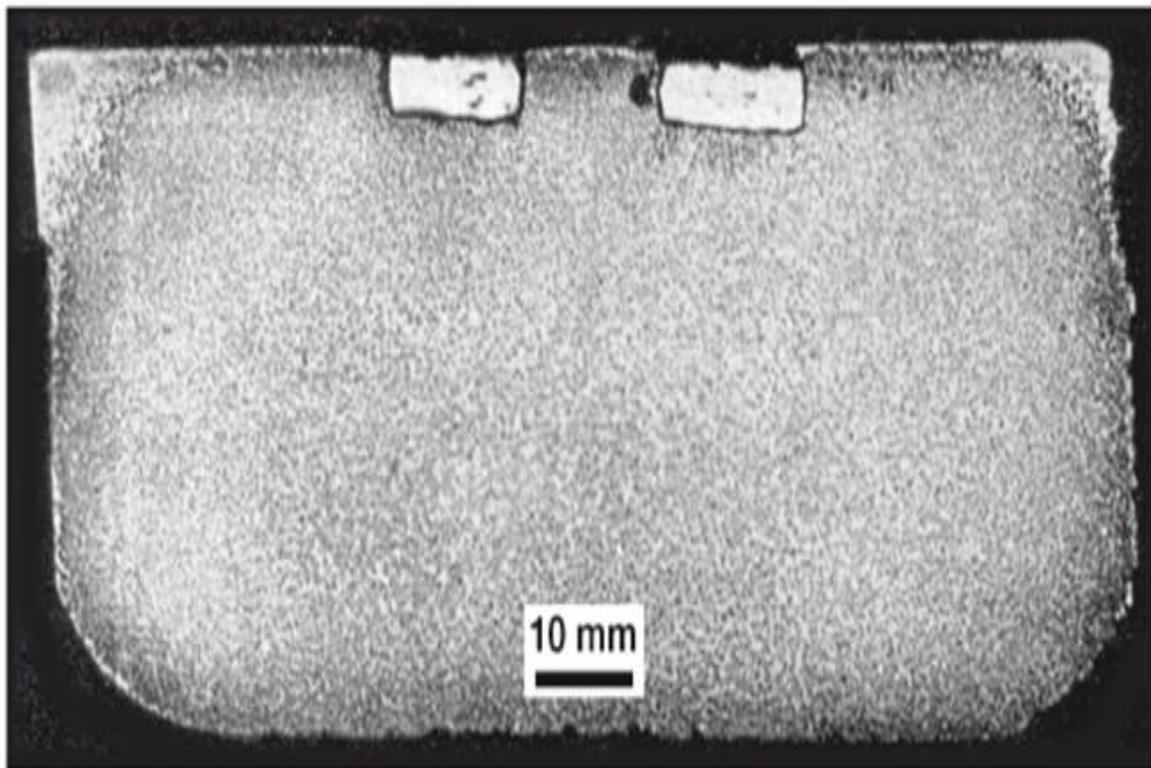
- Peças ferroviárias (sapata de freio);
- Cilindros de laminação;
- Não muito utilizado atualmente, devido ao desenvolvimento de novos FoFos.

Ferro Fundido Mesclado

Exemplo de aplicação

Figura 17.67

Seção transversal de uma sapata de freio antiga, de ferro fundido mesclado. As arestas, na parte superior da figura, resfriaram mais rapidamente e resultaram em ferro fundido branco. A macrografia indica a presença de duas barras de aço de baixo carbono, que são fundidas como insertos da peça e se destinam a evitar que, em caso de fratura da sapata, fragmentos grandes se desprendam. Ataque: Iodo.



IMPRESSÃO DE BAUMANN
IMPRESSÃO DE ENXOFRE

Ferro fundido mesclado: composição e resfriamento intermediários

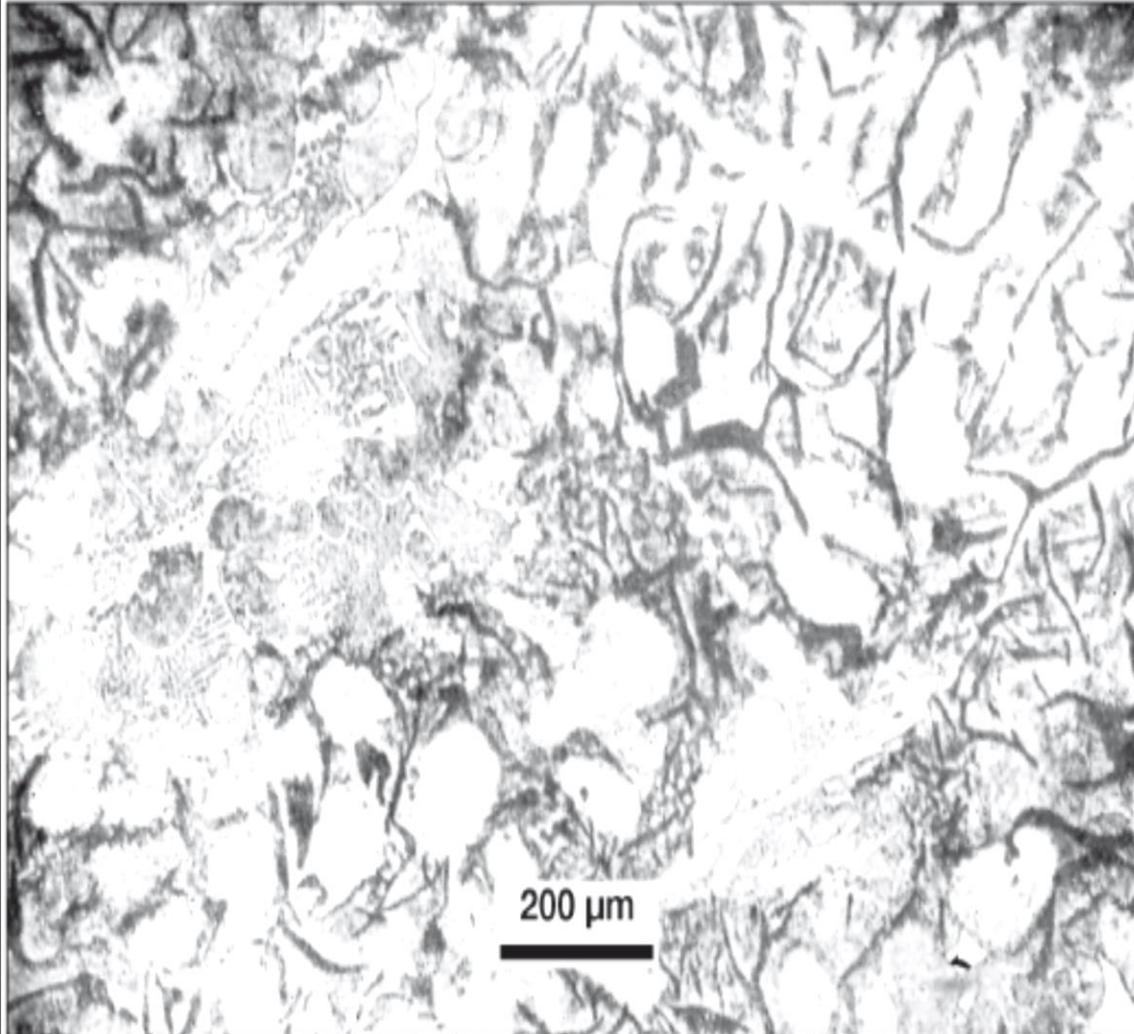


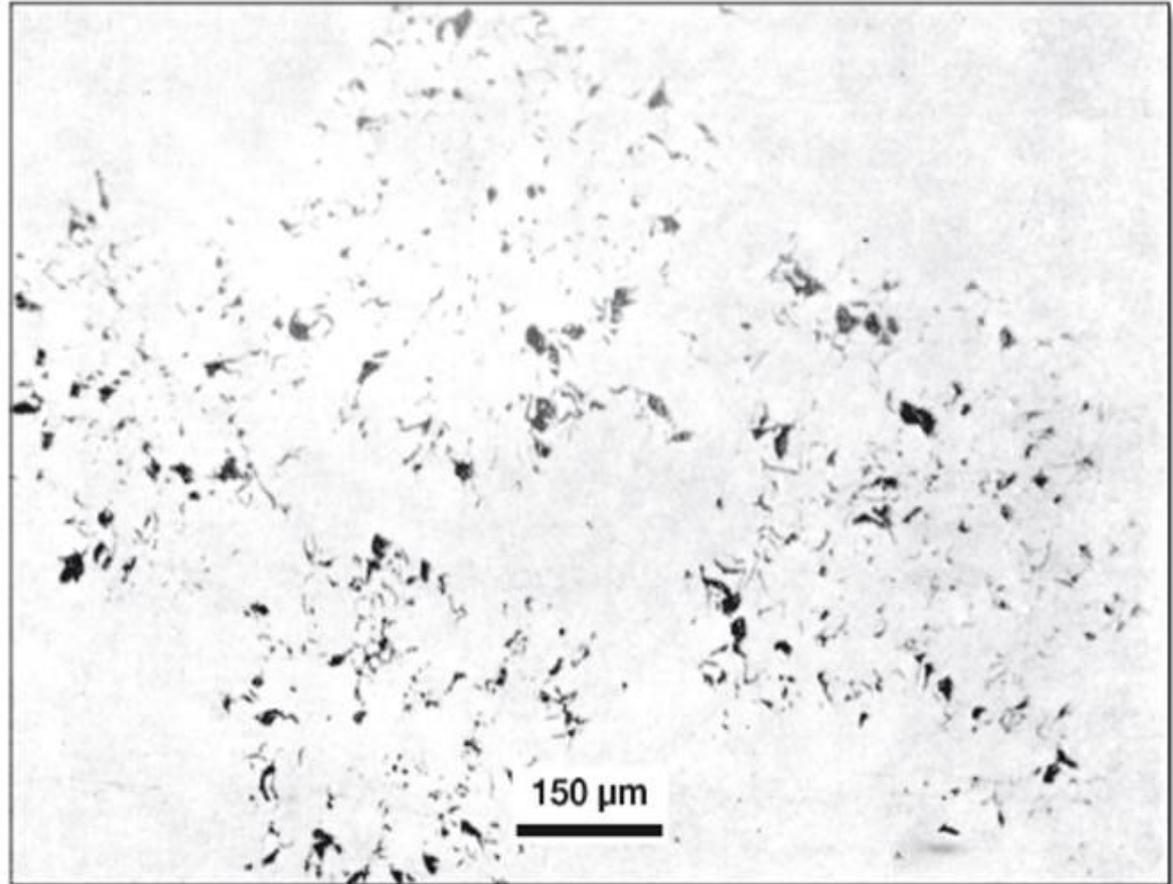
Figura 17.66

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

Ferro Fundido Mesclado

Figura 17.63

Ferro fundido mesclado. Agrupamentos de grafita (regiões "cinzentas") e regiões sem grafita (regiões "brancas"). Sem ataque.



Ferro Fundido Mesclado

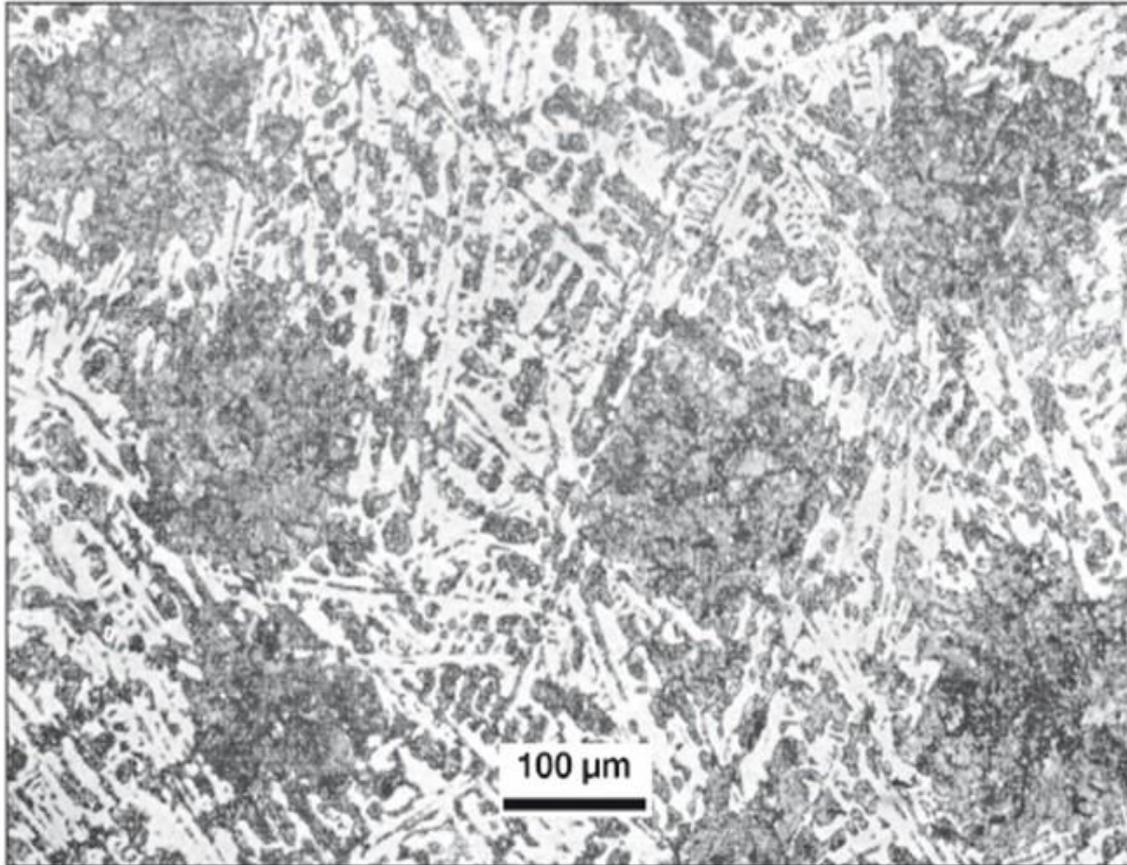


Figura 17.65

Ferro fundido mesclado. Áreas escuras são regiões de ferro fundido cinzento. O restante da seção é ferro fundido branco. Ataque: Picral.

Ferro Fundido Nodular

Propriedades

- **Boa combinação de resistência, tenacidade e ductilidade;**
- **Boa resistência ao impacto;**
- **Boa resistência ao desgaste;**
- **Boa usinabilidade;**
- **Boa soldabilidade.**

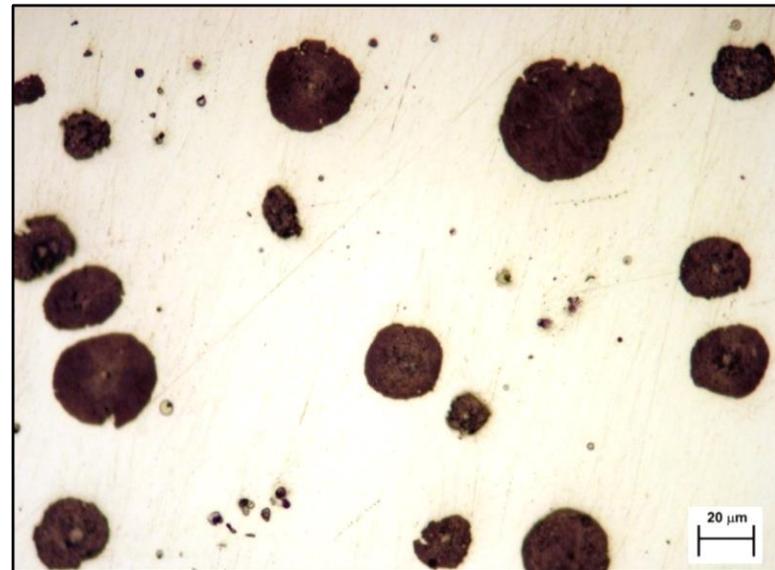
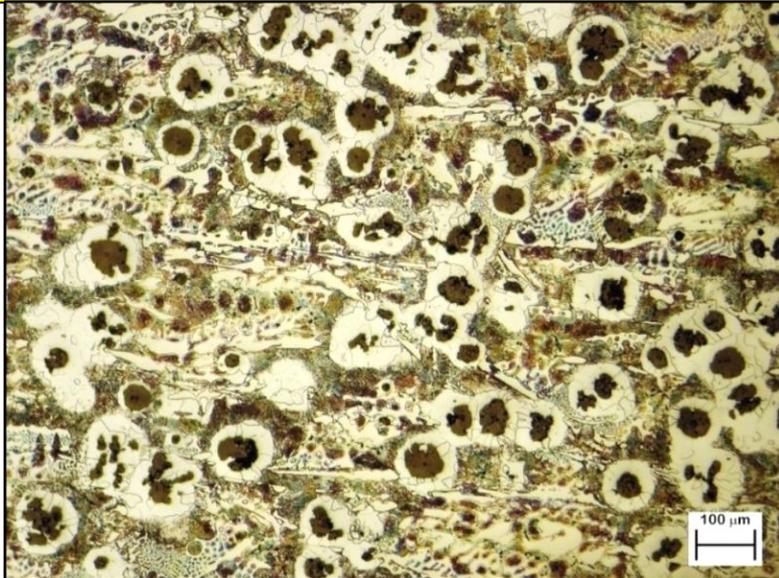
Aplicações

- **Engrenagens;**
- **Peças automotivas;**
- **Peças ferroviárias;**
- **Válvulas.**

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

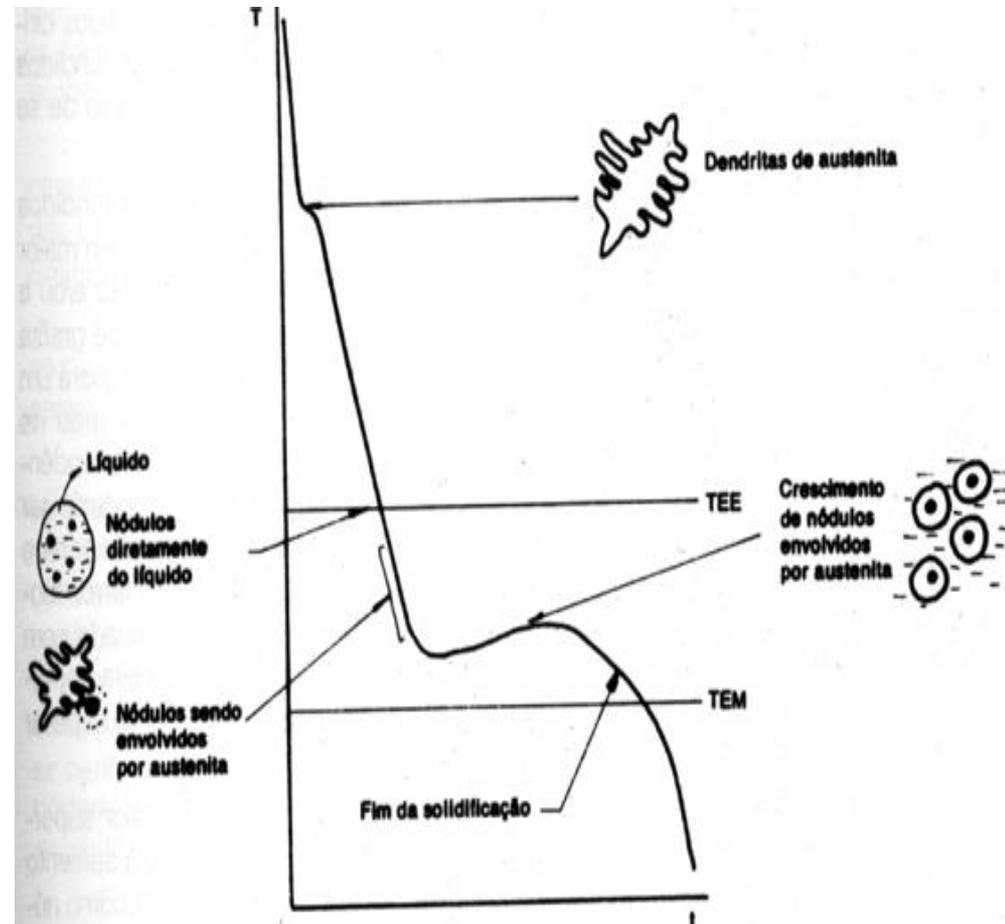
Impurezas, tais como o “**P**” e o “**S**”, dentre outras, devem ser mantidas em níveis **muito baixos**, uma vez que interferem com a formação dos nódulos.



Ferros Fundidos Nodulares – Sequência de solidificação

✓ **Hipoeutéticos:** Formação de **dendritas de austenita**. A temperatura **diminui**, o líquido que sobrou torna-se mais rico em carbono e silício. Abaixo da temperatura do eutético, ocorre a **formação de nódulos de grafita** que são posteriormente **envolvidos pela austenita**

✓ **Hipereutéticos:** formação da **grafita nodular**. A temperatura diminui, a composição do **líquido residual** se aproxima da eutética. Abaixo da **temperatura do eutético** formam-se **mais nódulos de grafita** que são posteriormente **envolvidos por austenita**.



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

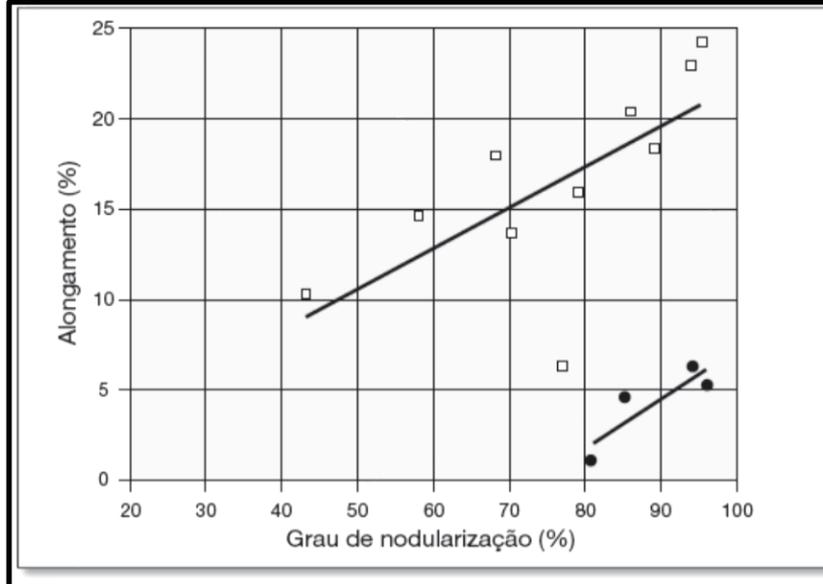
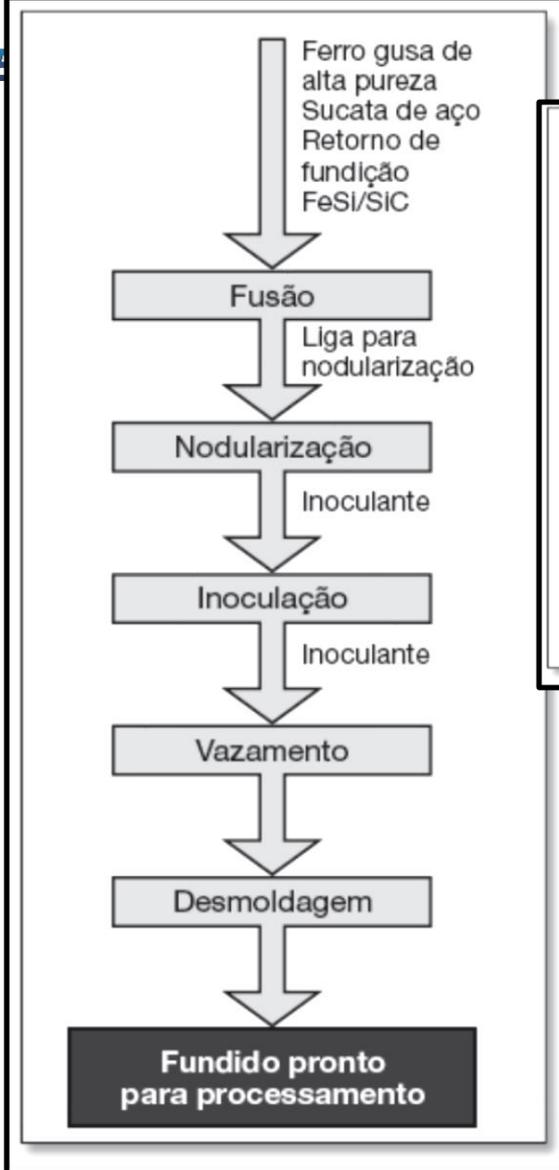


Figura 17.77

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].

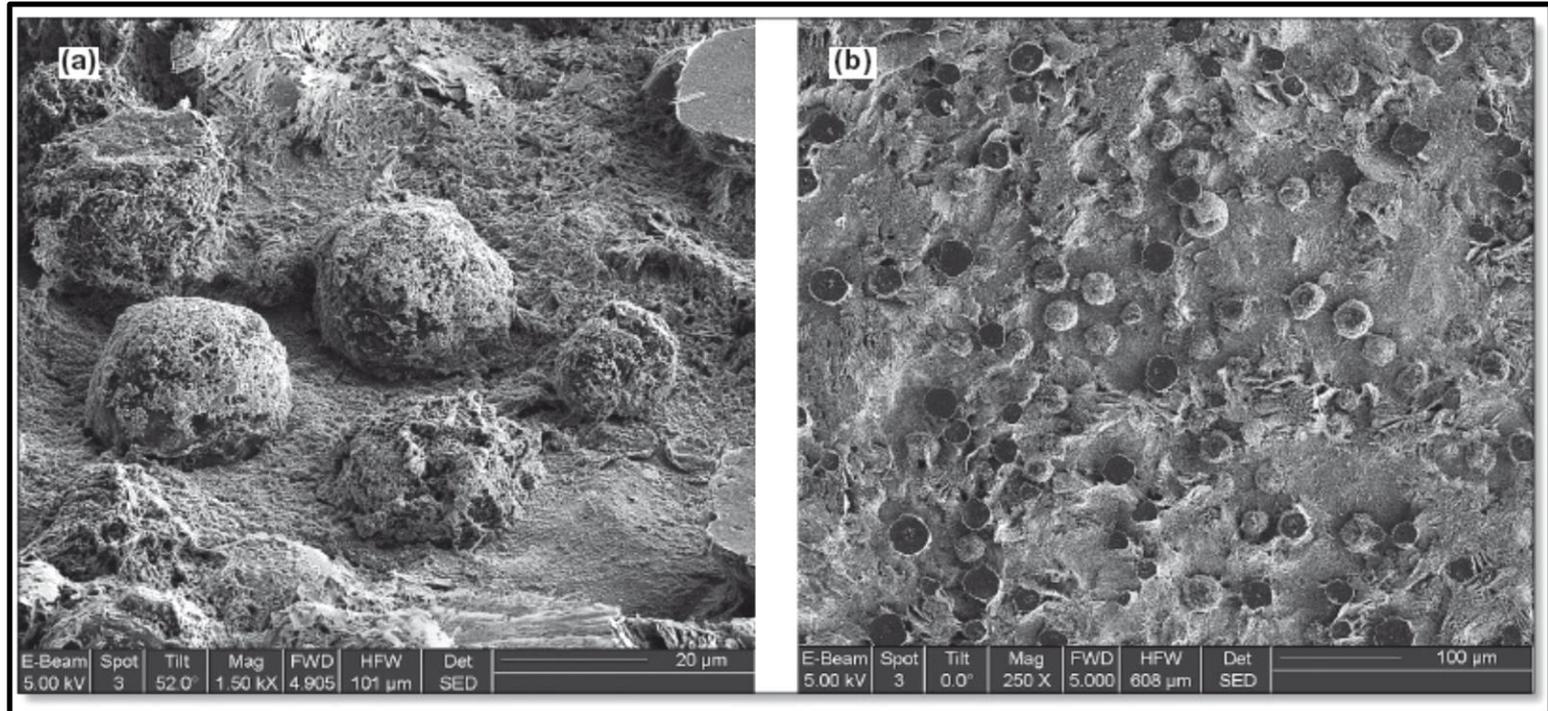


Figura 17.78(a) e (b)

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.

(c)

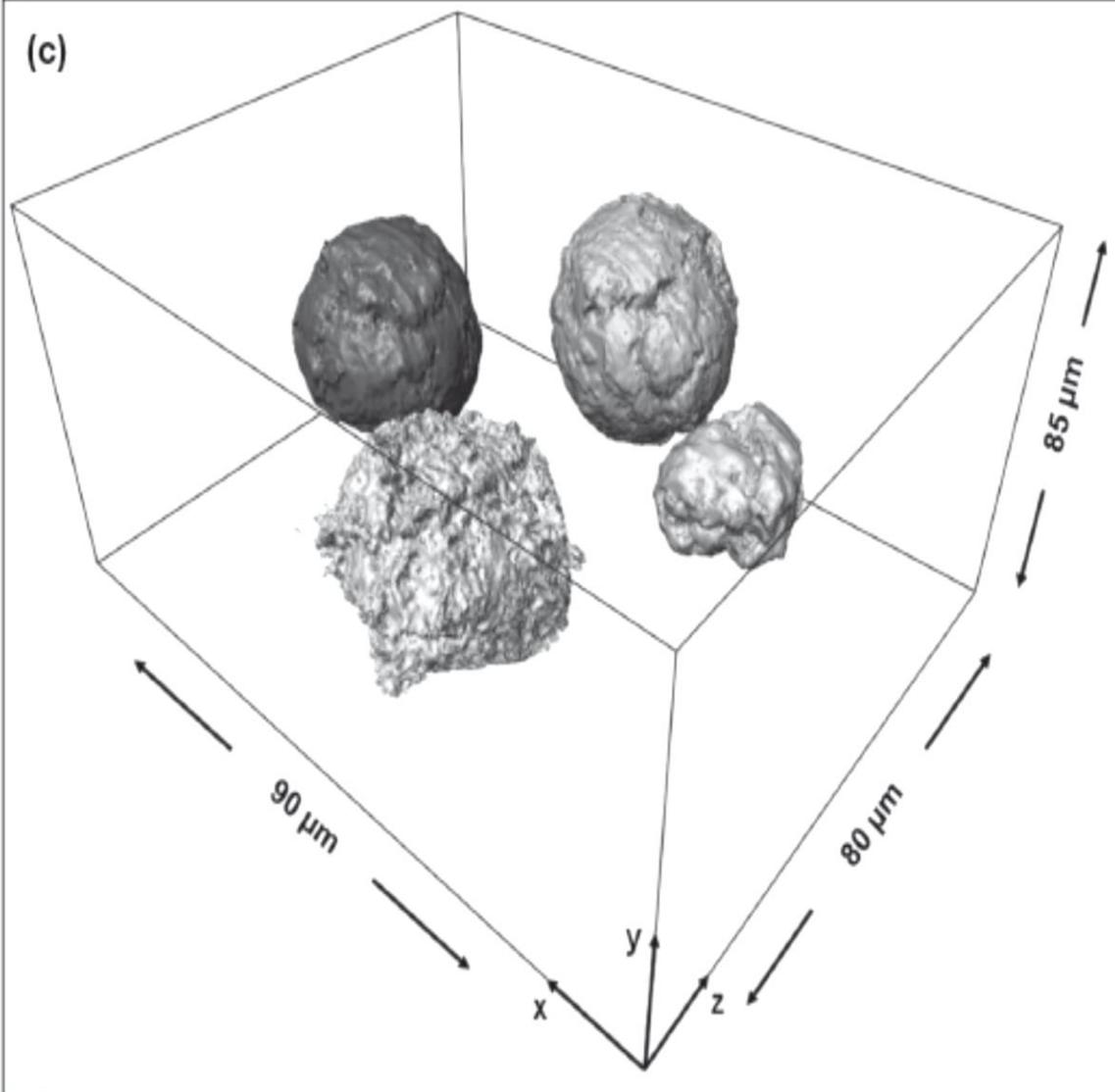


Figura 17.78(c)

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

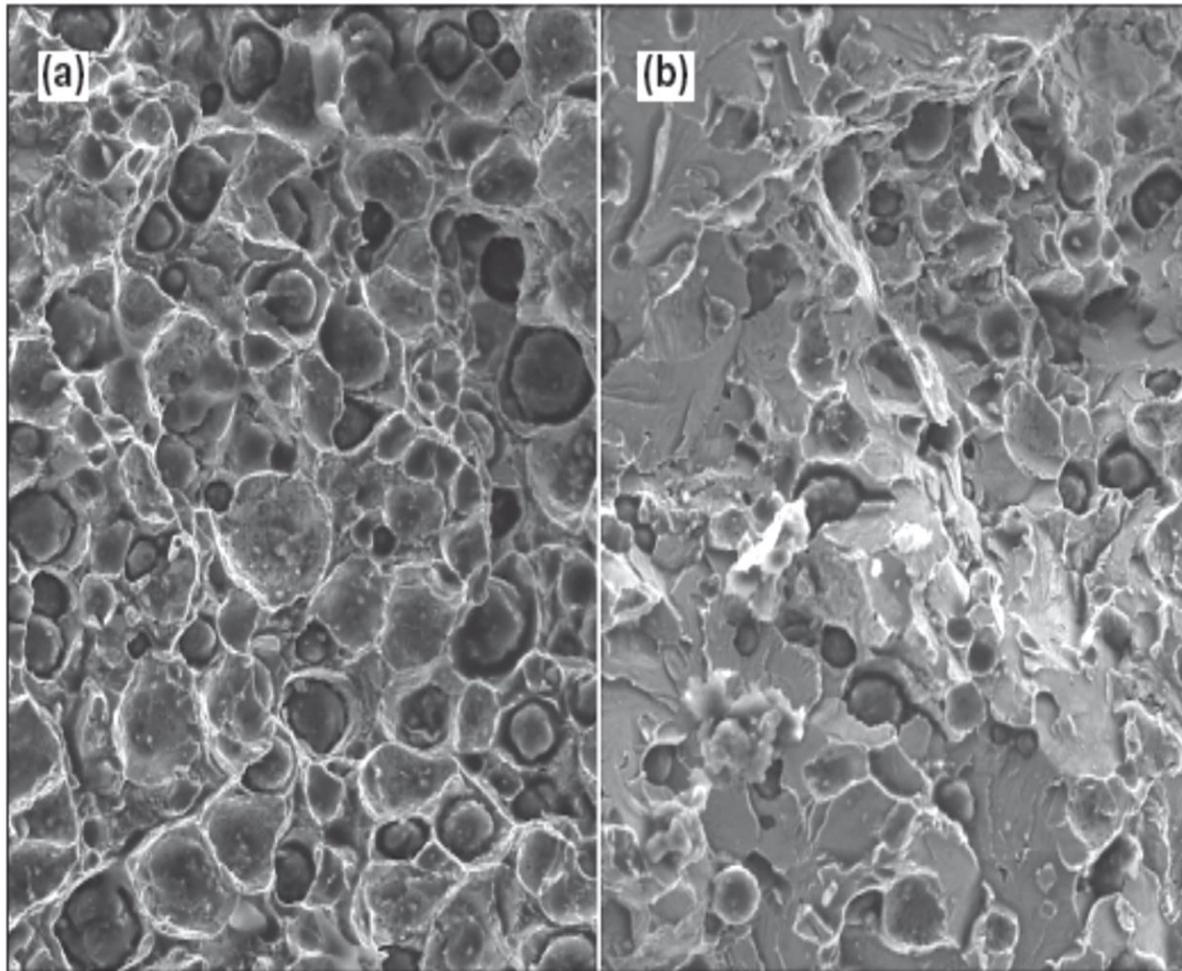


Figura 17.79

(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 Investigación Metalúrgica, Durango, Bizkaia, Espanha.

Tabela 17.4

Propriedades mínimas especificadas para ferros fundidos nodulares e as microestruturas típicas associadas [16].

Norma	Categoria de propriedades			
EN 1563 e ISO 1083 (Ruptura, MPa Alongamento, %)	350-22 400-18 400-15	450-10 500-7 600-3	700-2	900-2
ASTM A 536 Ruptura, ksi, Escoamento, ksi, Alongamento, %	60-40-18 60-42-10 65-45-12	70-50-05 80-55-06 80-60-03	100-70-03	
	Microestruturas típicas			
	Ferrita	Ferrita + Perlita	Perlita	Martensita Revenida



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 (Fe_3C) transformam-se em grafita (nódulos de carbono).

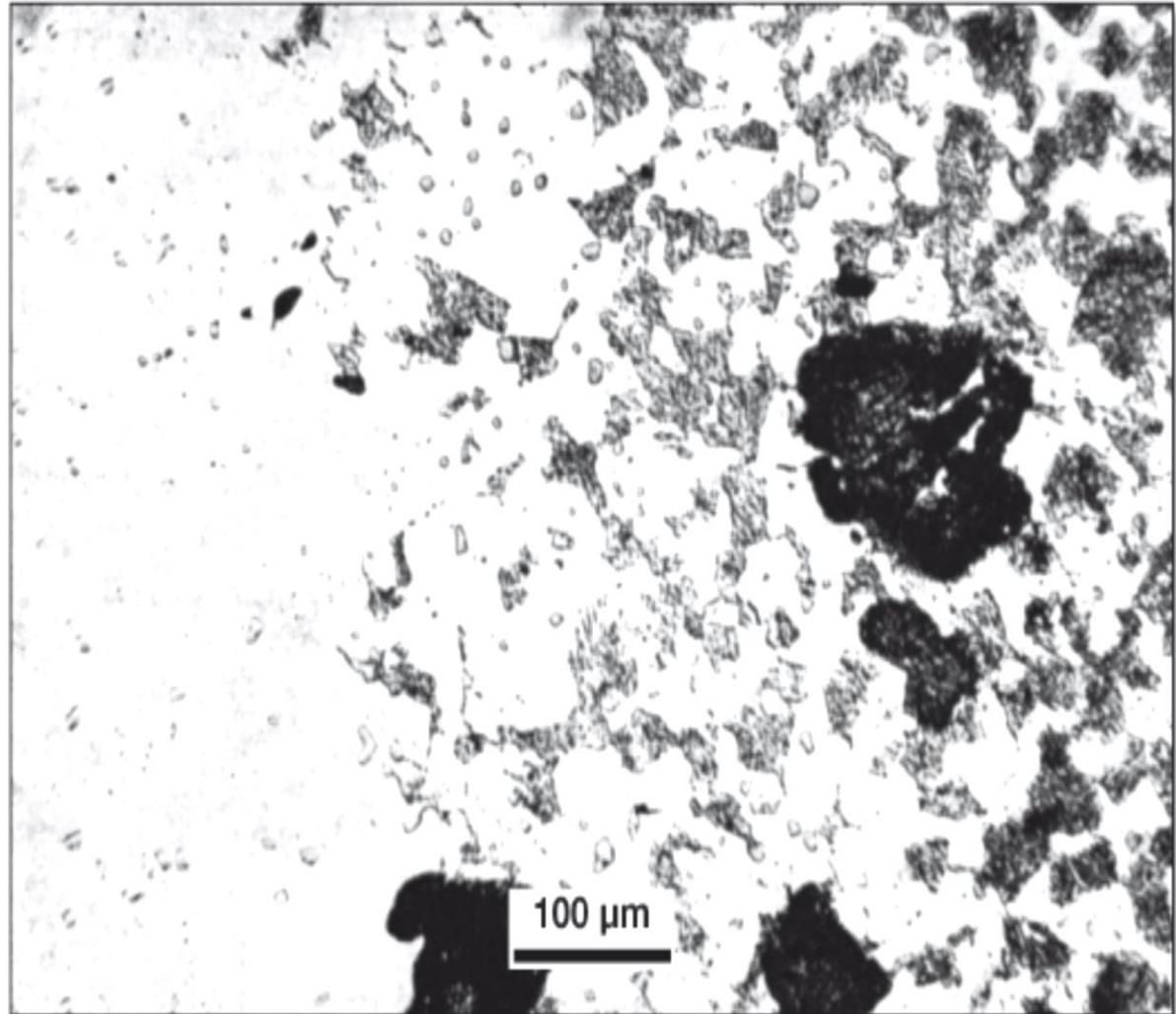
A matriz depende da velocidade de resfriamento, após o tempo de encharque para a grafitização:

- Fofa Maleável **Ferrítico**: 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, com posterior revenimento.

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.

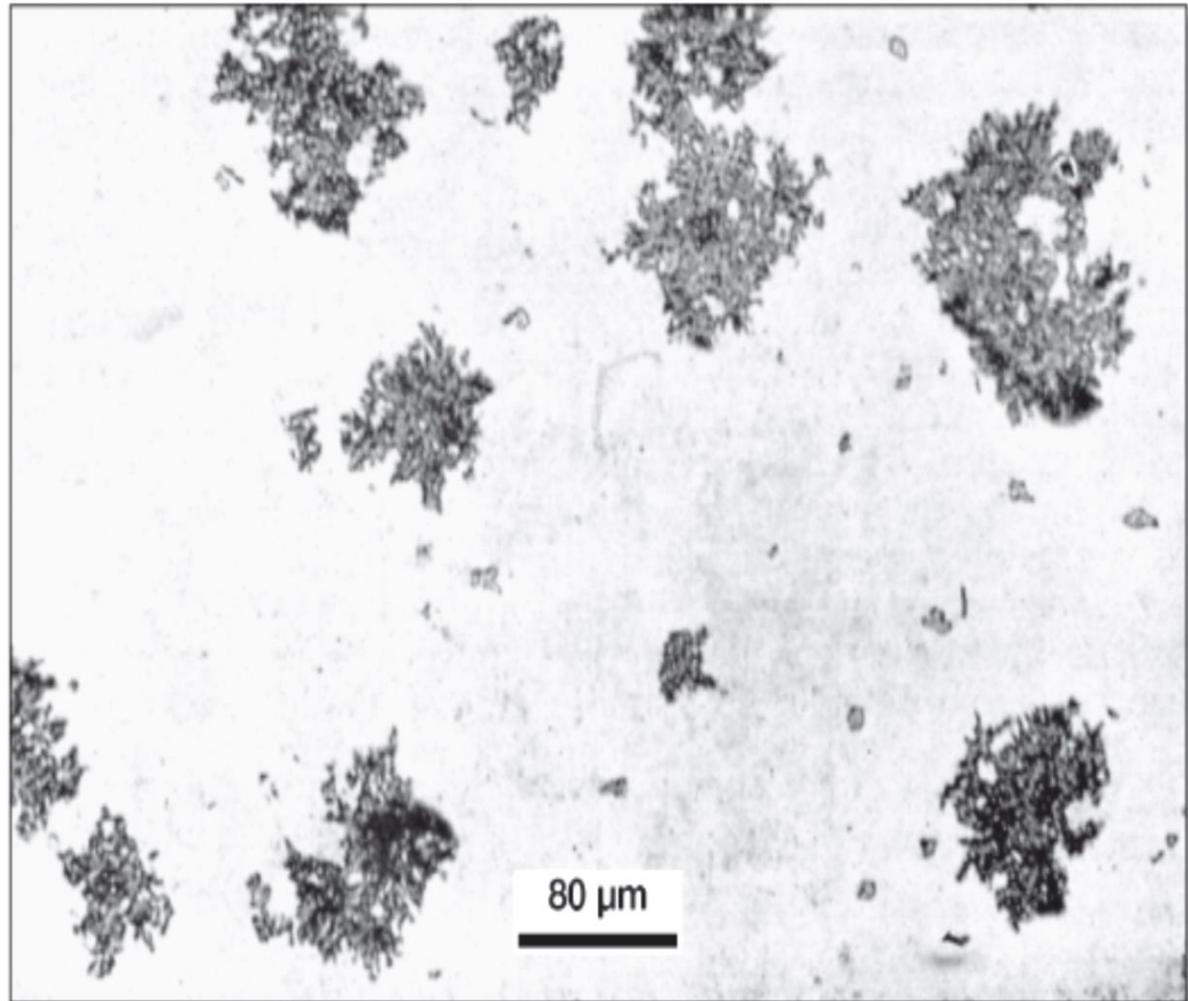


Nódulos de grafita difusos

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

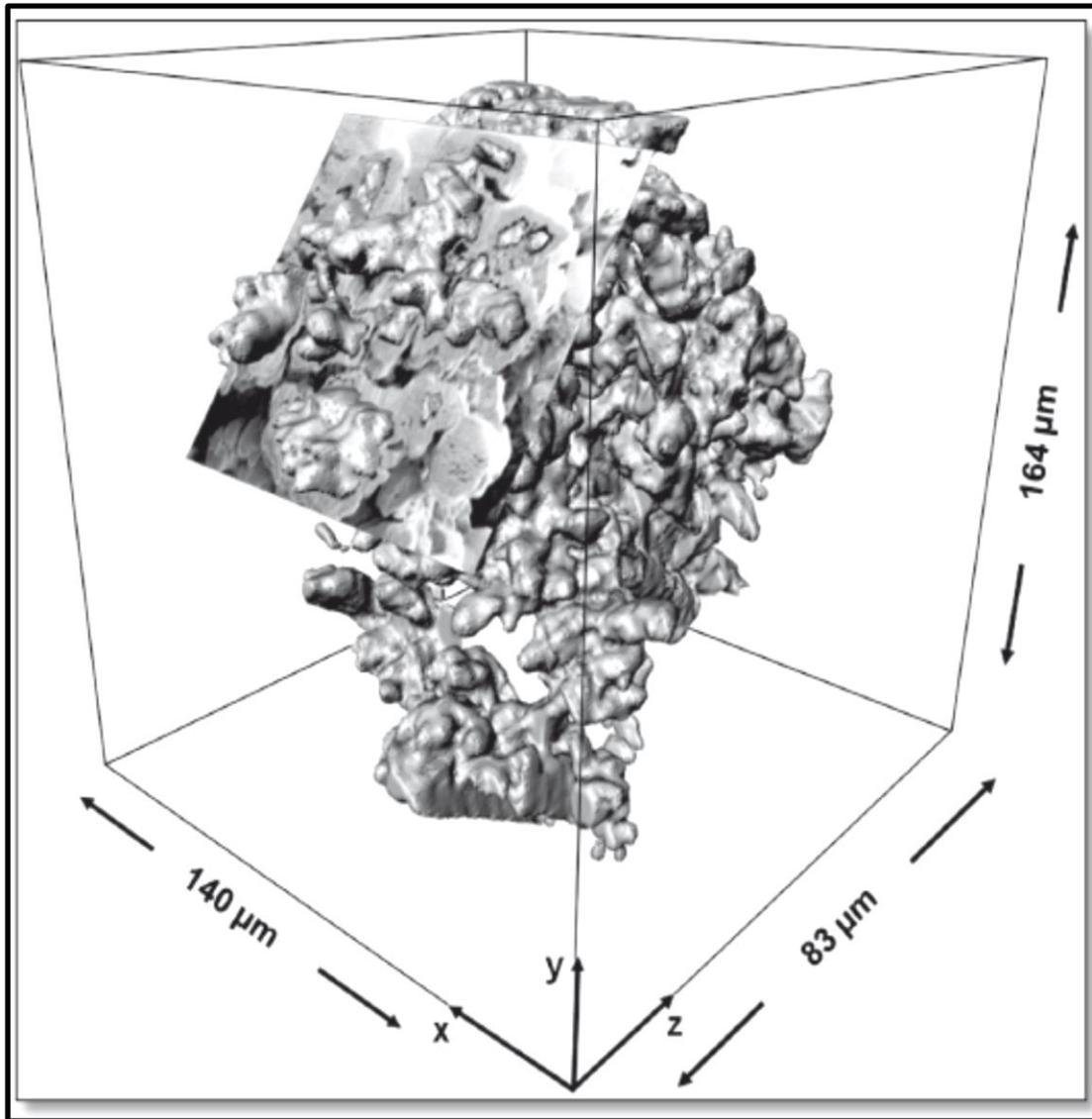


Figura 17.101

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

TRATAMENTO TÉRMICO TÍPICO PARA OBTENÇÃO DE F₀F₀ MALEÁVEL FERRÍTICO

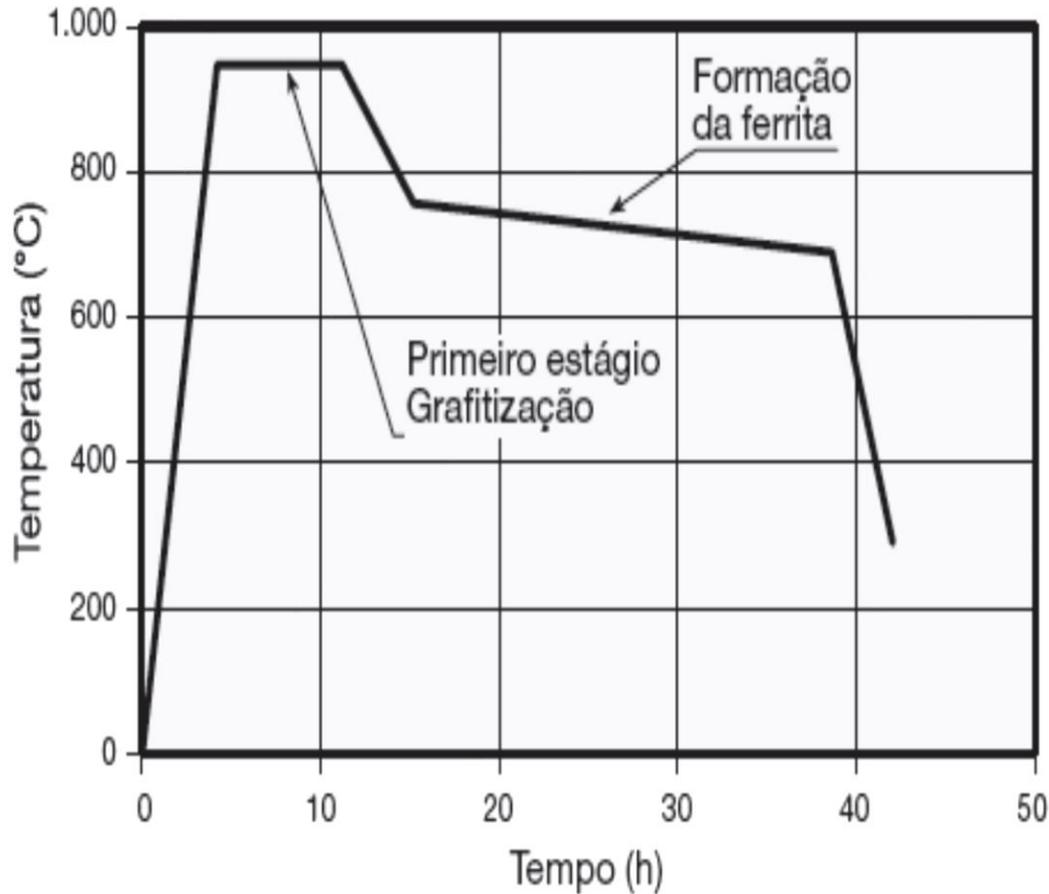


Figura 17.103

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 PERLÍTICO

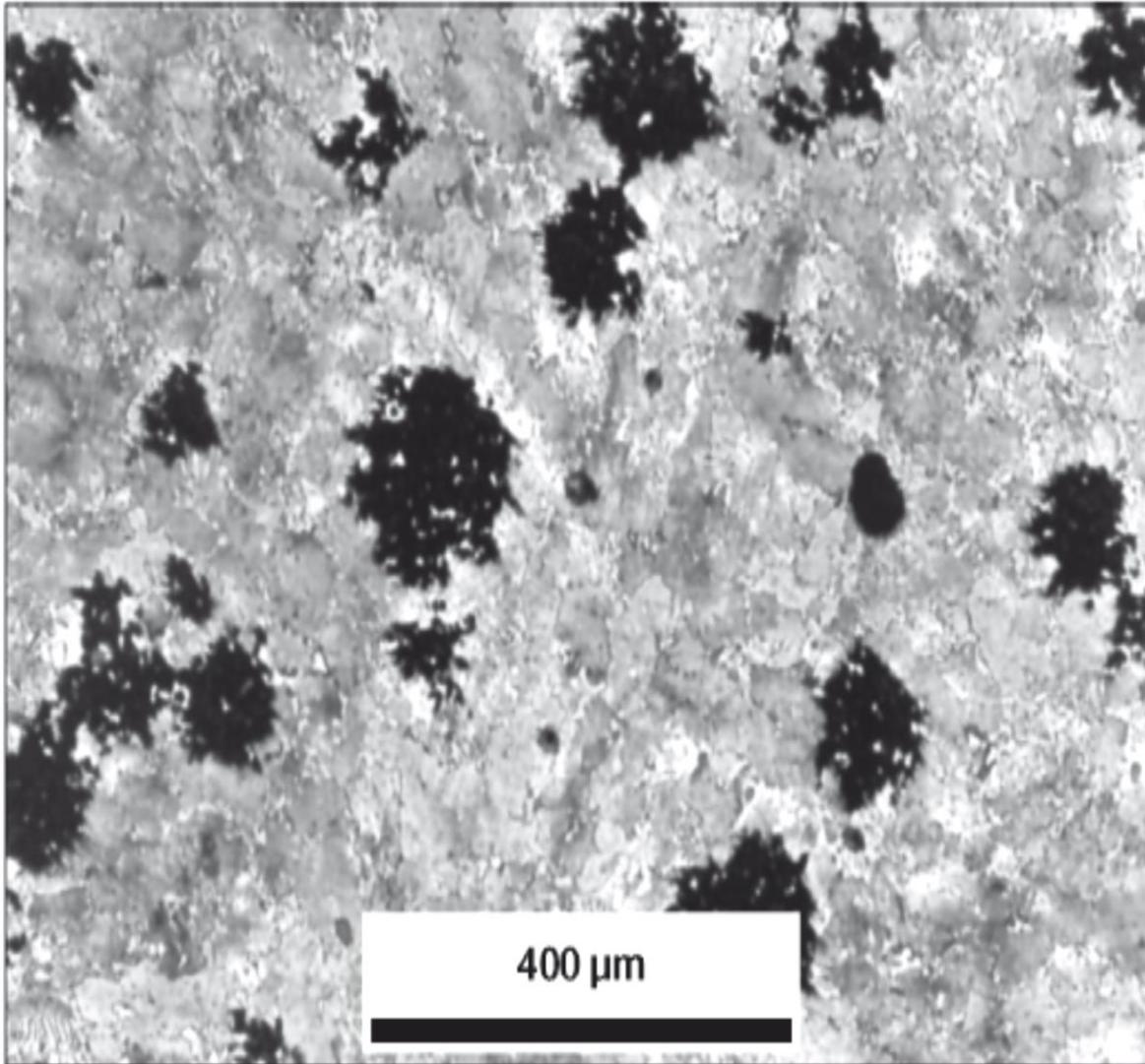


Figura 17.114

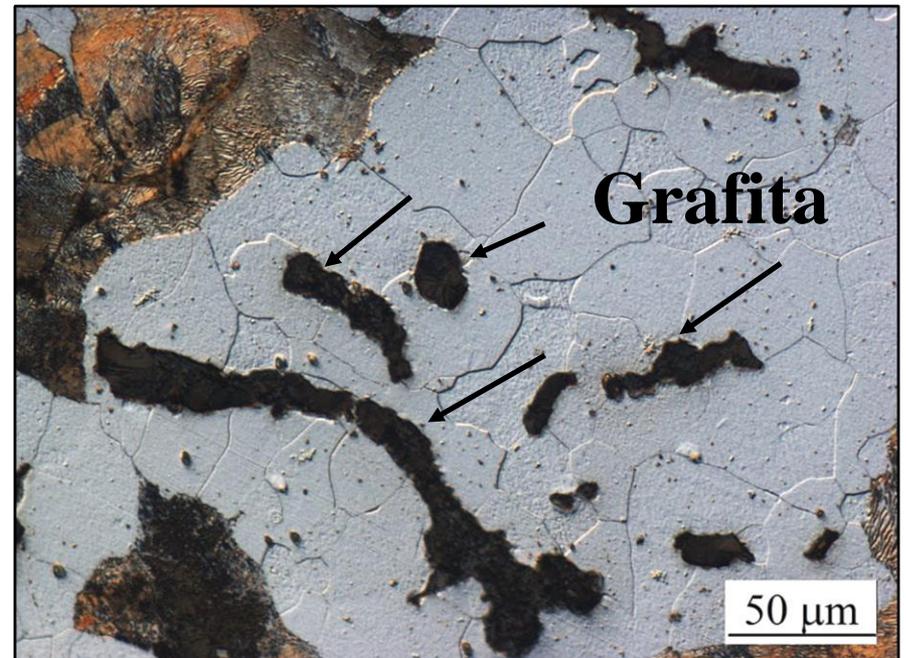
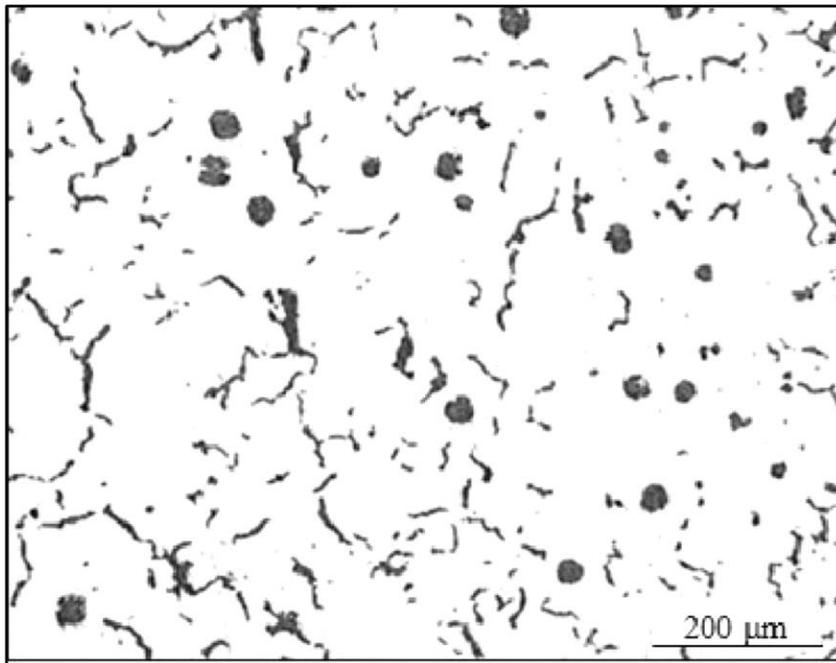
Ferro fundido maleável de núcleo preto, perlítico. Nódulos de grafita em matriz perlítica. Algumas pequenas regiões de ferrita. Cortesia de DoITPoOS, Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge [46].

Ferro Fundido Vermicular (Compacted Graphite Iron)



- **Desenvolvido** sincronicamente ao **Nodular**;
- **Estrutura:** forma de **grafita intermediária** entre veios e nódulos, conhecida geralmente por **vermicular**;
- Limite de resistência à **tração** entre **30 e 60 kgf/mm²**, **alongamento** de **1 a 9%** e **dureza** de **150 a 250HB**;
- **Processo** de obtenção com **inoculantes**. **Ex:** adição de **magnésio (ligas Fe-Si-Mg)** em **teores inferiores** ao necessário para a **formação de nódulos** de grafita, porém, **suficientemente altos** para **evitar** a formação de **veios**.

Ferro Fundido Vermicular (Compacted Graphite Iron)

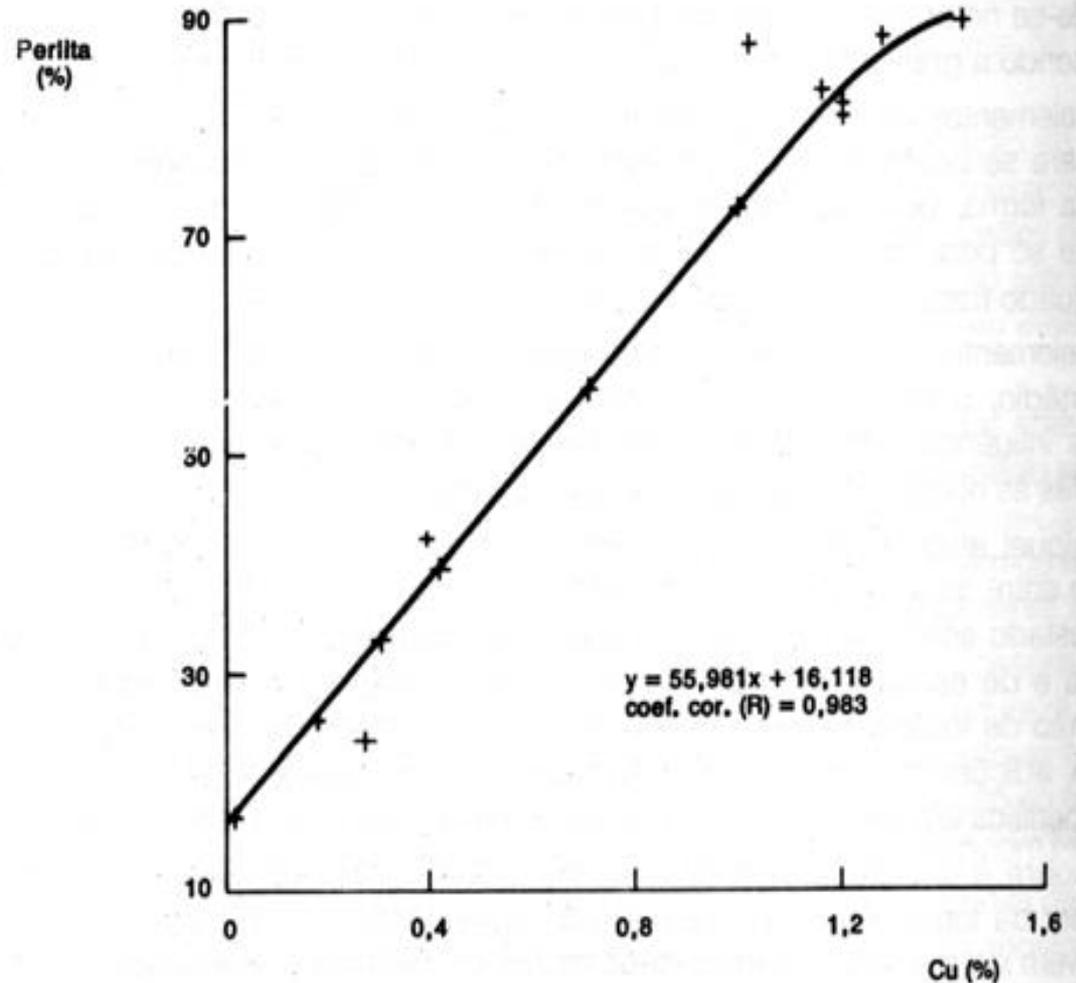


Ferros Fundidos - Influência de Elementos de Liga

A adição de **elementos de liga** a ferros fundidos, **aumenta a resistência** mecânica, 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.
- **Cobre**: é um **grafitizante** como o níquel e um promovedor da **formação de perlita**. **Aumenta resistência mecânica** pela formação de **perlita** e pelo **endurecimento da ferrita por solução sólida**;
- **Estanho**: possui um comportamento **perlitizante** muito acentuado o que aumenta **resistência mecânica**. 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.

Ferros Fundidos Brancos Multicomponentes

Liga	C	Cr	Mo	W	V	Co
1	1,70	5,41	5,13	5,15	5,02	1,98
2	1,95	5,33	5,09	5,16	4,89	1,97
3	2,28	4,99	5,29	4,86	4,94	2,01
4	2,54	5,39	5,08	5,14	4,92	1,94
5	2,81	5,27	5,00	5,17	5,08	1,92
6	3,34	5,2	5,05	5,16	5,18	1,93
7	1,96	4,89	5,19	5,04	2,84	1,97
8	2,02	5,11	5,01	5,19	3,70	2,05
9	2,01	4,95	4,95	5,06	5,03	2,11
10	2,06	5,36	4,82	5,16	6,78	2,20
11	1,98	5,08	4,85	5,18	8,73	2,18

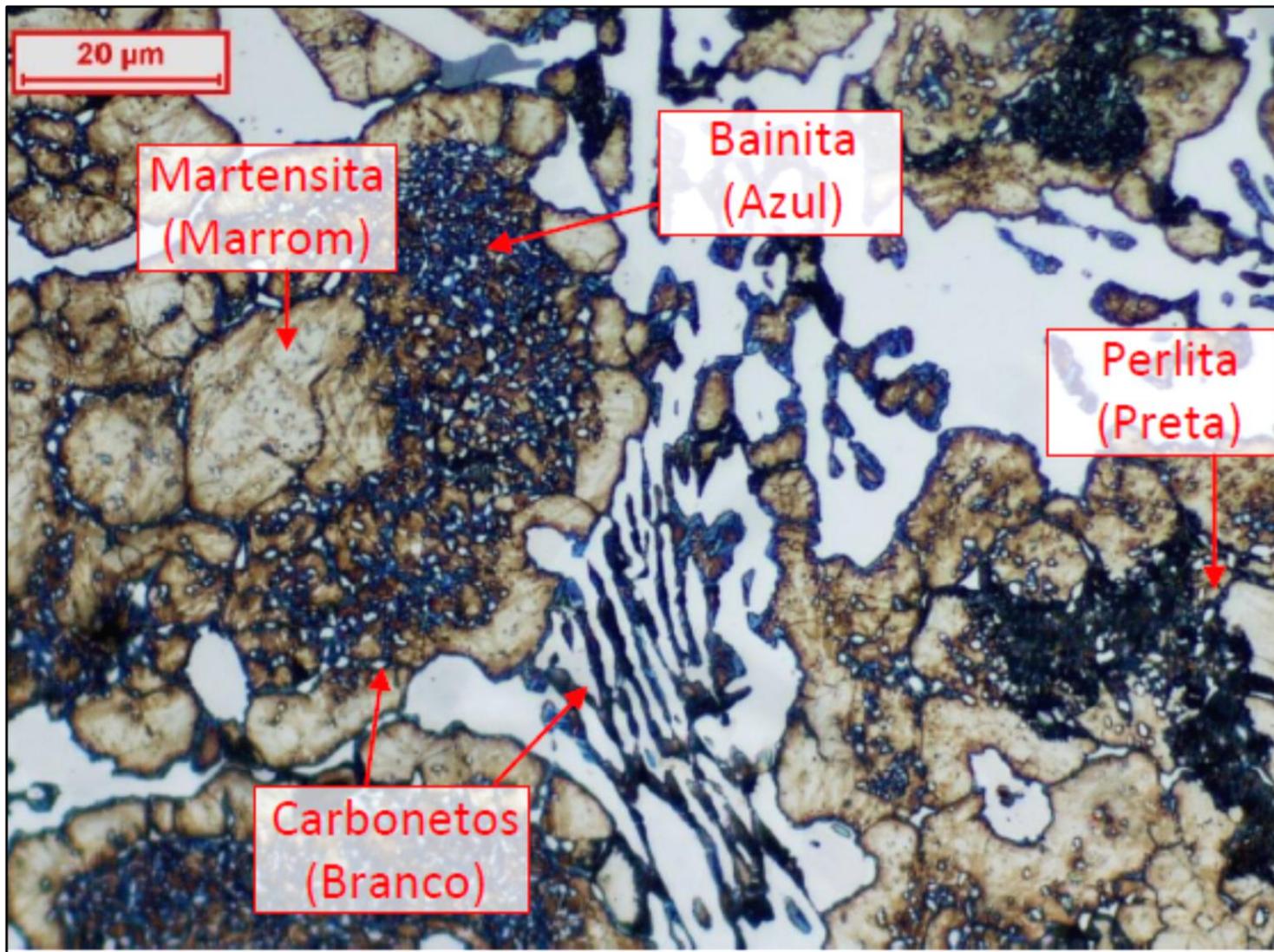
(YOKOMIZO, SASAGURI, NANJO, & MATSUBARA, 2002), (YOKOMIZO, SASAGURI, NANJO, & MATSUBARA, 2005), (YOKOMIZO, SASAGURI, & MATSUBARA, 2000), (YOKOMIZO, SASAGURI, NANJO, & MATSUBARA, 2010) e (OKOMIZO, Y., SASAGURI, N., YAMAMOTO, K., ERA, H., & MATSUBARA, Y., 2010)

Ferro Fundido Branco Multicomponente 2C-6Cr-2Mo-4V-2W-Ni

Elementos	C	Cr	Mo	V	W
%massa	2,0	6,0	2,0	4,0	2,0

Fonte: TCC- Adriel Claro de Faria-Determinação do Diagrama TRC do Ferro Fundido Branco Multicomponente 2C-6Cr-2Mo-4V-2W-Ni-Orientador:Prof. Dr. José Benedito Marcomini-EEL-USP-2015.

Objetivo: microestrutura composta de carbonetos de elementos de liga e matriz Bainítica/Martensítica



Fonte: TCC- Adriel Claro de Faria-Determinação do Diagrama TRC do Ferro Fundido Branco Multicomponente 2C-6Cr-2Mo-4V-2W-Ni-Orientador:Prof. Dr. José Benedito Marcomini-EEL-USP-2015

APLICAÇÃO

Compor camadas de Peças/equipamentos que devem apresentar:

- Resistência à Fadiga Térmica (superfície);
- Resistência ao desgaste (superfície);
- Boa tenacidade (interna).

Exemplo: Cilindros de Laminação de tiras a quente.

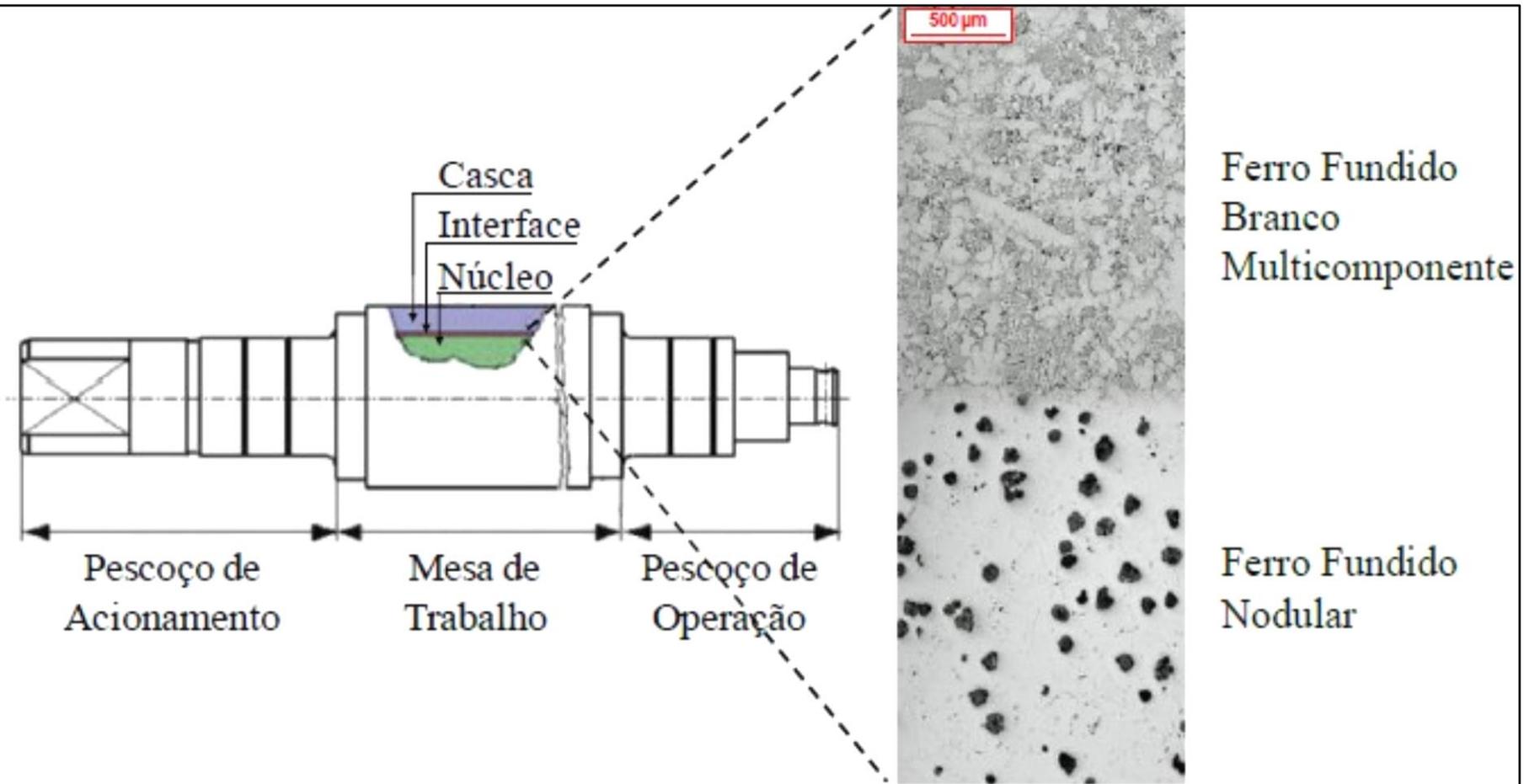
LAMINAÇÃO DE TIRAS A QUENTE (LTQ)

Hot strip mil (HSM)

Tiras: chapas finas com espessuras entre 0,8 e 2,0 mm, com largura menor ou igual a 500 mm, fornecidas em bobinas.



Principais componentes de um cilindro de LTQ



Fonte: Adaptado (ZIEHENBERGER & WINDHAGER, 2006)

Fonte: TCC- Adriel Claro de Faria-Determinação do Diagrama TRC do Ferro Fundido Branco Multicomponente 2C-6Cr-2Mo-4V-2W-Ni-Orientador: Prof. Dr. José Benedito Marcomini-EEL-USP-2015

Cilindro de LTQ





Tratamentos Térmicos dos Ferros Fundidos

Alívio de Tensões

Objetivo: **alívio de tensões residuais** de processo, causadas por mudanças de volume, forma geométrica e outros.

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 em temperatura **entre 550°C e 650°C** durante um período de tempo que poderá variar entre **1 e 48 horas**, dependendo do objetivo e aplicação da peça, seguido de **resfriamento lento normalmente dentro do próprio forno**.

Recozimento

Objetivo: melhorar ainda mais a **usinabilidade** dos ferros fundidos, **reduzir a dureza** das zonas coquilhadas (**resfriamento mais rápido: partes com espessura mais fina**), ou **eliminá-las**.

- O **recozimento completo ou pleno: 780°C a 900°C** para ferros fundidos com alto teor de elementos de liga (**eliminação de carbonetos**);
- O **recozimento de ferritização: 700°C e 760°C**: transformação dos carbonetos perlíticos em **ferrita e grafita**, para **melhorar a usinabilidade**;
- O **recozimento grafitizante: 900°C a 950°C**, geralmente para ferros fundidos **brancos ou mesclados** (**carbonetos maciços são transformado em grafita**). Cuidado especial deve ser tomado quanto ao percentual de fósforo na liga, pois o **eutético de fósforo pode fundir** nestas temperaturas.

Normalização

Objetivo: obter uma **matriz homogênea**, totalmente **perlítica**, de **granulação fina** com eliminação dos carbonetos maciços, e combinação de **elevada resistência mecânica e boa tenacidade**. É realizado com temperatura de **encharque entre 900°C e 950°C** e **resfriamento ao ar**.

Austêmpera de FoFo Nodular

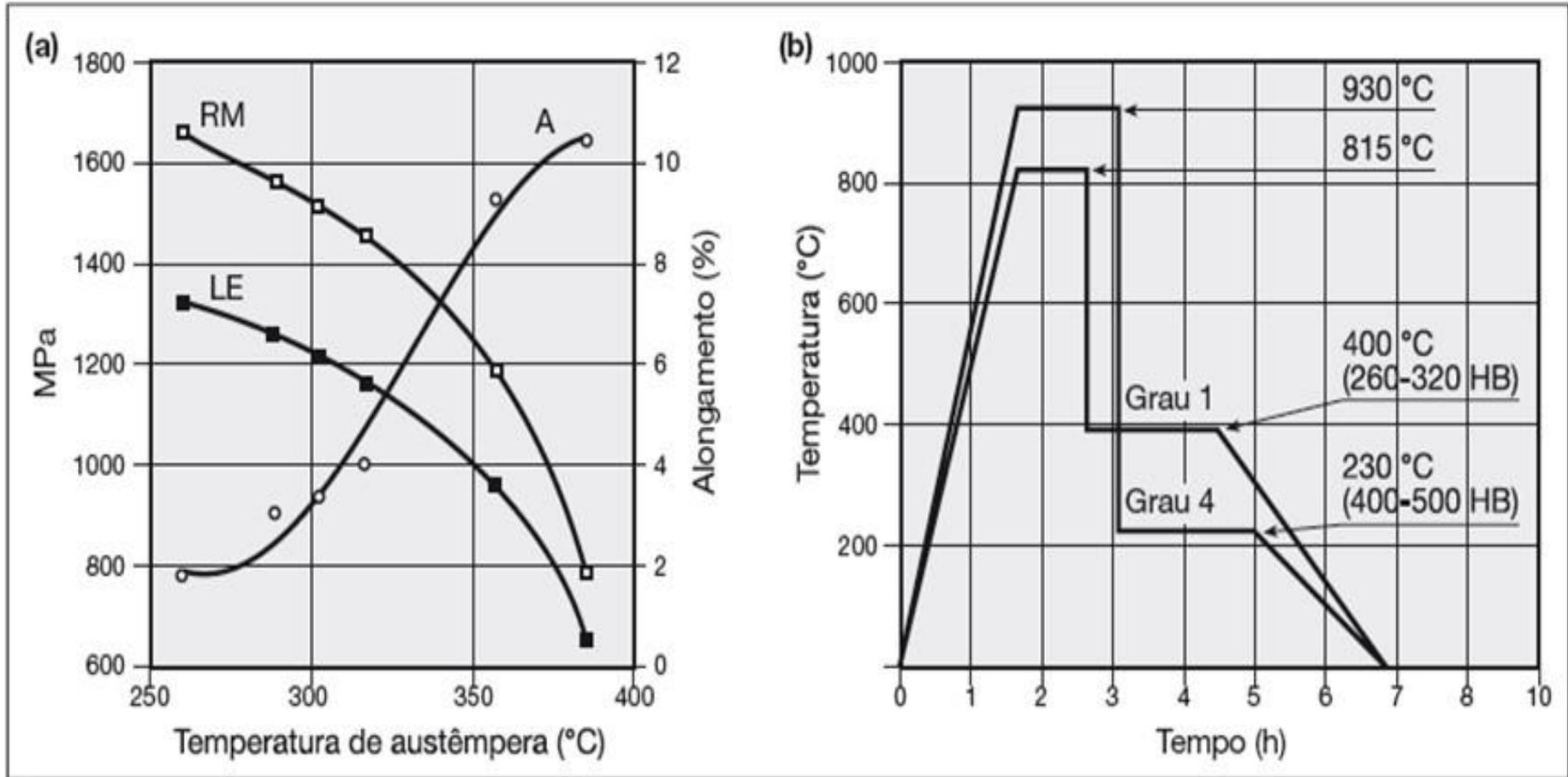


Tabela 17.5

Propriedades mínimas especificadas para ensaio de tração e de impacto para ferros fundidos nodulares austemperados conforme a norma ASTM A897.

Grau, ASTM A897	Limite de ruptura (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Tenacidade (impacto, J)
1	850	550	10	100
2	1050	700	7	80
3	1200	850	4	60
4	1400	1100	1	35
5	1600	1300	—	—

FERRO FUNDIDO NODULAR RECOZIDO

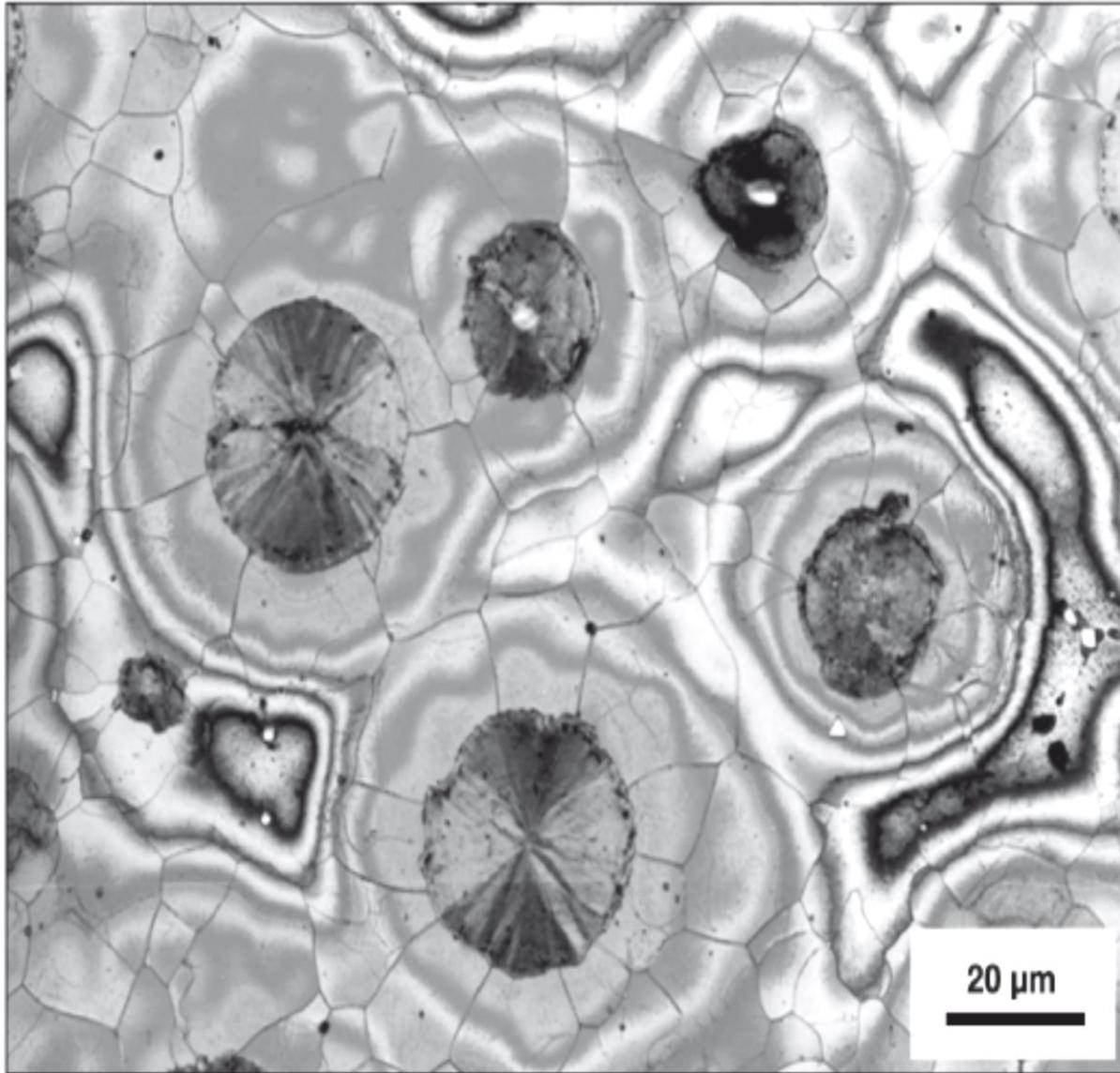


Figura 17.82

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⁽¹²⁾ 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

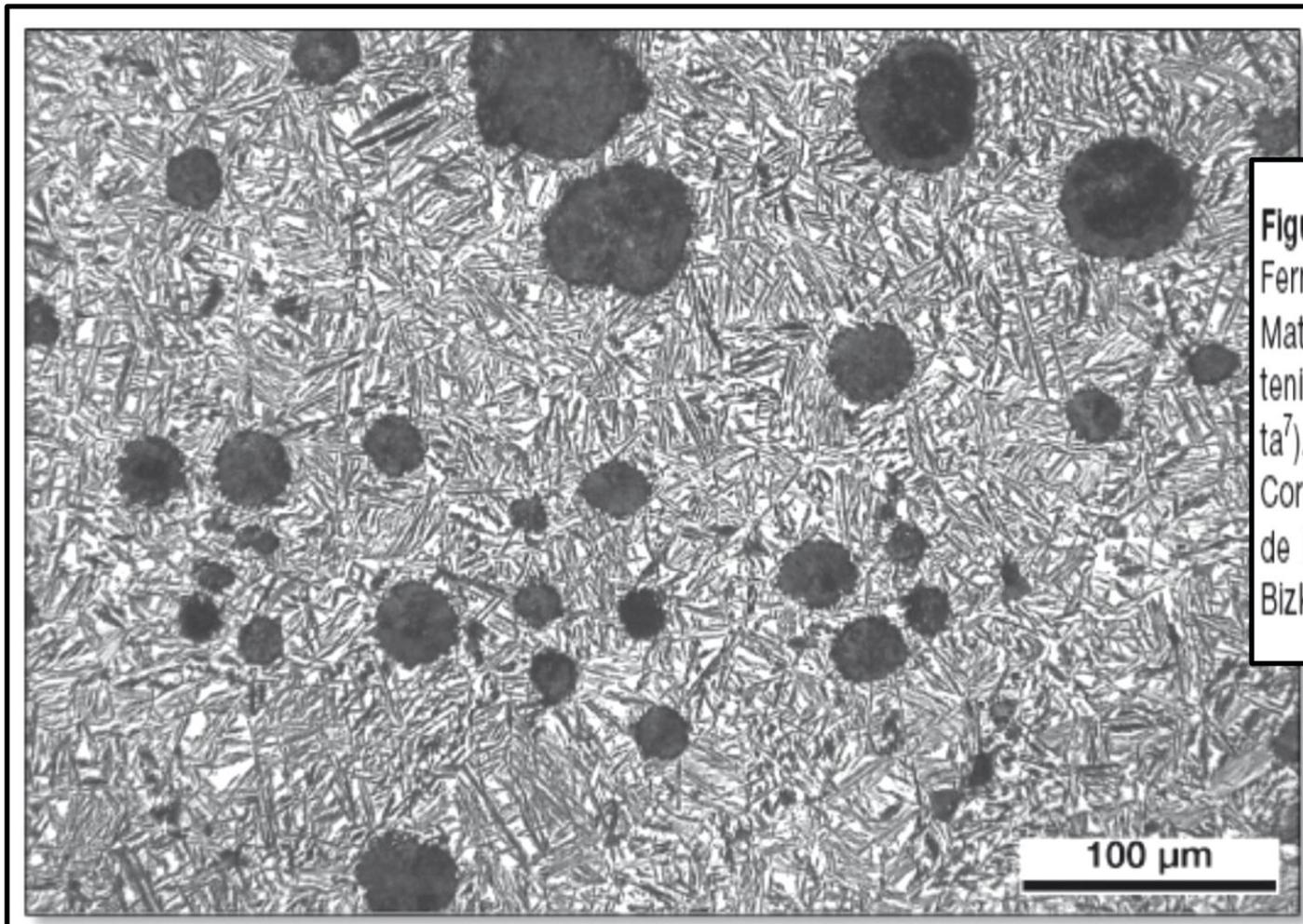


Figura 17.88

Ferro fundido nodular austemperado. Matriz de bainita (ferrita bainítica) e austenita retida (áreas brancas) (ausferrita⁷). Nódulos de grafita. Ataque: Nital. Cortesia J. Sertucha, Azterlan, Centro de Investigación Metalúrgica, Durango, Bizkaia, Espanha.

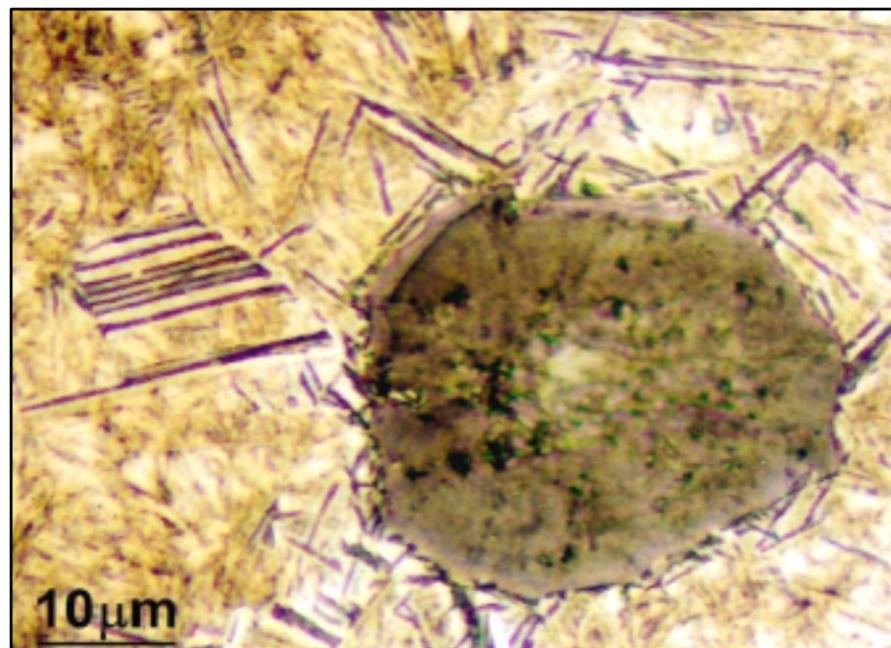
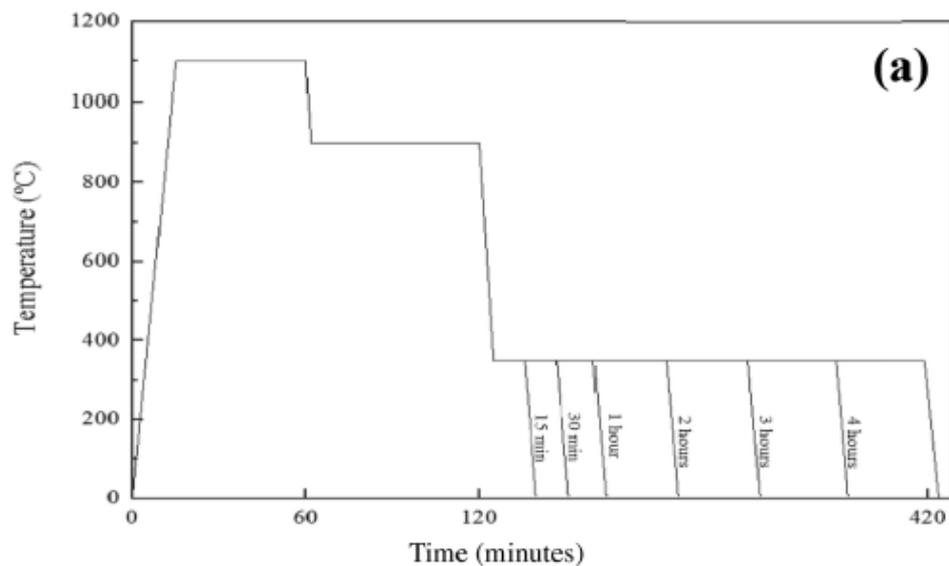
EFFECT OF THE AUSTENITIZATION ROUTE ON THE BAINITIC REACTION KINETICS AND TENSILE PROPERTIES OF AN ALLOYED AUSTEMPERED DUCTILE IRON

H. B. Pereira , A. P. Tschitschin , H. Goldenstein , and C. R. F. Azevedo 

Department of Metallurgical and Materials Engineering, Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, SP, Brazil

Copyright © 2021 American Foundry Society

<https://doi.org/10.1007/s40962-020-00569-1>



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 POR MEIO DE TRATAMENTO TÉRMICO;
- MAIOR DUTILIDADE QUE O BRANCO;
- GRAFITA EM NÓDULOS DIFUSOS.

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