

SMM0193 – ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS I

Prof. Dr. José Benedito Marcomini

REFERÊNCIAS

- **Aços e Ligas Especiais, André Luiz Vasconcelos da Costa e Silva e Paulo Roberto Mei, Edgard Blücher-Villares Metals, segunda edição, 2006;**
- **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;**
- **Refino dos aços, André Luiz Vasconcelos da Costa e Silva, Editora Blücher, 1ª ed., 2023;**
- **Manual de siderurgia, Luiz Antonio de Araujo, Vol1-2ª Edição-2005;**
- **Siderurgia: uma visão geral, José Roberto Bolota, Editora Blücher, 1ª ed., 2024.**

REFERÊNCIAS:

- **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;**
- **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos, Wilson Luiz Guessser, 2ª ed., Blücher, 2019;**
- **Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura, Ângelo Fernando Padilha e Fúlvio Siciliano Jr, ABM, 2ª ed., 1996;**
- **Recrystallization and Related Annealing Phenomena, F.J. Humphreys e M. Hatherly, Elsevier, 2ª ed., 2004.**

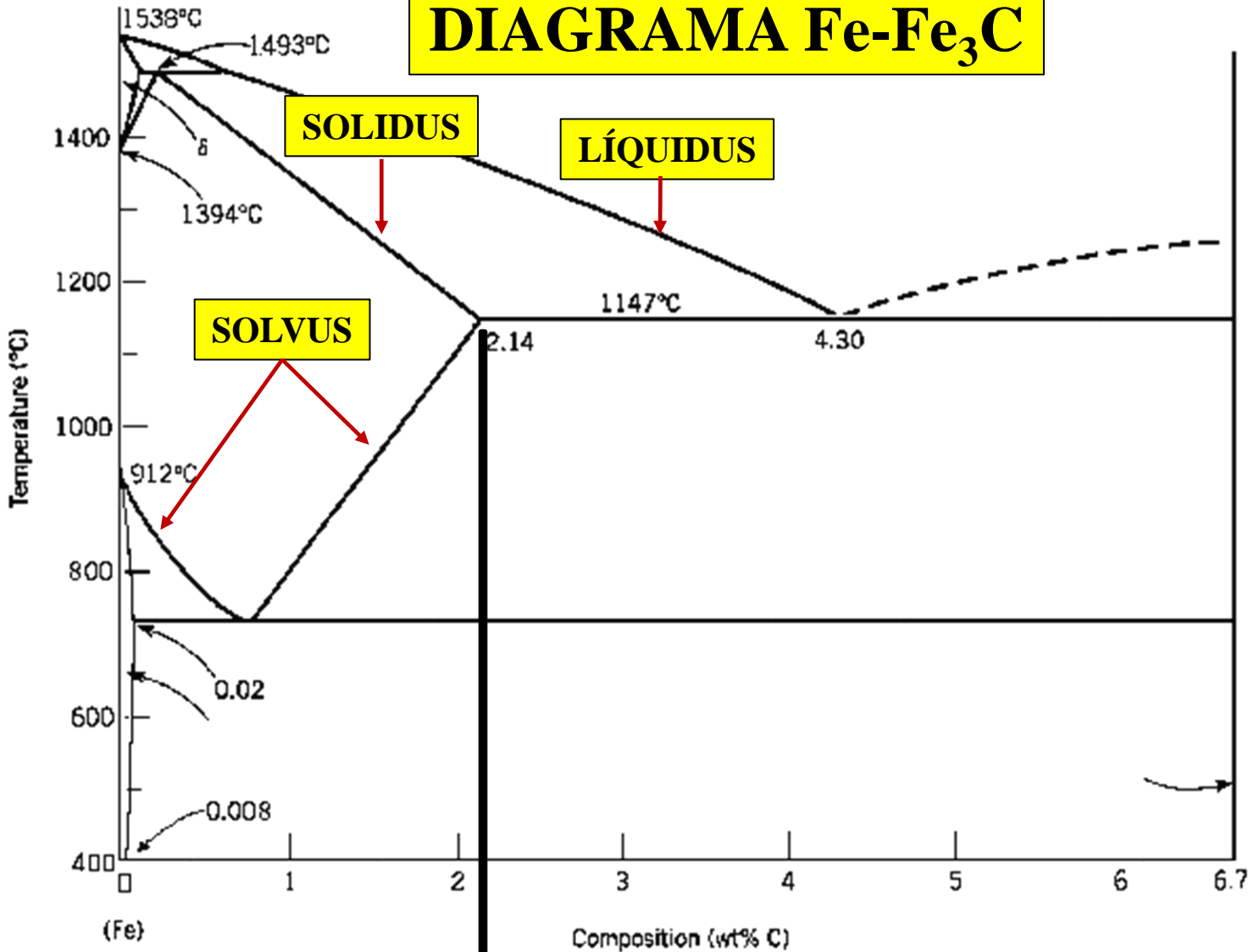


DIAGRAMA Fe-Fe₃C

TRATAMENTOS TÉRMICOS

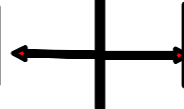
**DIAGRAMA DE FASES DO AÇO E
FERRO FUNDIDO
(DIAGRAMA Fe-Fe₃C)**

DIAGRAMA Fe-Fe₃C



Aços

Ferros fundidos





REAÇÕES INVARIANTES

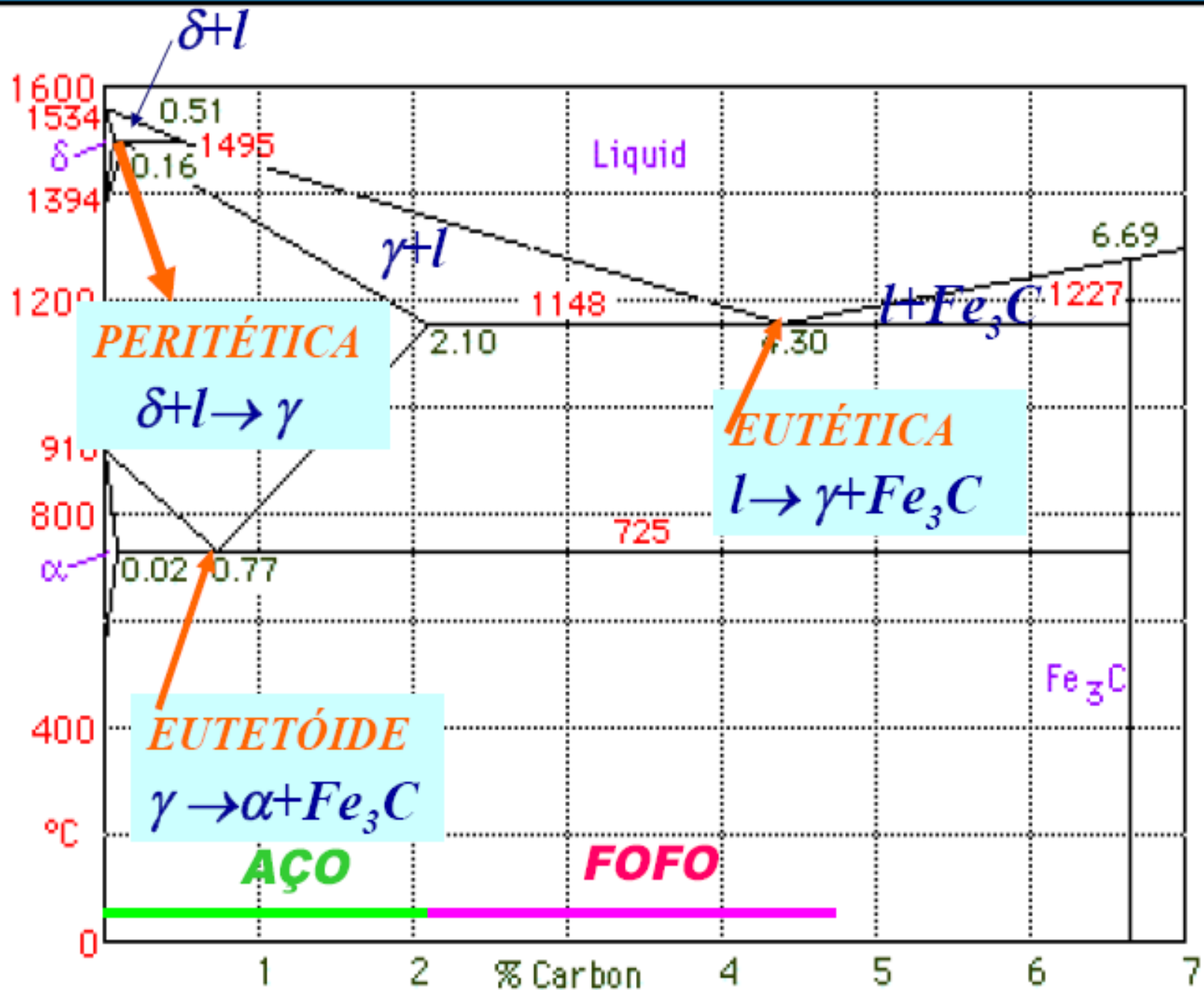


EFSC • IISF

As cinco reações do tipo três –fases mais importantes em diagramas binários.

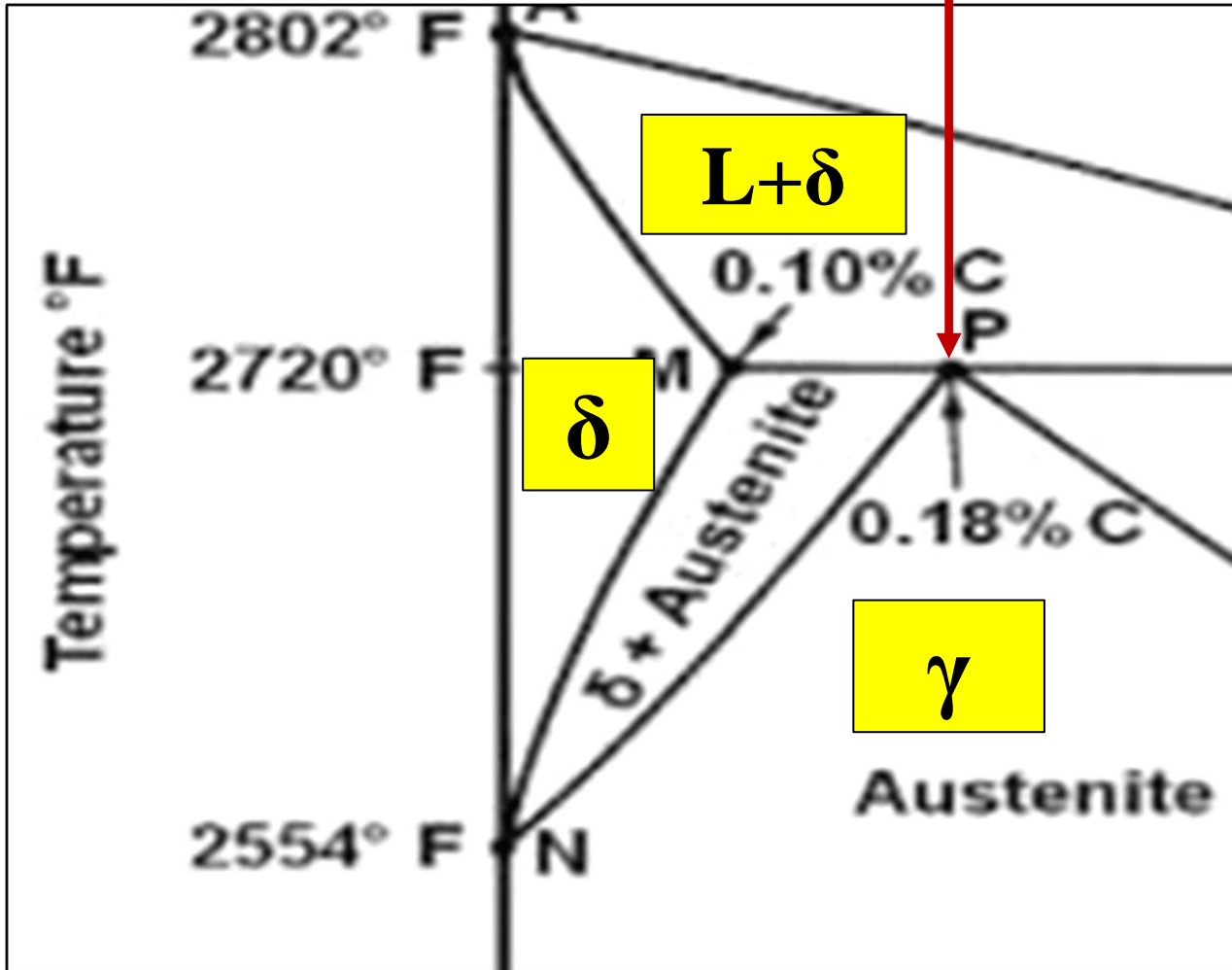
Eutectic	$L \rightarrow \alpha + \beta$	
Peritectic	$\alpha + L \rightarrow \beta$	
Monotectic	$L_1 \rightarrow L_2 + \alpha$	
Eutectoid	$\gamma \rightarrow \alpha + \beta$	
Peritectoid	$\alpha + \beta \rightarrow \gamma$	

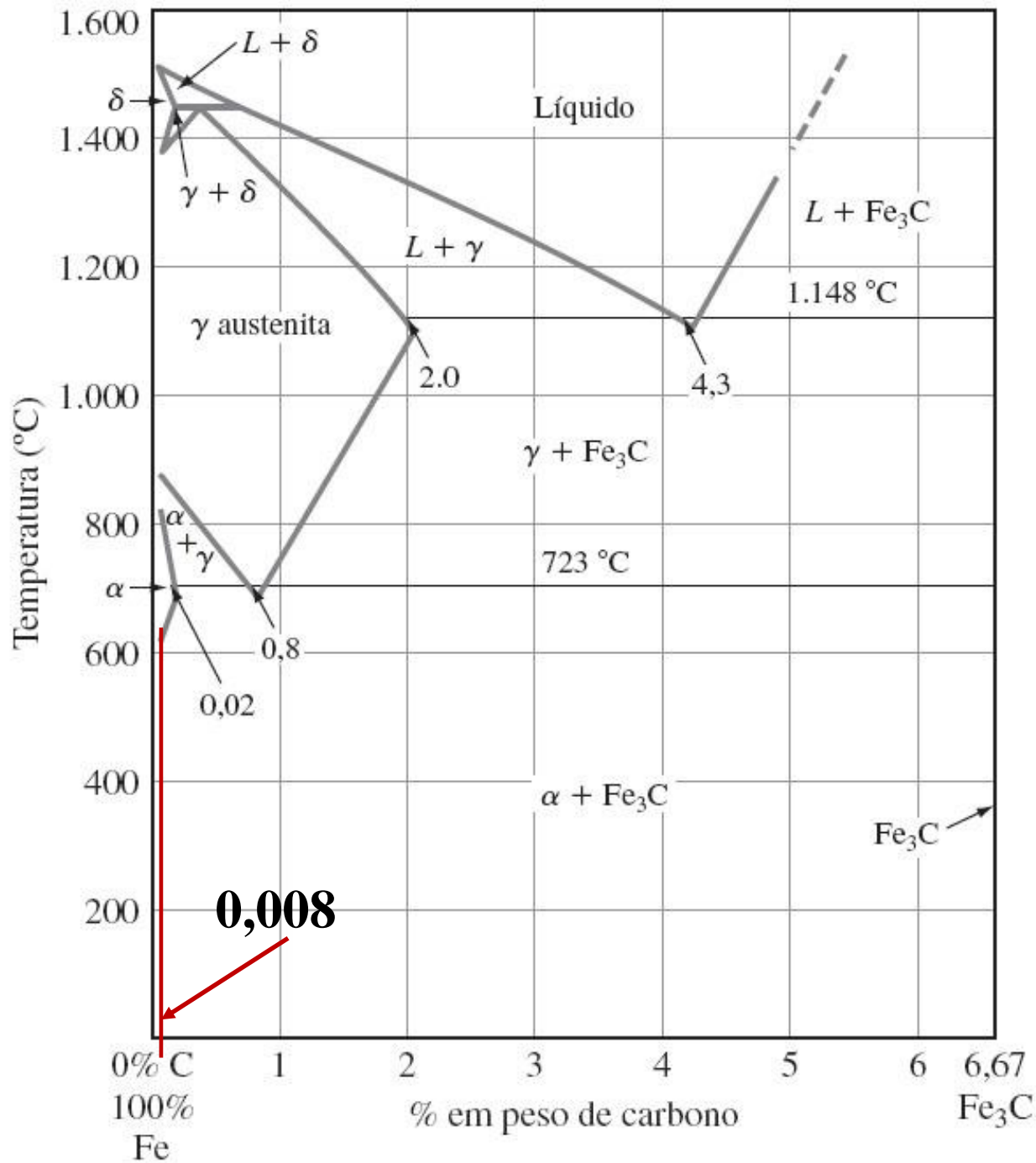
(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning[™] is a trademark used herein under license.



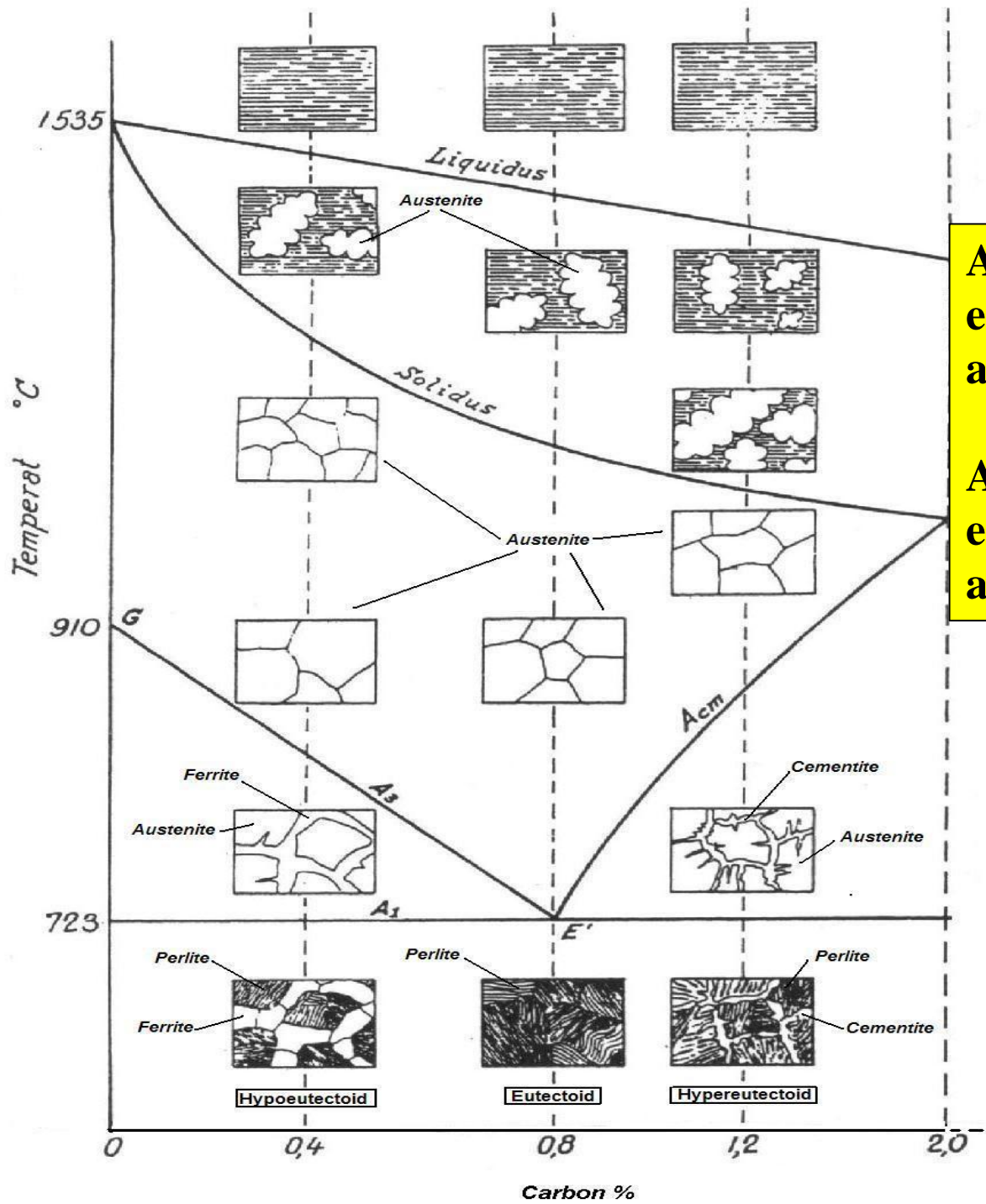
REAÇÃO PERITÉTICA

$L + \delta \rightarrow \gamma$





(Smith)



A1: Temperatura de equilíbrio de início de austenitização

A3/Acm: Temperatura de equilíbrio de fim de austenitização (linha solvus)

FASES E CONSTITUINTES DO AÇO



- ***Ferrita (δ)***: Solução sólida de C em Fe CCC – 1.394°C a 1.538°C. Solubilidade máxima de 0,09% de C em 1.495°C ($a=2,91\text{\AA}$)
- ***Austenita (γ)***: Solução sólida de C no Fe CFC- 727°C a 1.495°C. Solubilidade máxima de C-2,11 % a 2,14%, em 1148°;
- ***Ferrita (α)***: Solução sólida de C no Fe CCC – até 912°. Solubilidade máxima 0,020% de C em 723°C a 727°C ($a=2,88\text{\AA}$);
- ***Cementita (Fe_3C)***: ortorrômbico, alta dureza;
- ***Perlita: microconstituente*** formado por α e Fe_3C .

NOMENCLATURA QUANTO AO TEOR DE CARBONO

Aço com teor extra baixo de C ~ 0,008%p

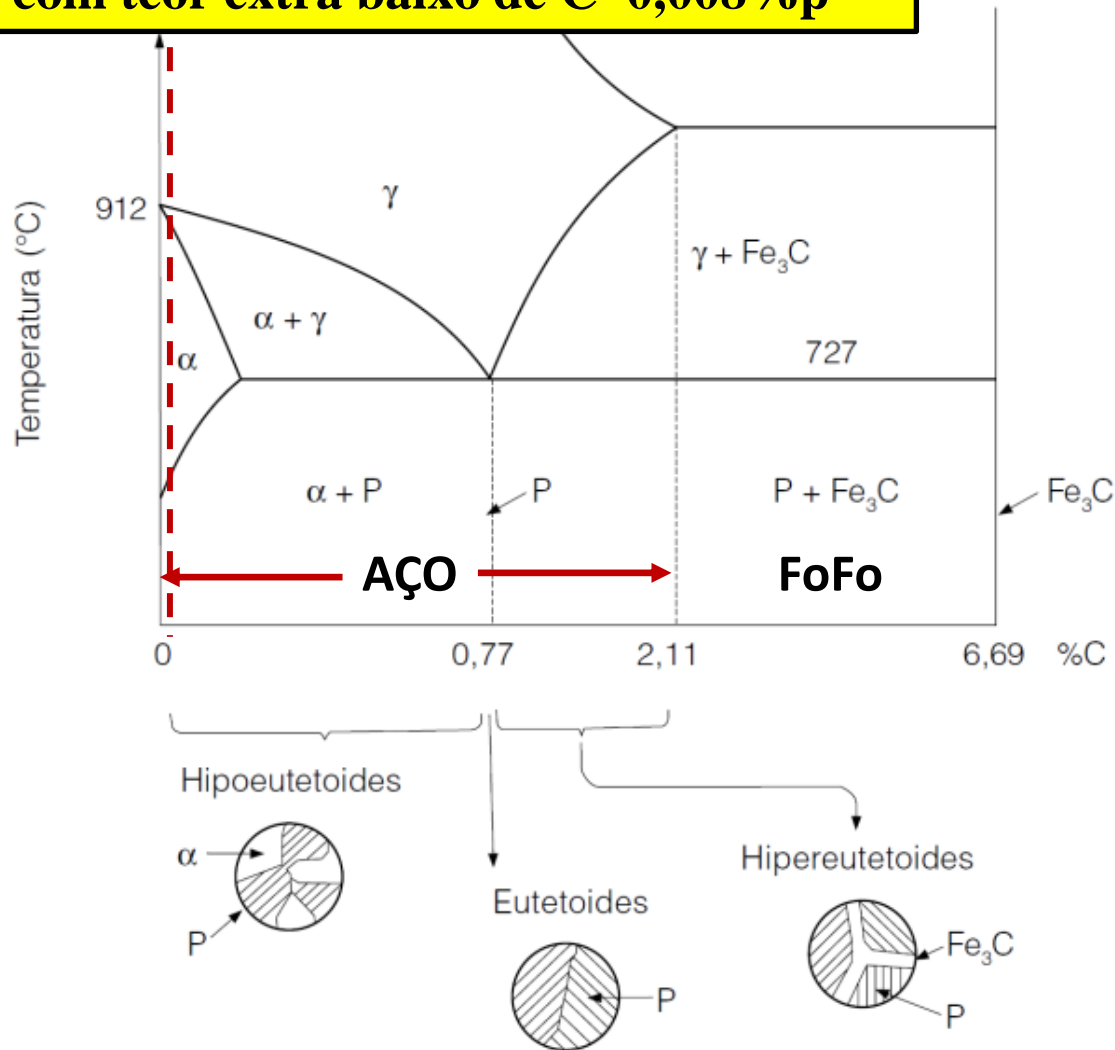


Figura 1.14 Diagrama de "fases" Fe-Perlita.

(ADAPTADO: AÇOS E LIGAS ESPECIAIS-Costa & Silva e Mei)

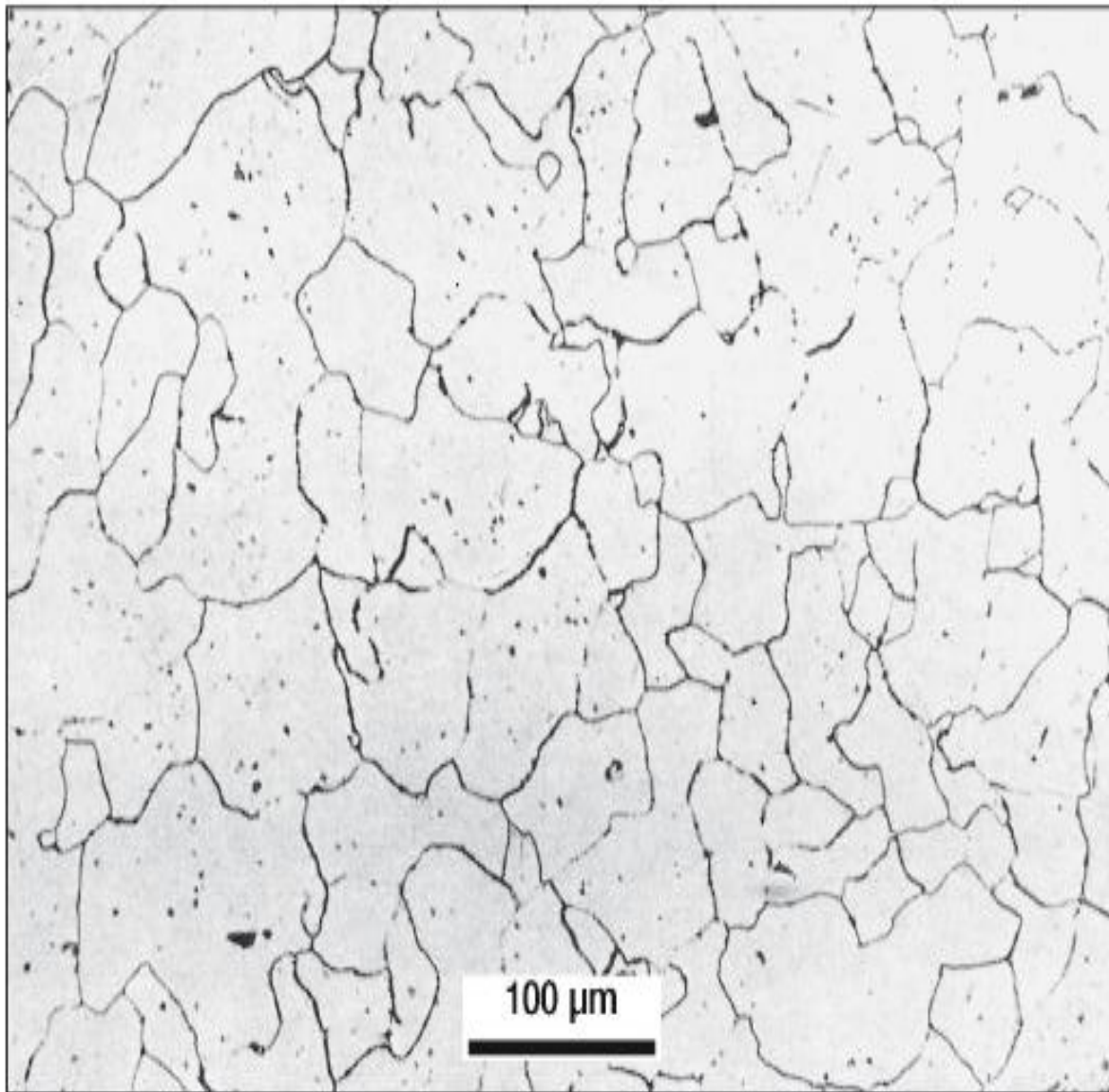


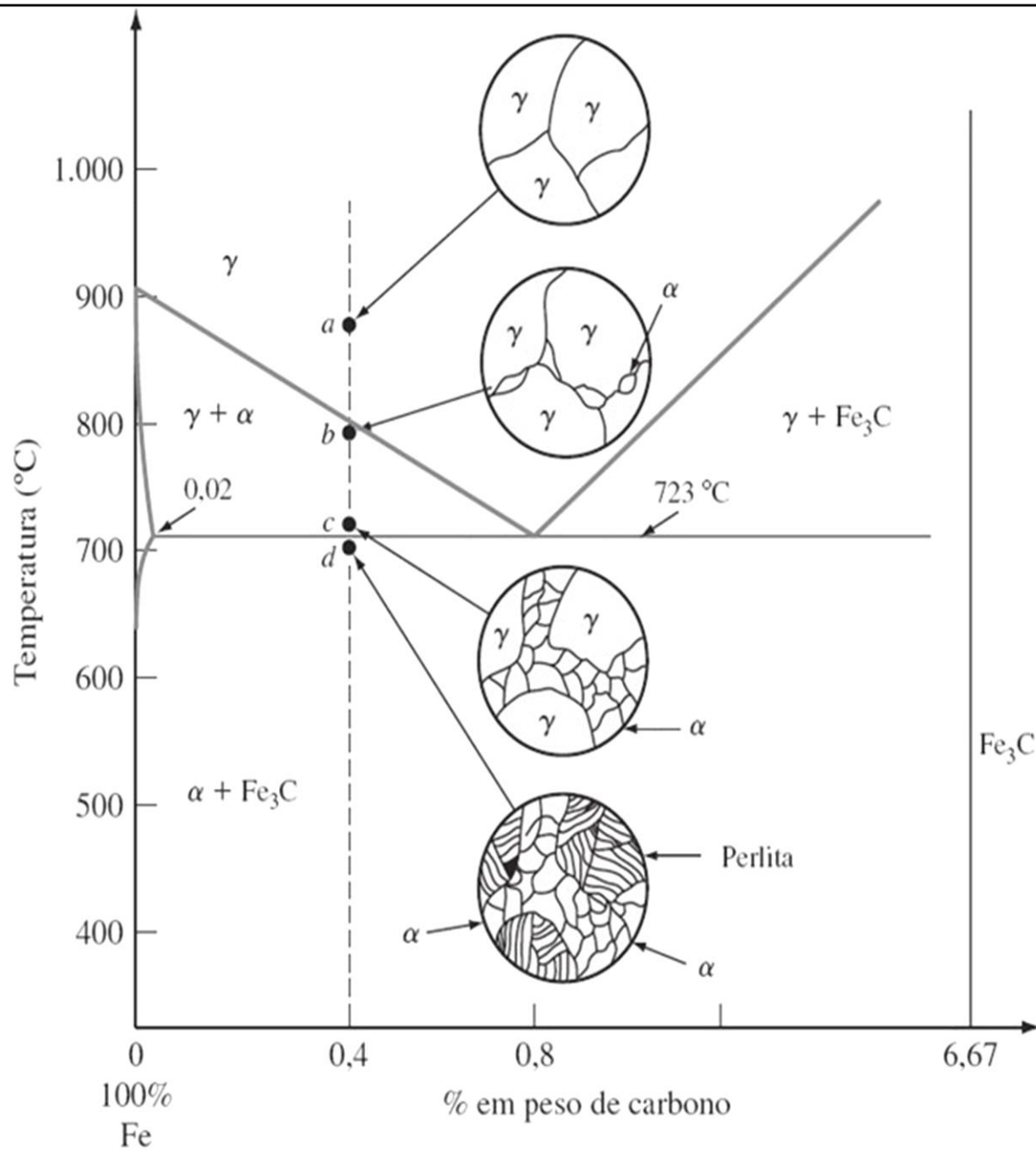
Figura 7.3

Aço de teor de carbono extra baixo⁽⁷⁾ (no caso, Ferro Armco). Grãos de ferrita e pequenas inclusões não-metálicas. Ataque: água régia.

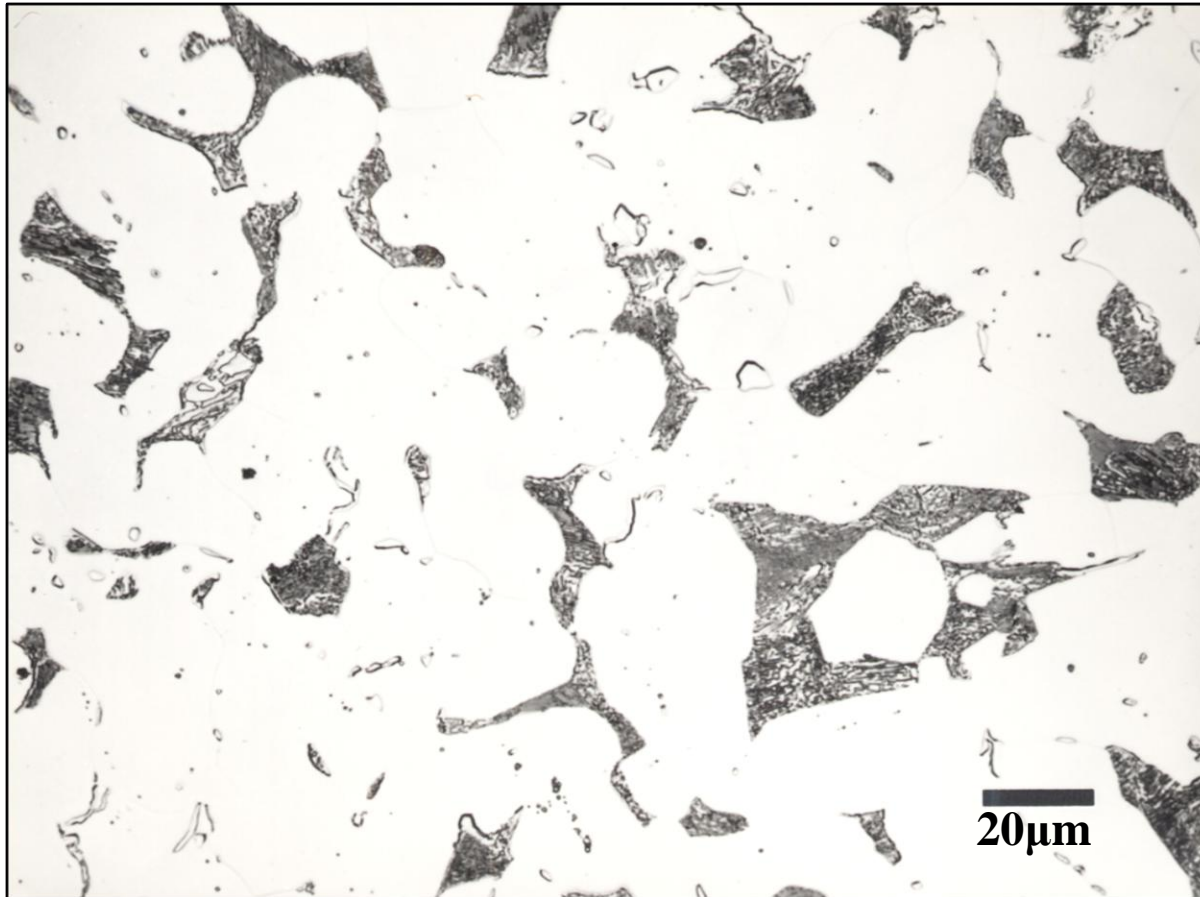
(Colpaert)

LIGAS HIPOEUTETÓIDES

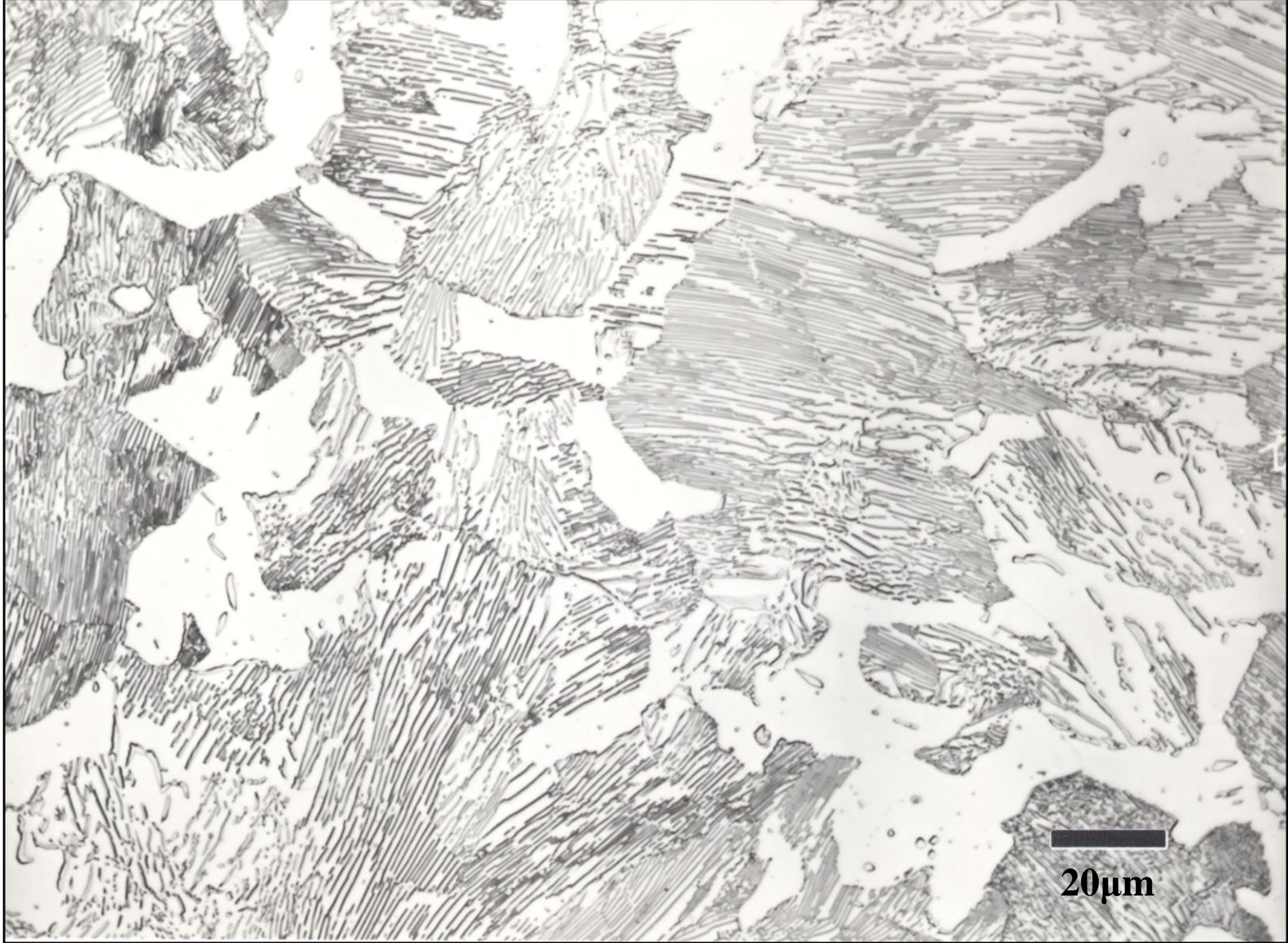
A **ferrita** estará presente tanto **na perlita** como na **fase** que se formou enquanto se resfriava **antes da temperatura do eutetóide**. A ferrita que está presente **na perlita** é chamada **ferrita eutetóide** e a ferrita que se **formou antes** da temperatura do eutetóide é chamada **ferrita proeutetóide**.



As regiões **brancas** correspondem à **ferrita proeutetóide**. Para a perlita, o espaçamento entre as camadas α e Fe_3C varia de grão para grão; uma **parte da perlita** parece **escura**, pois as muitas **camadas** com **pequeno espaçamento** não estão resolvidas e definidas na ampliação da fotomicrografia abaixo.



Ferrite (white) and pearlite in a hot-rolled Fe – 0.2% C binary alloy. Picral etch. Magnification bar is 20 μm in length.



Ferrite (white) and pearlite in a hot-rolled Fe – 0.6% C binary alloy. Picral etch. Magnification bar is 20 μm in length.

LIGAS EUTETÓIDES

Eutetóide é o microconstituente, perlita, formado por **ferrita** + **cementita**, em forma de lamelas.

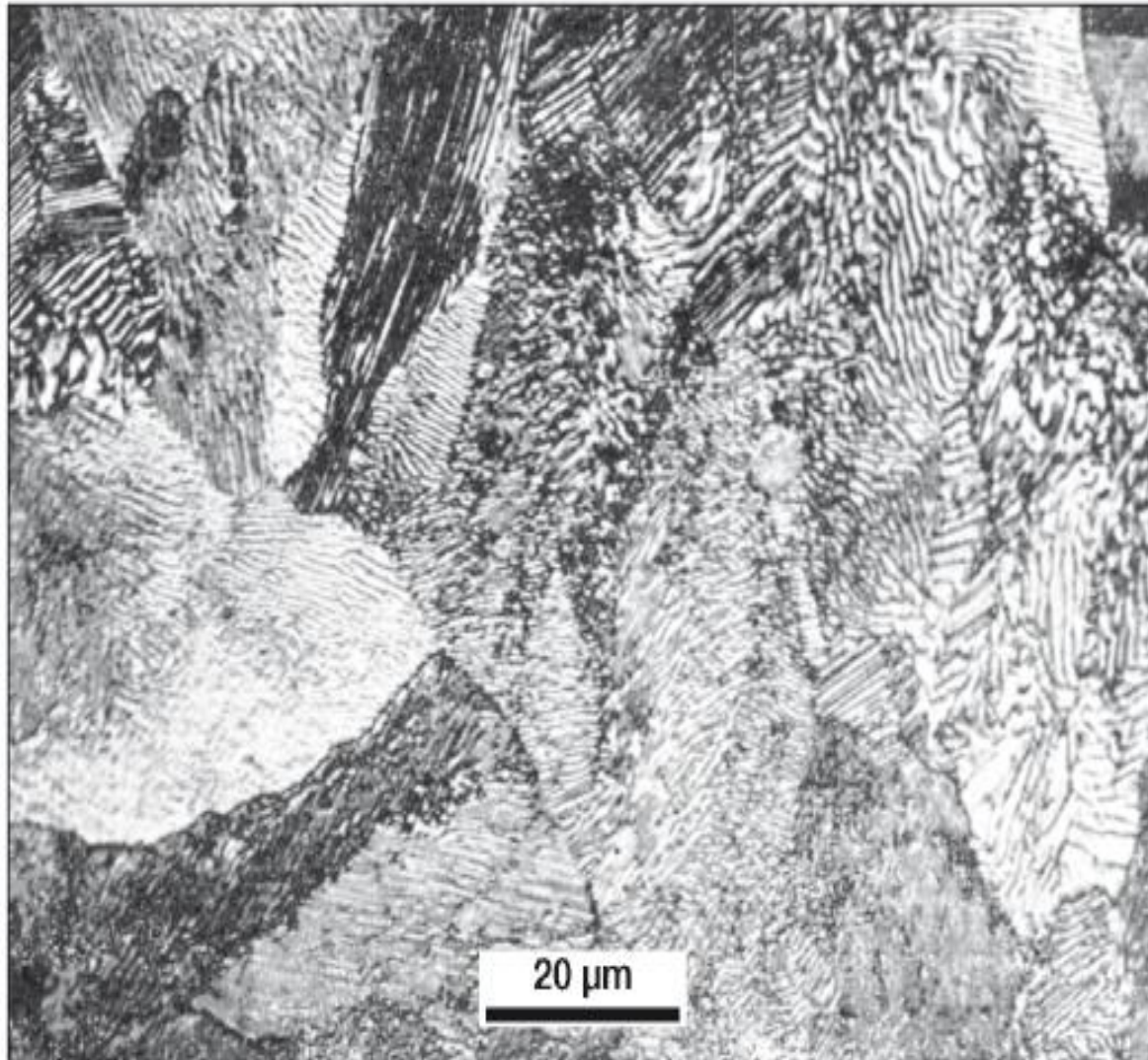
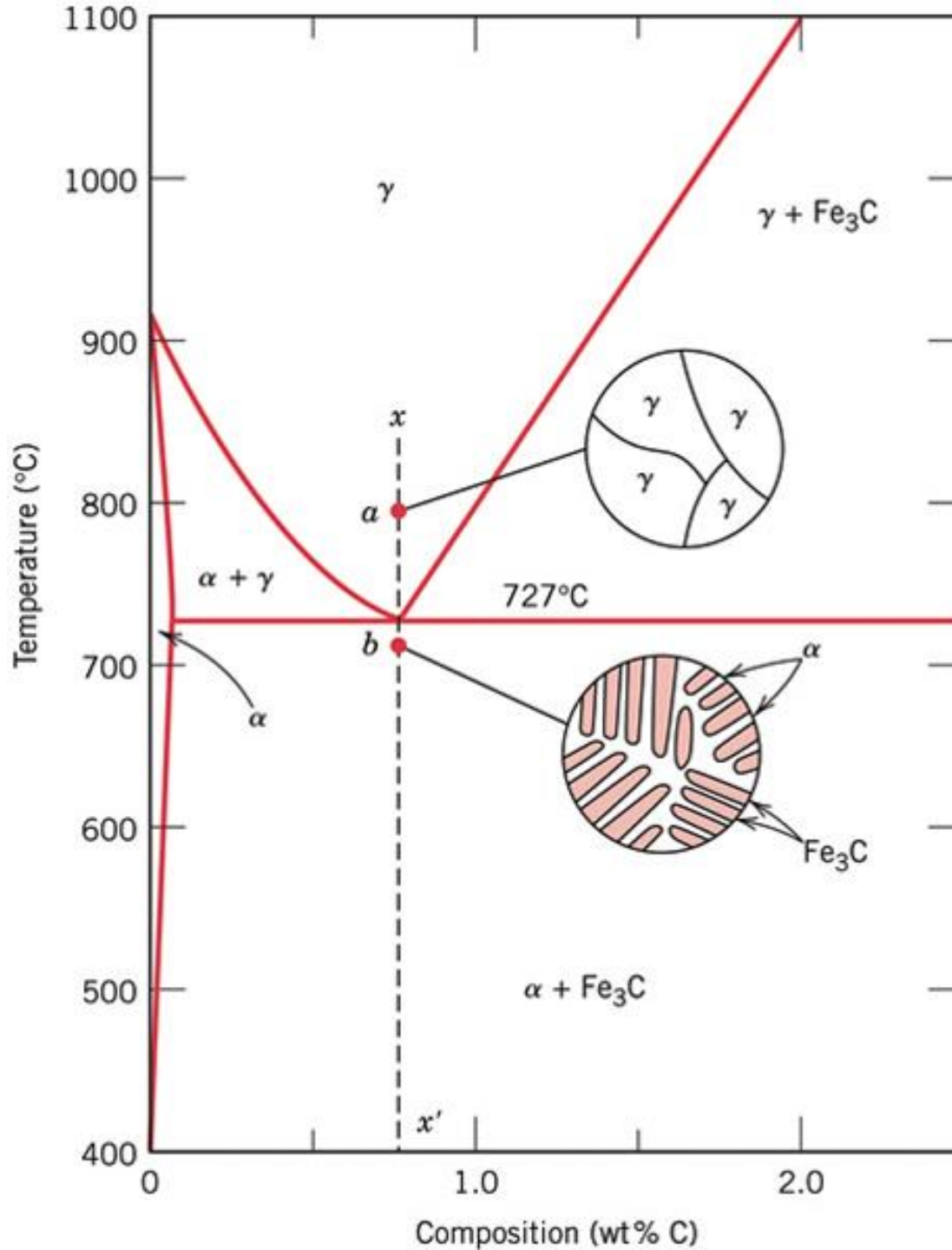
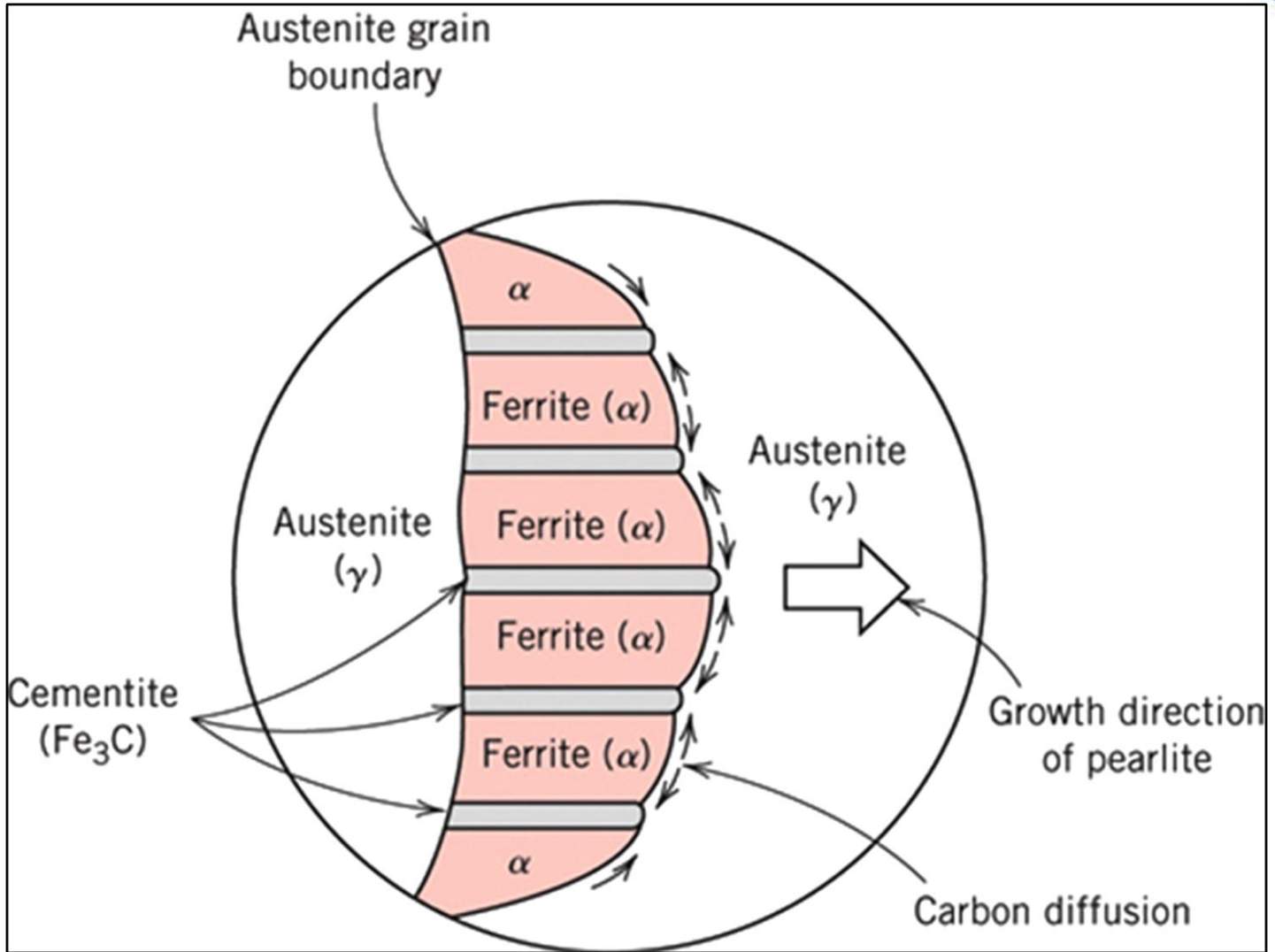


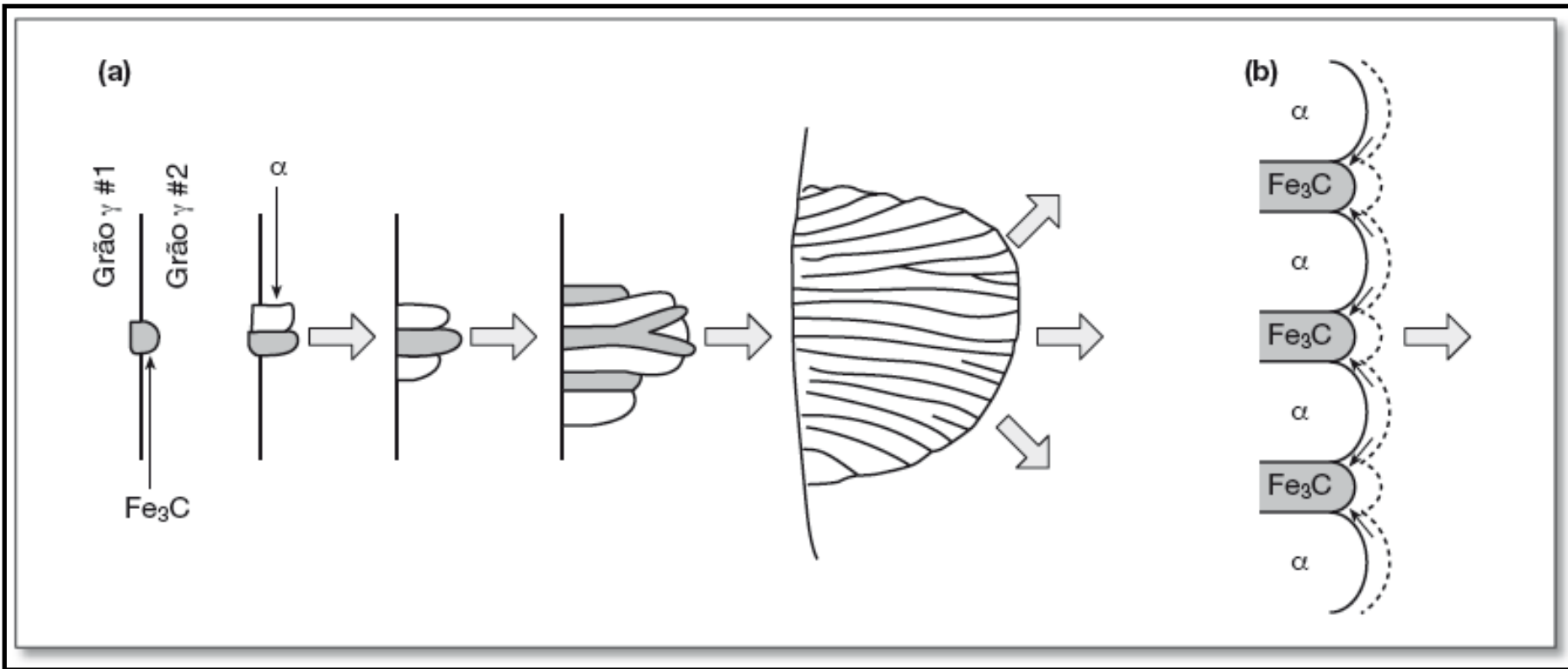
Figura 7.18

Aço eutectóide. Colônias de perlita. Algumas áreas que aparecem pouco definidas podem ter seu caráter lamelar mais facilmente observado girando o corpo-de-prova de 90°. Ataque: Nital.





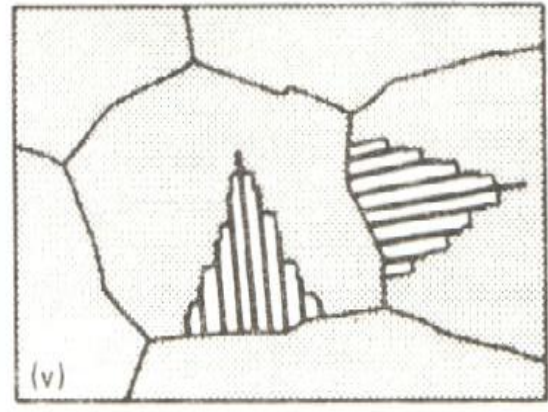
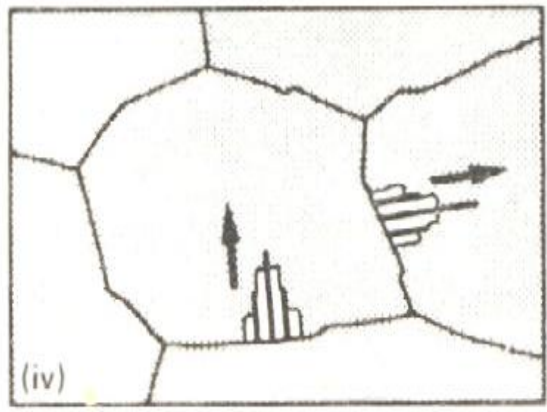
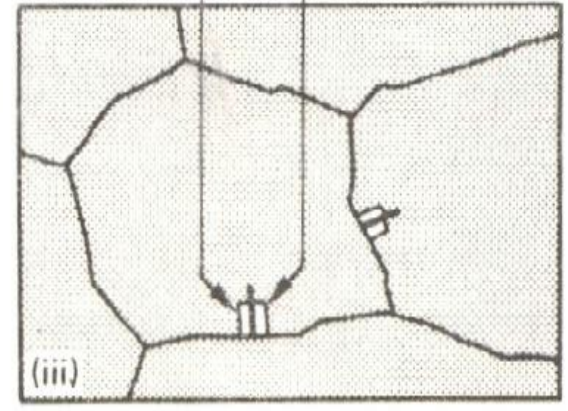
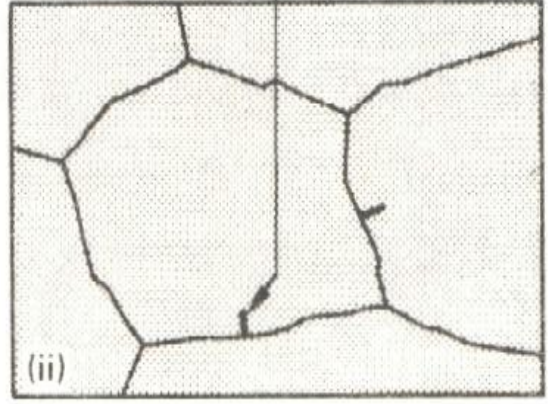
(Colpaert)

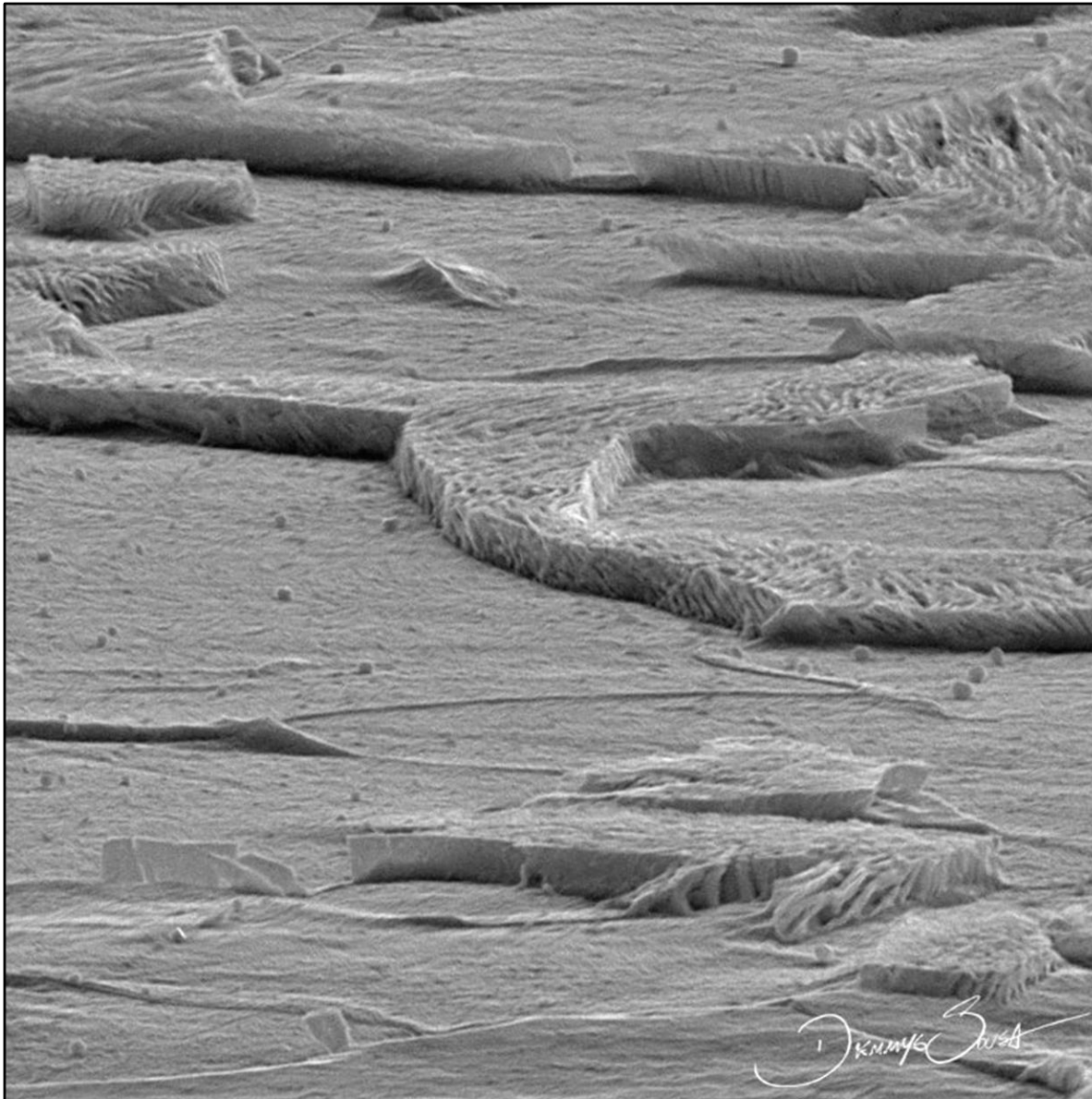


Crescimento cooperativo: austenita redistribui o soluto formando a cementita, fica empobrecida e nucleia a ferrita. Neste tempo, o teor de C vai aumentando na austenita restante para nuclear novamente a cementita: nucleação simpatética.

NÚCLEO DA
CEMENTITA

FERRITA





SEM HV: 20.0 kV	WD: 4.96 mm		VEGA3 TESCAN
SEM MAG: 10.0 kx	Det: SE		
View field: 20.7 μ m	Date(m/d/y): 03/22/22		ISI-ER 

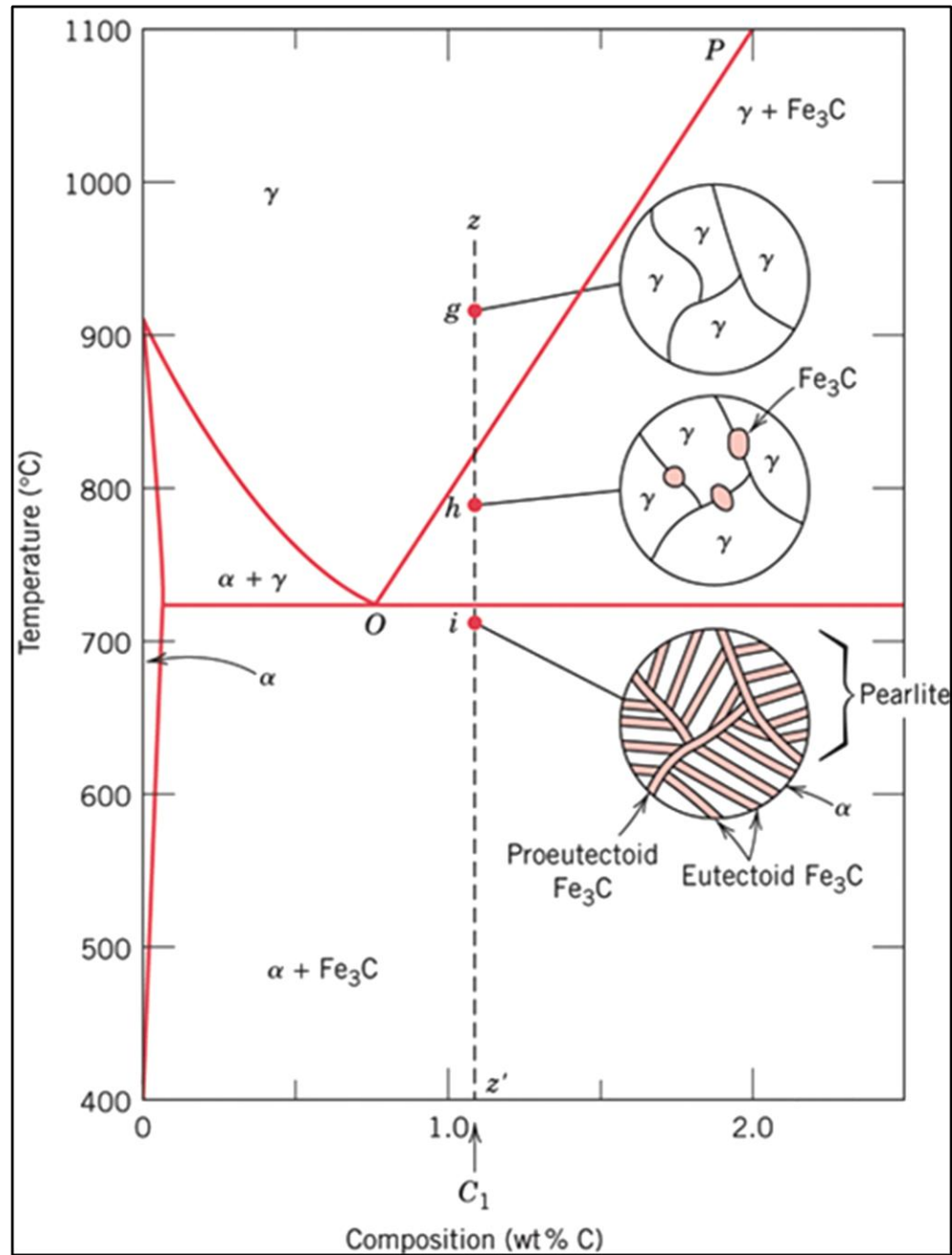
LIGAS HIPEREUTETÓIDES

A **cementita** formada **antes do eutetóide** é chamada **cementita proeutetóide** e a microestrutura das ligas hipereutetóides resultam em **perlita + cementita proeutetóide**

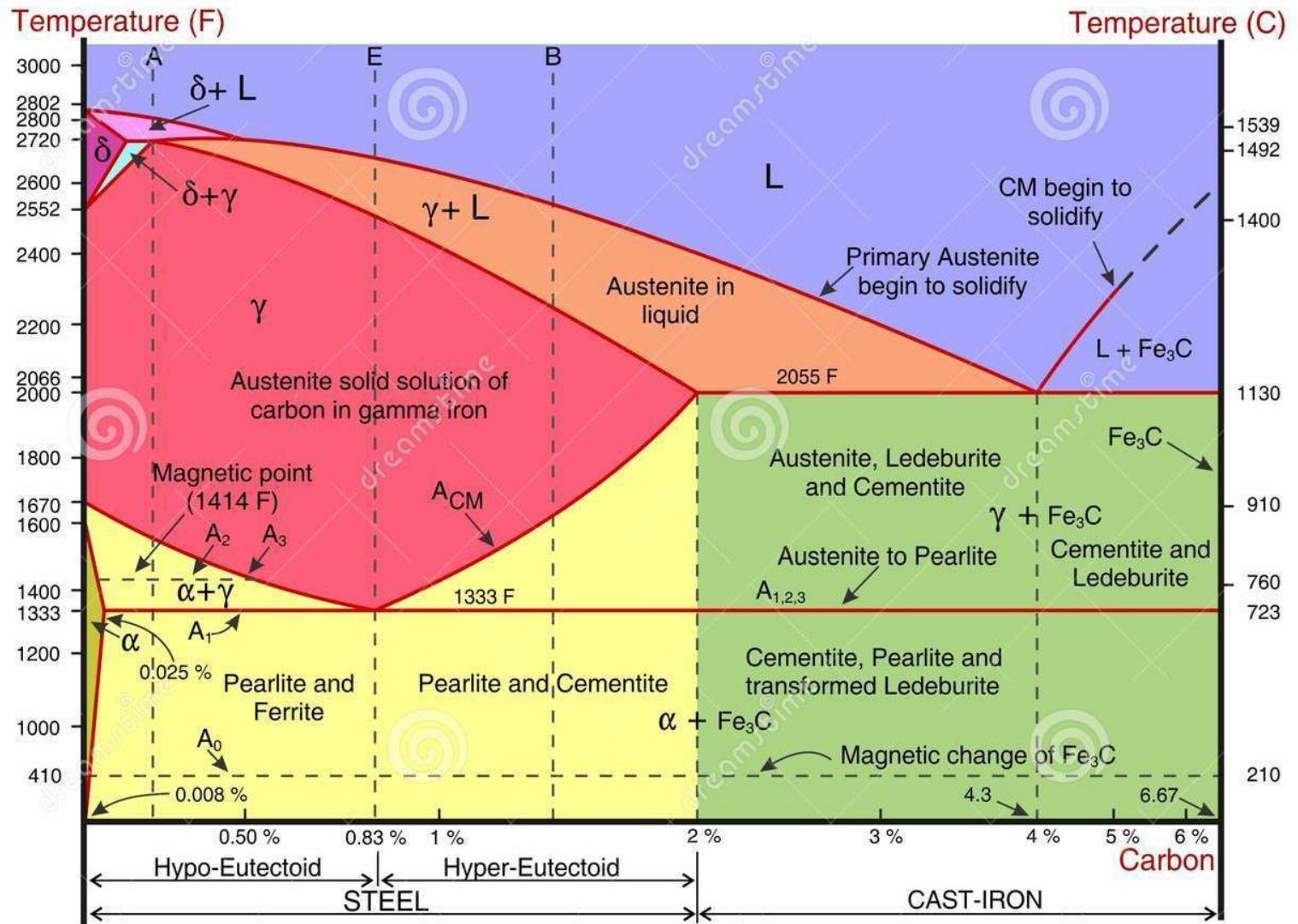
Na fotomicrografia de um aço hipereutetóide a cementita proeutetóide aparece **clara e nos contornos de grãos**.



Pearlite and G.B. Cementite in an hypereutectoid steel
cementite appears white



FERROS FUNDIDOS



IRON-CARBON DIAGRAM

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

FERROS FUNDIDOS

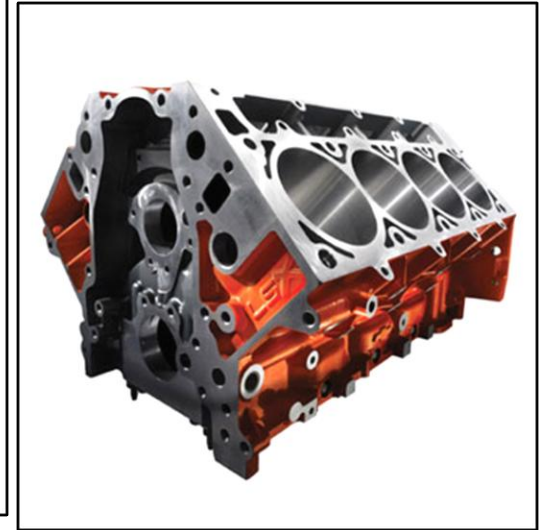
- **Termo genérico** utilizado para as **ligas Ferro-Carbono** nas quais o conteúdo de **carbono excede o seu limite de solubilidade na austenita** na temperatura do eutético;
- Contém no **mínimo 2% de carbono**, mais **silício (entre 1 e 3%) e enxofre**, podendo ou não haver outros elementos de liga;
- 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**

FERROS FUNDIDOS

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

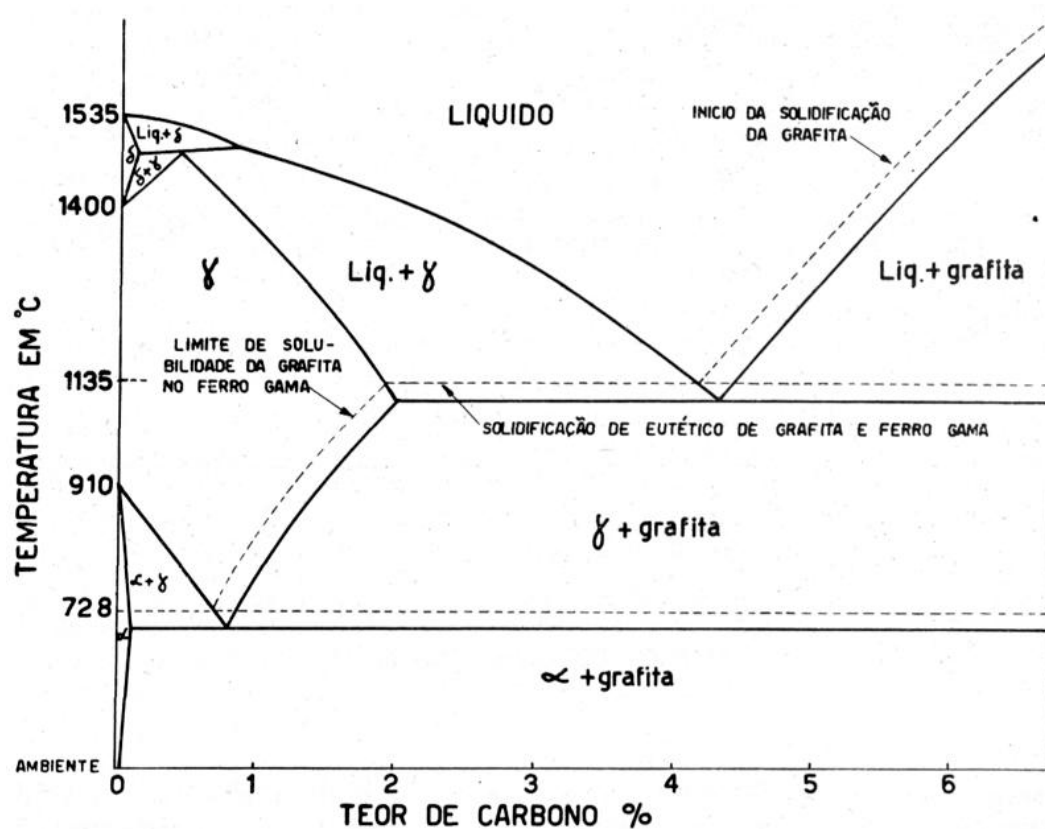


Fig. 521 — Diagrama de equilíbrio ferro-carbono simplificado mostrando em pontilhado o diagrama estável ferro-grafita.

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.

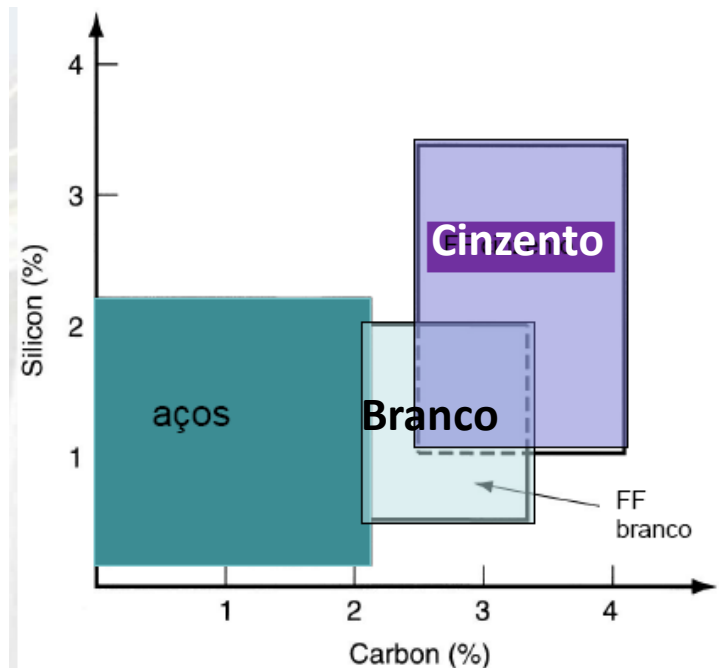
Ferros Fundidos - composição química

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

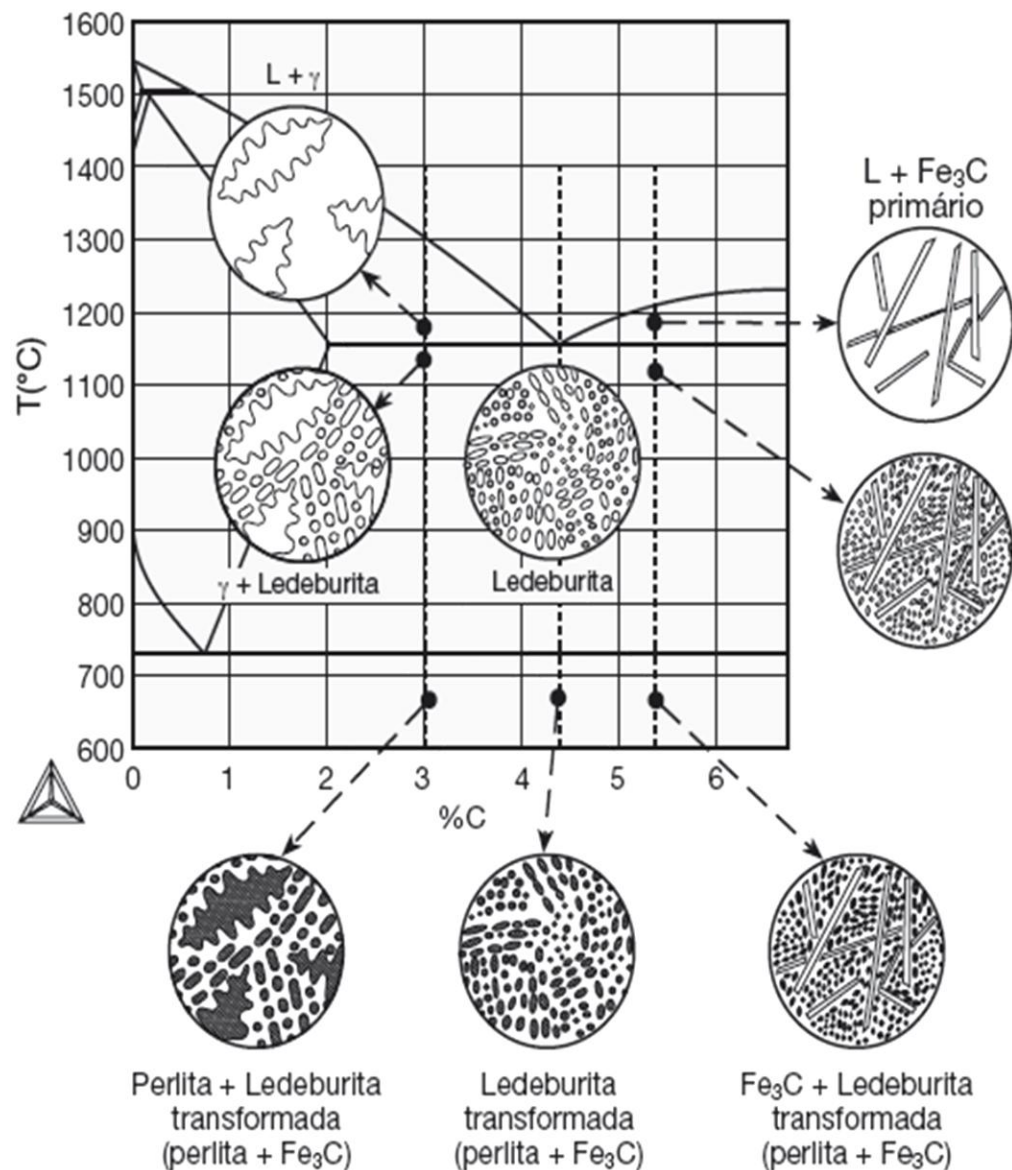
Relação entre os teores de Carbono e Silício nas famílias de ferros fundidos.



Ferro Fundido Branco

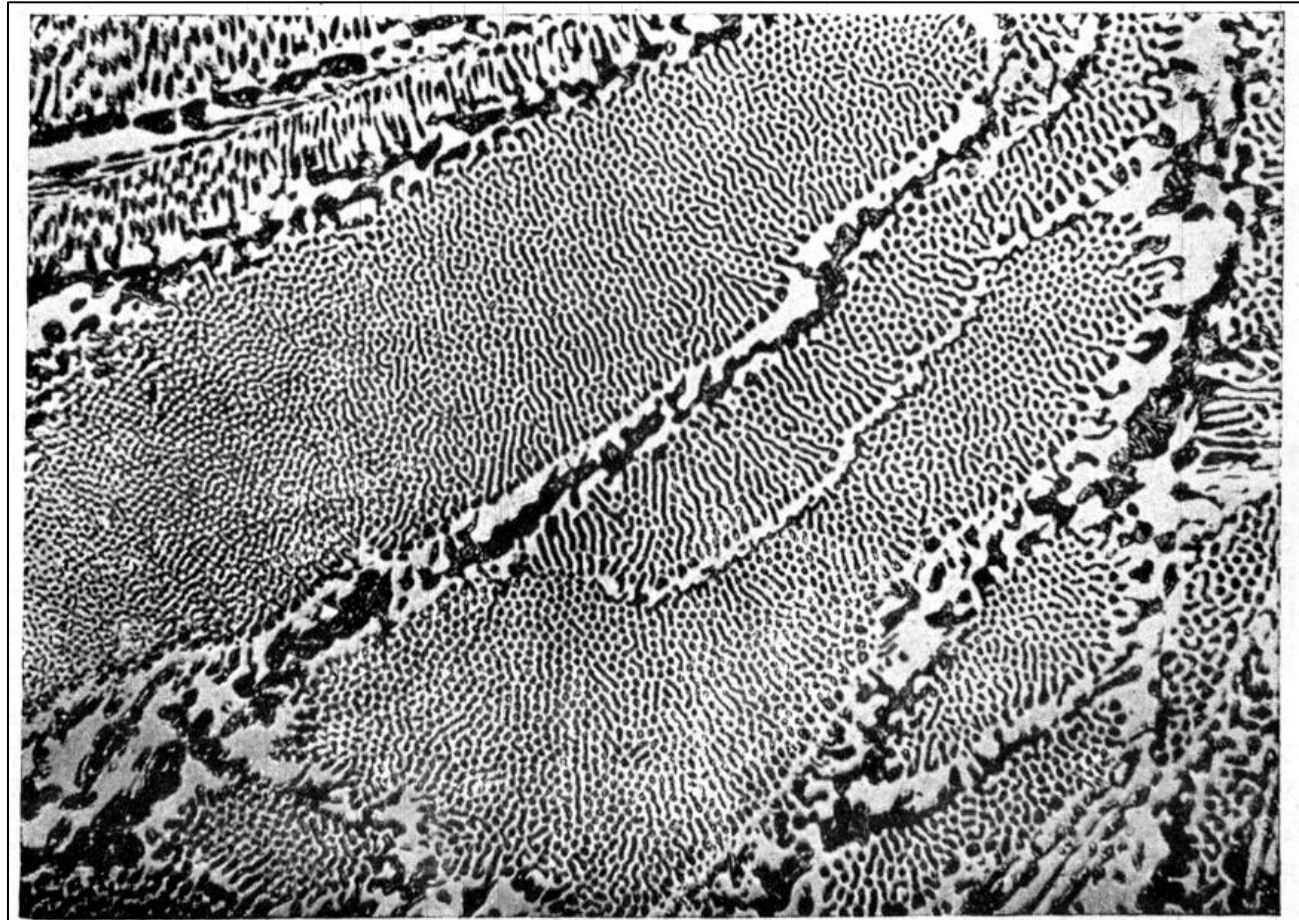
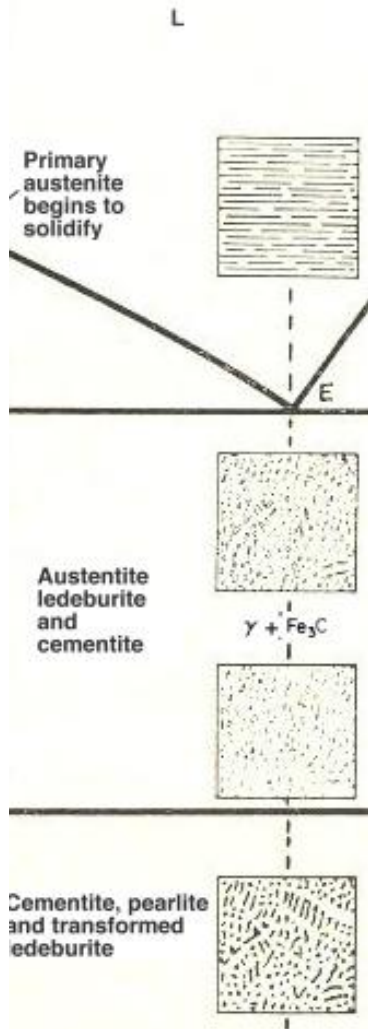
Figura 17.9

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

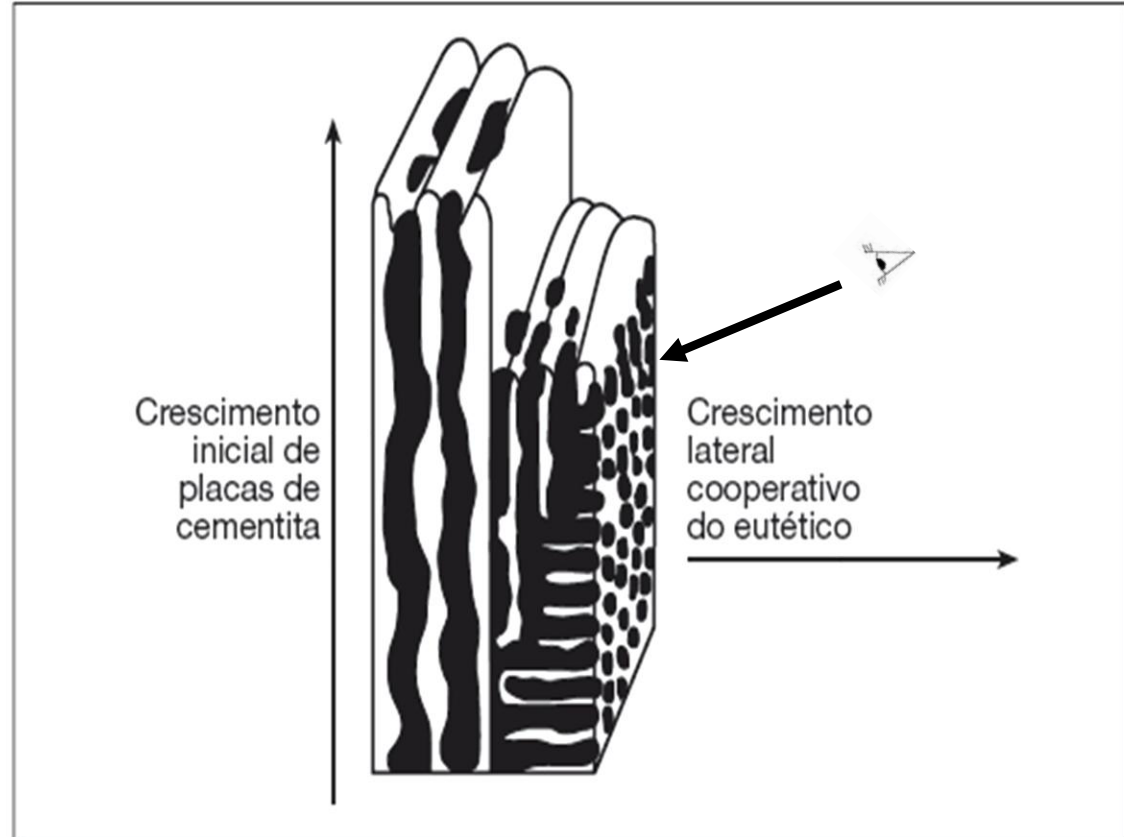


Abaixo de 727°C , a austenita transforma-se em perlita. Com isso a ledeburita será constituída de glóbulos de perlita sobre um fundo de cementita.

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.

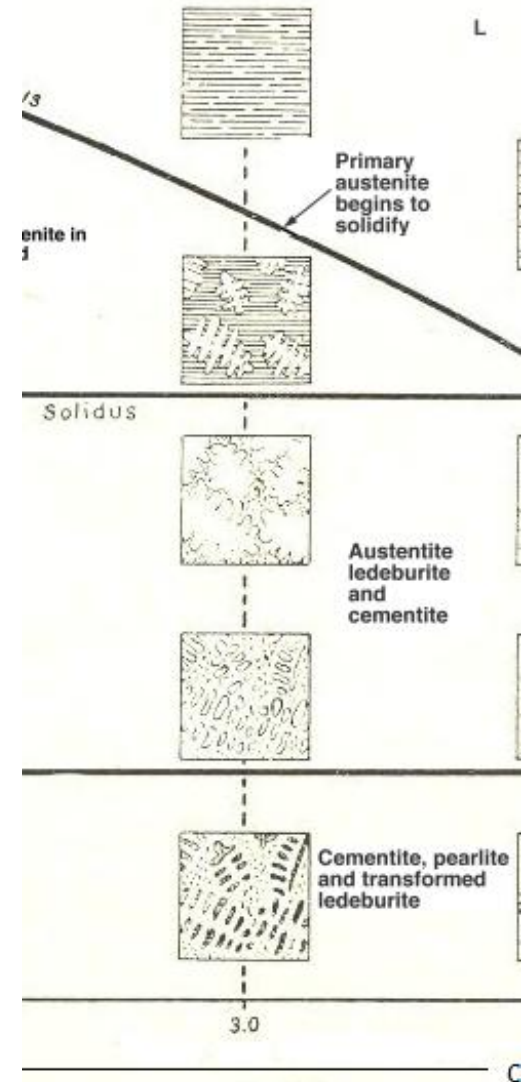


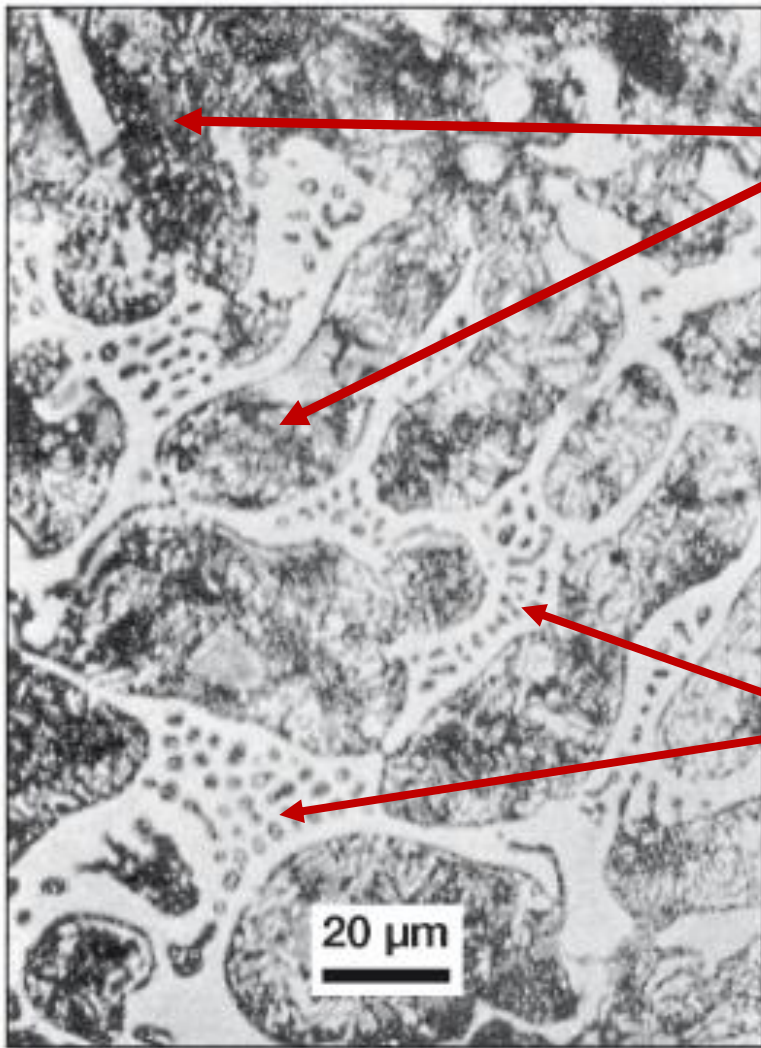
O líquido se enriquece de carbono, atinge a composição do eutético. A nucleação da placa de cementita ocorre entre as dendritas de austenita, depois, ambas crescem cooperativamente em forma de colunas e a austenita se transforma em perlita: ledeburita.

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**.





Dendritas de austenita transformadas em perlita.

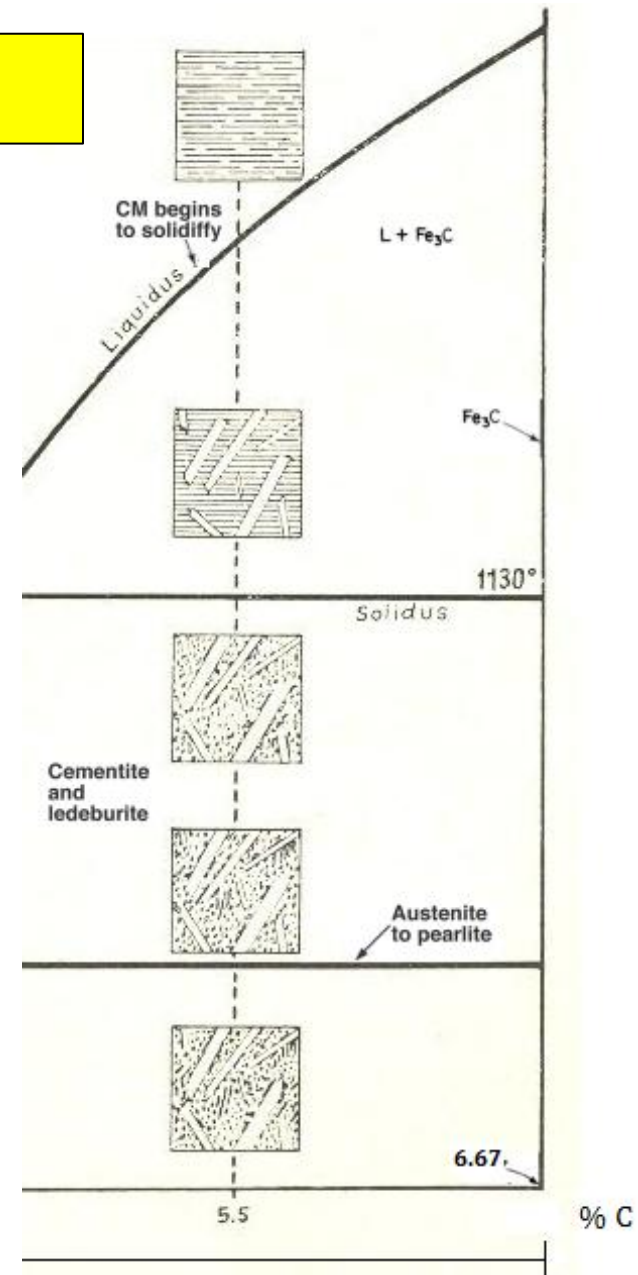
Ledeburita: cementita (clara) e pontos de perlita

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

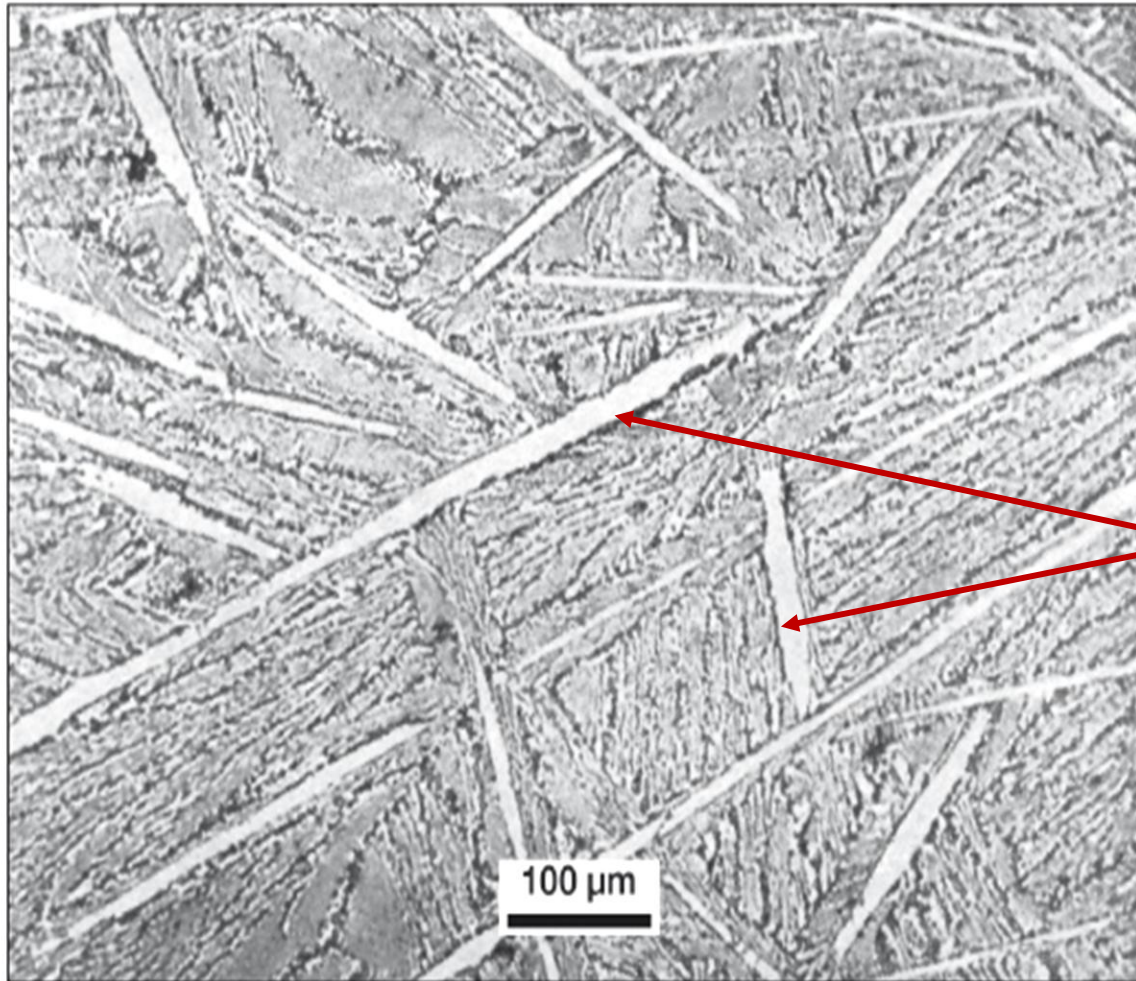


Figura 17.15

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

**Cementita pró-
eutética em
placas**

• 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

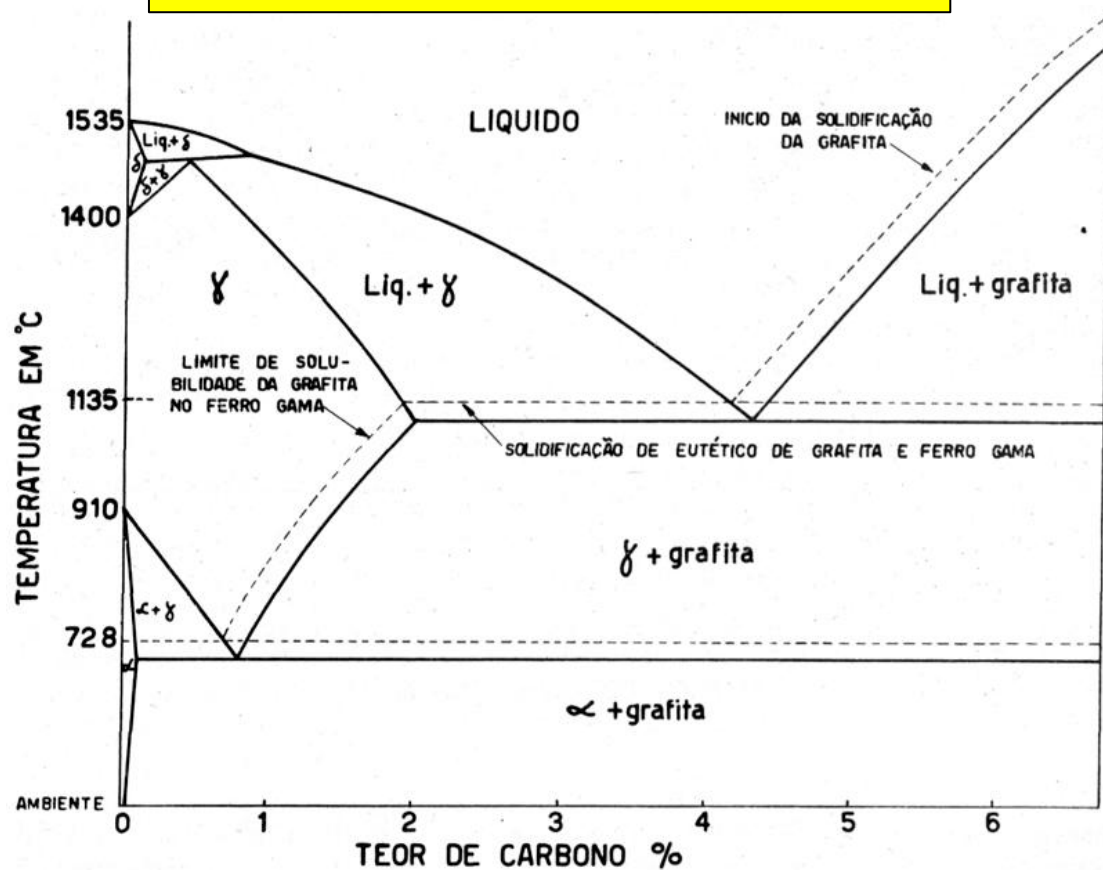
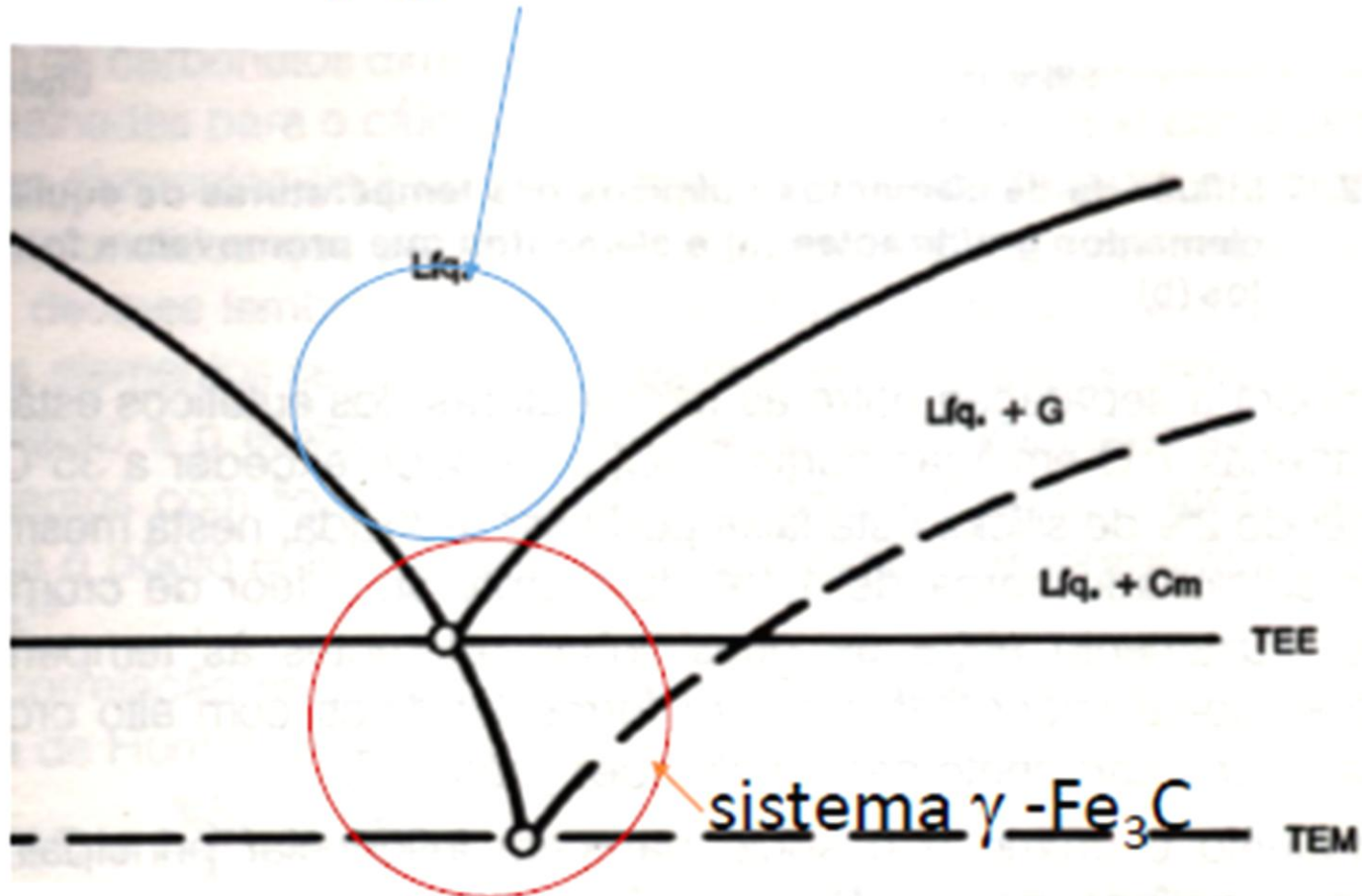


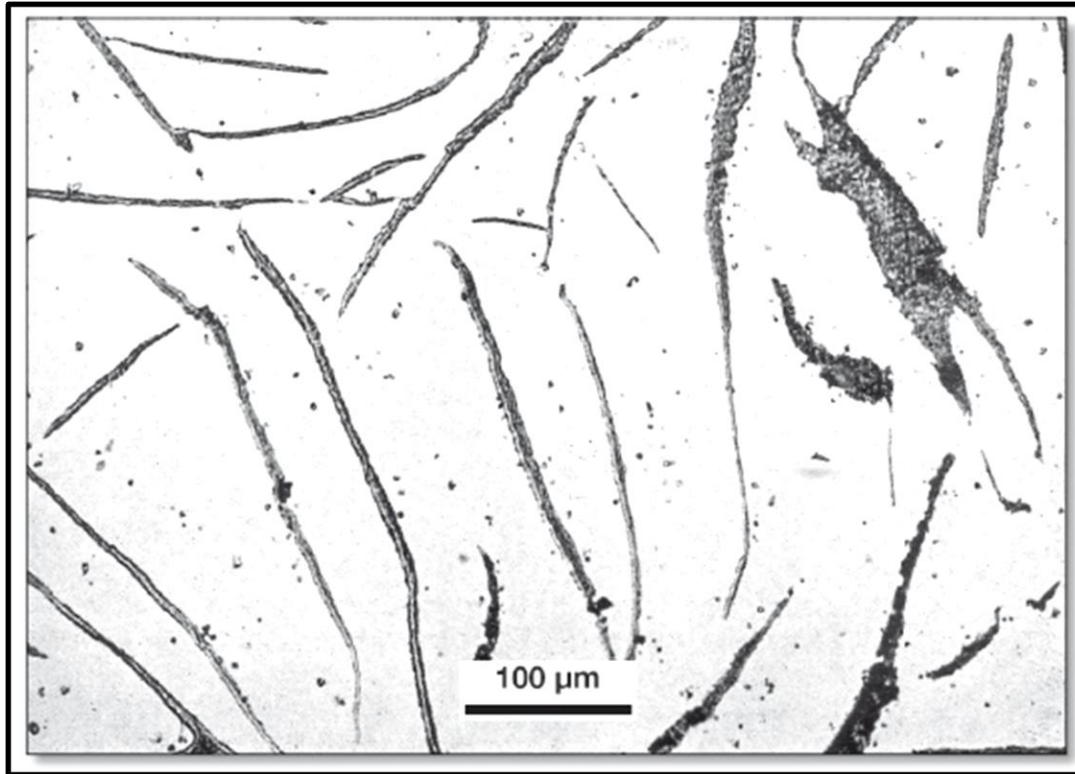
Fig. 521 — Diagrama de equilíbrio ferro-carbono simplificado mostrando em pontilhado o diagrama estável ferro-grafita.

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

sistema γ - grafita



Ferro fundido cinzento



Resfriamento lento: veios de grafita (grafitização) e ferrita



EESC-USP

FERRO FUNDIDO CINZENTO

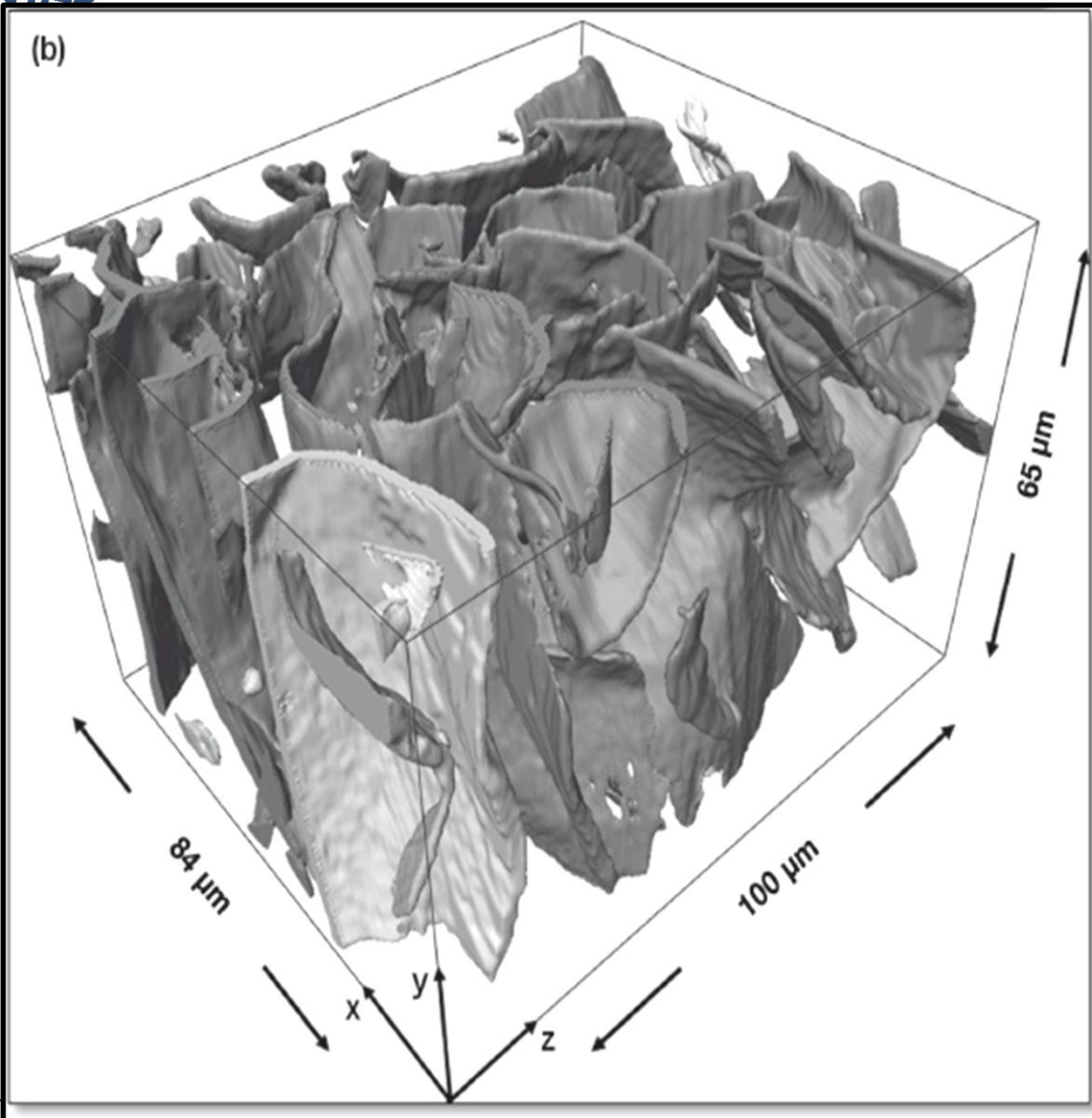


Figura 17.23(b)

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

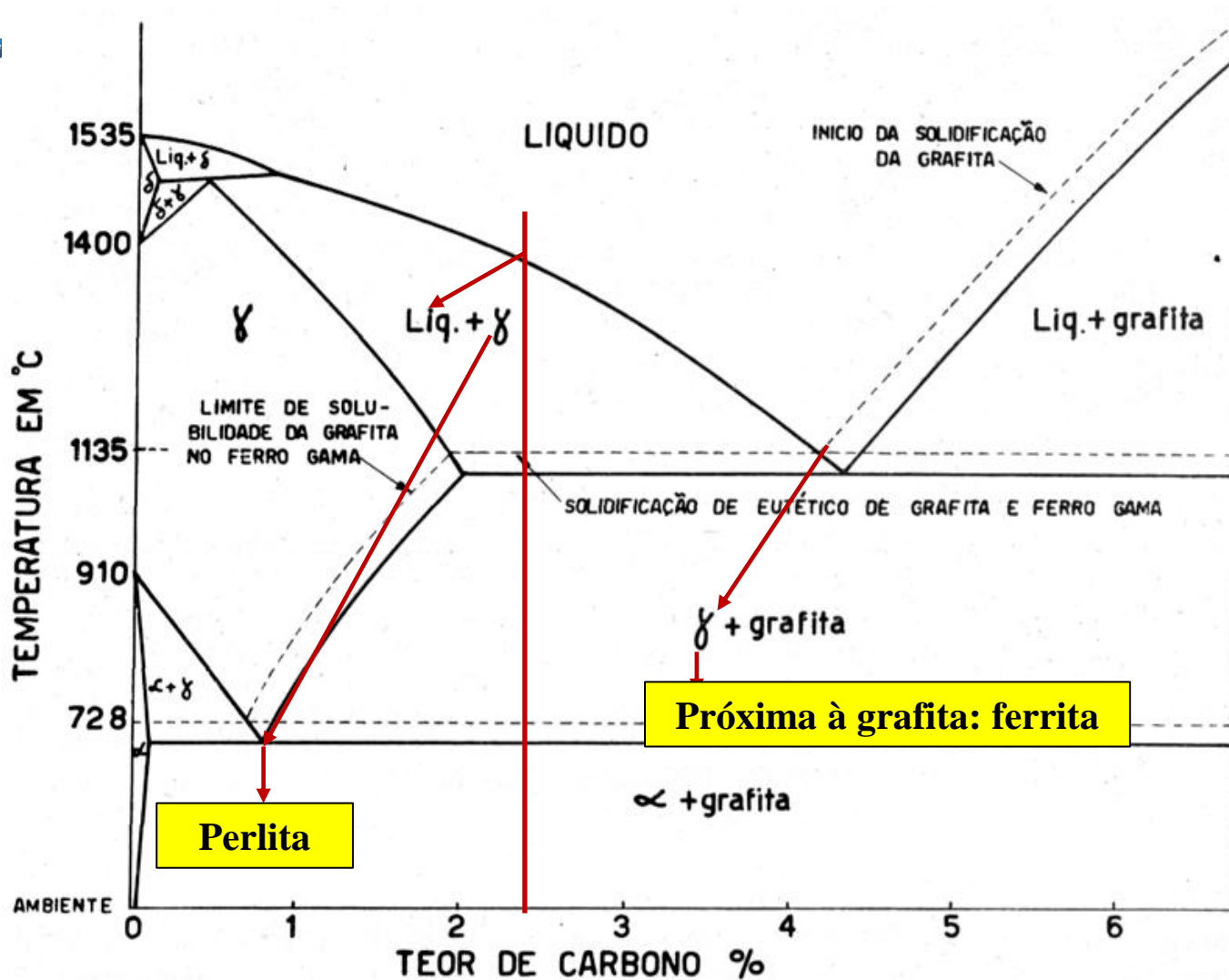
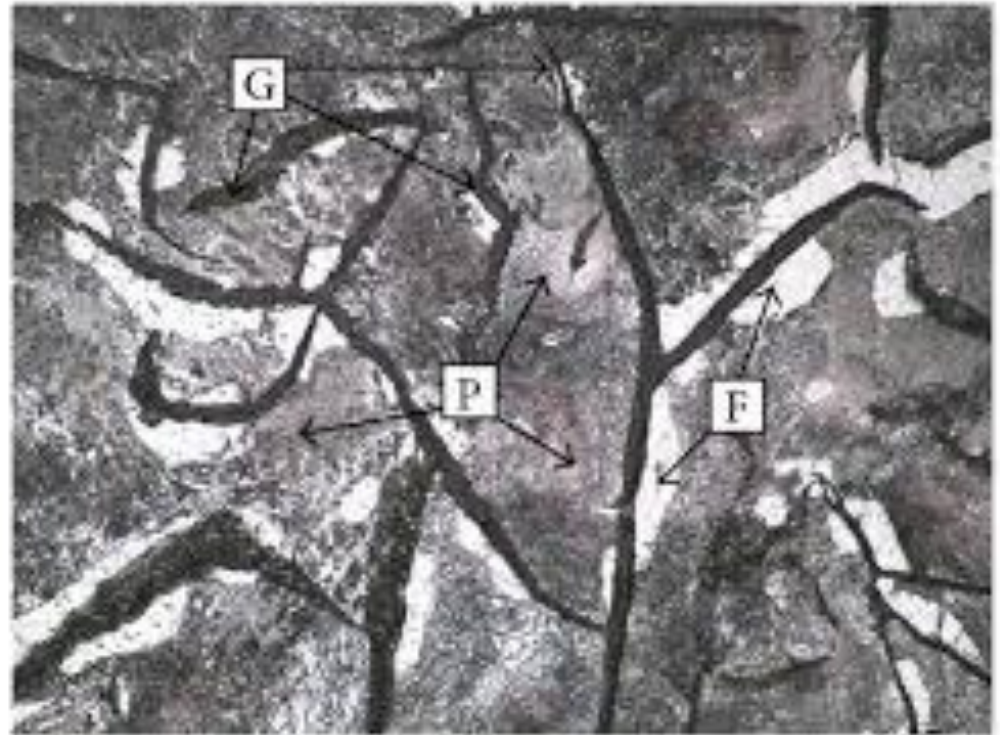


Fig. 521 — Diagrama de equilíbrio ferro-carbono simplificado mostrando em pontilhado o diagrama estável ferro-grafita.

- 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**.

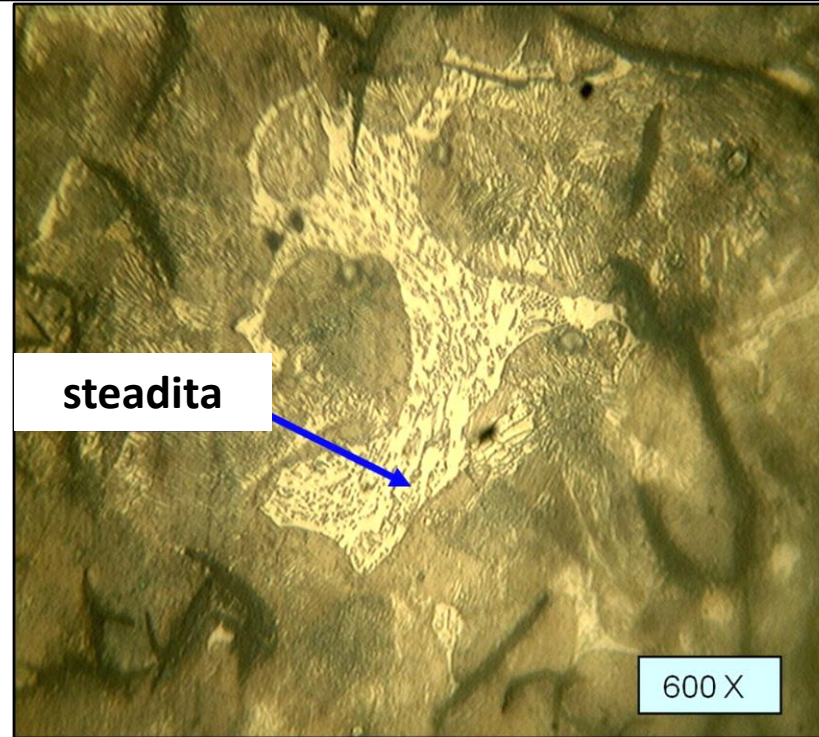
Ferro Fundido Cinzento Hipoeutético



- 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 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

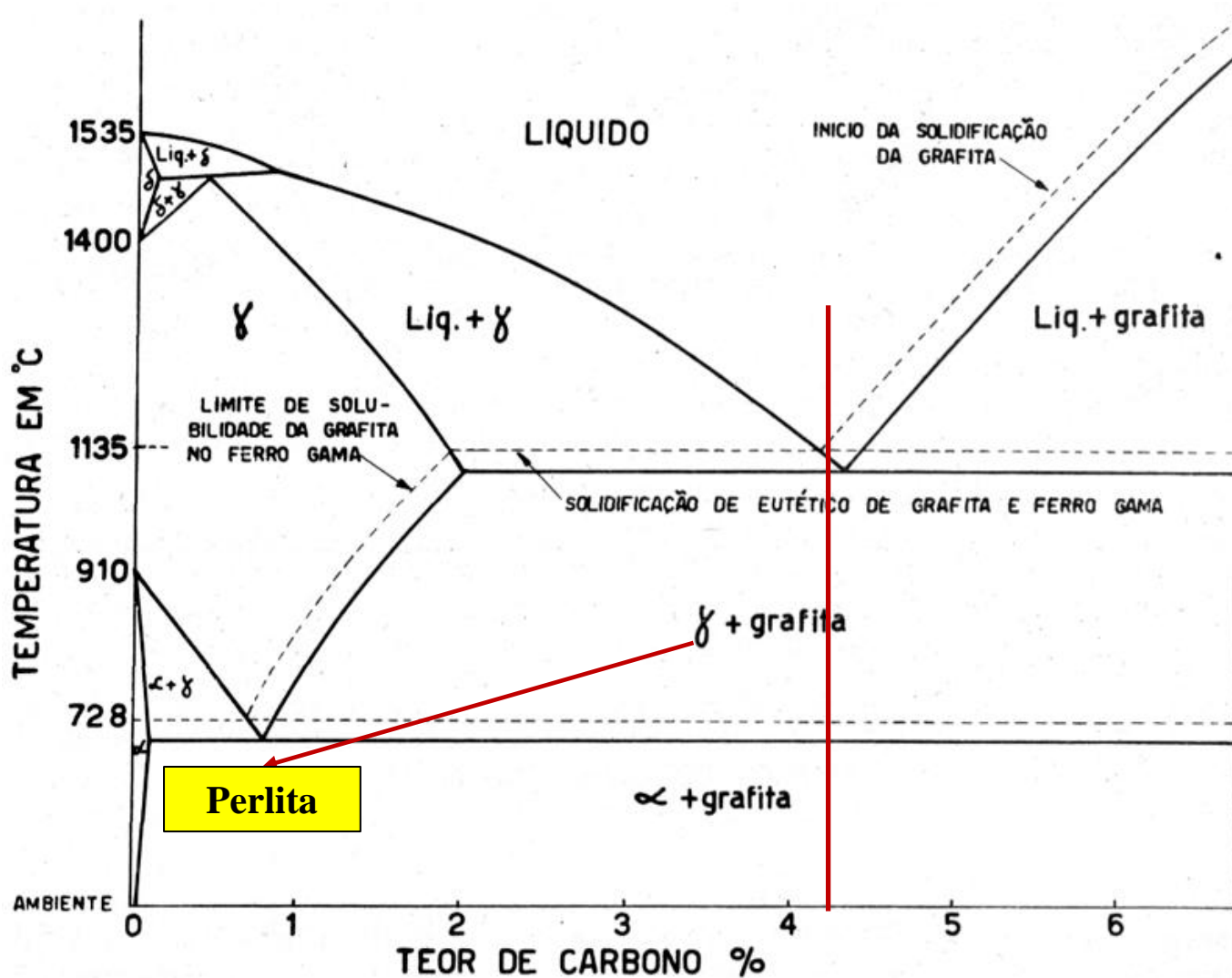
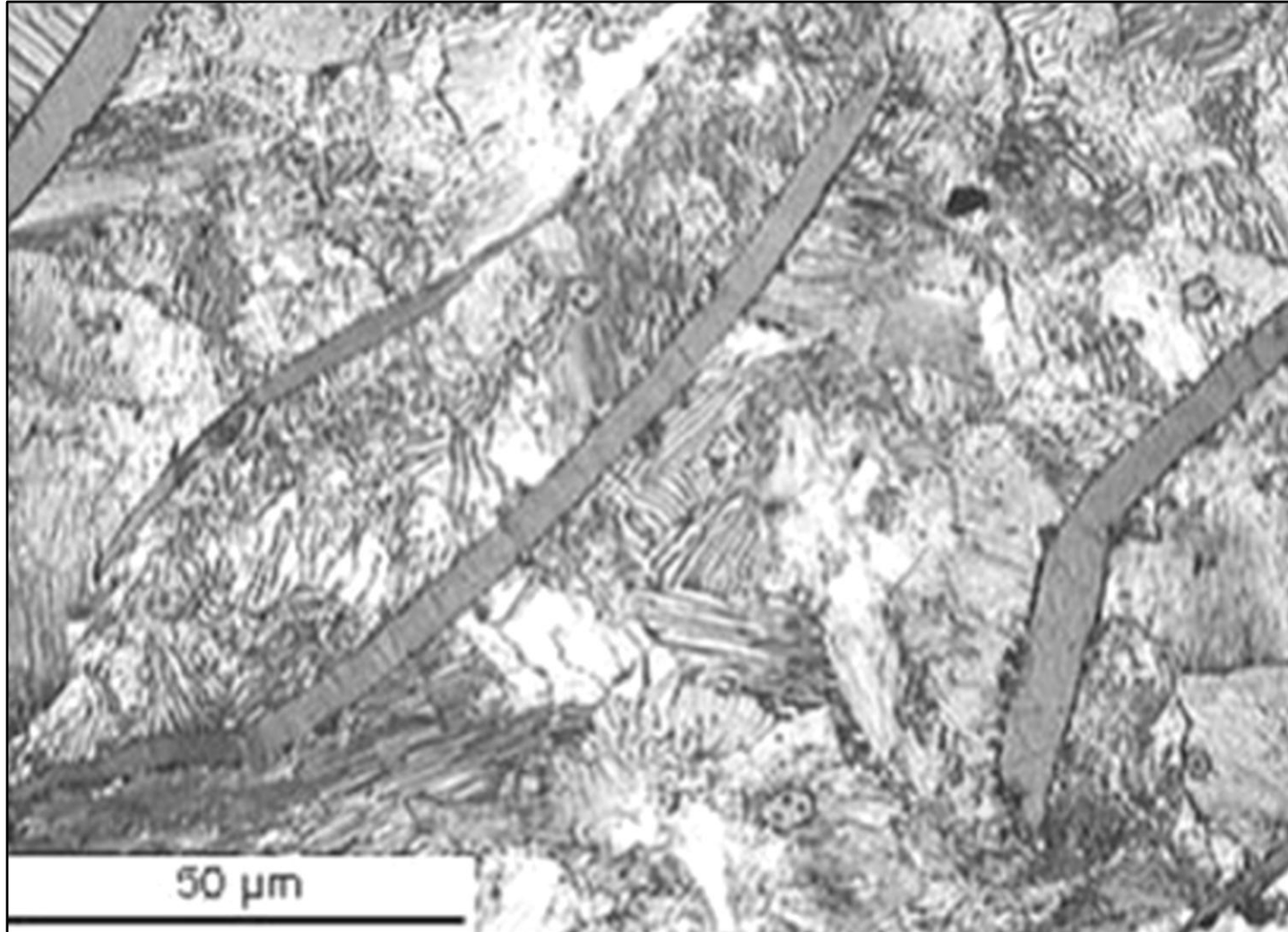


Fig. 521 — Diagrama de equilíbrio ferro-carbono simplificado mostrando em pontilhado o diagrama estável ferro-grafita.

Ferro Fundido Cinzento Eutético



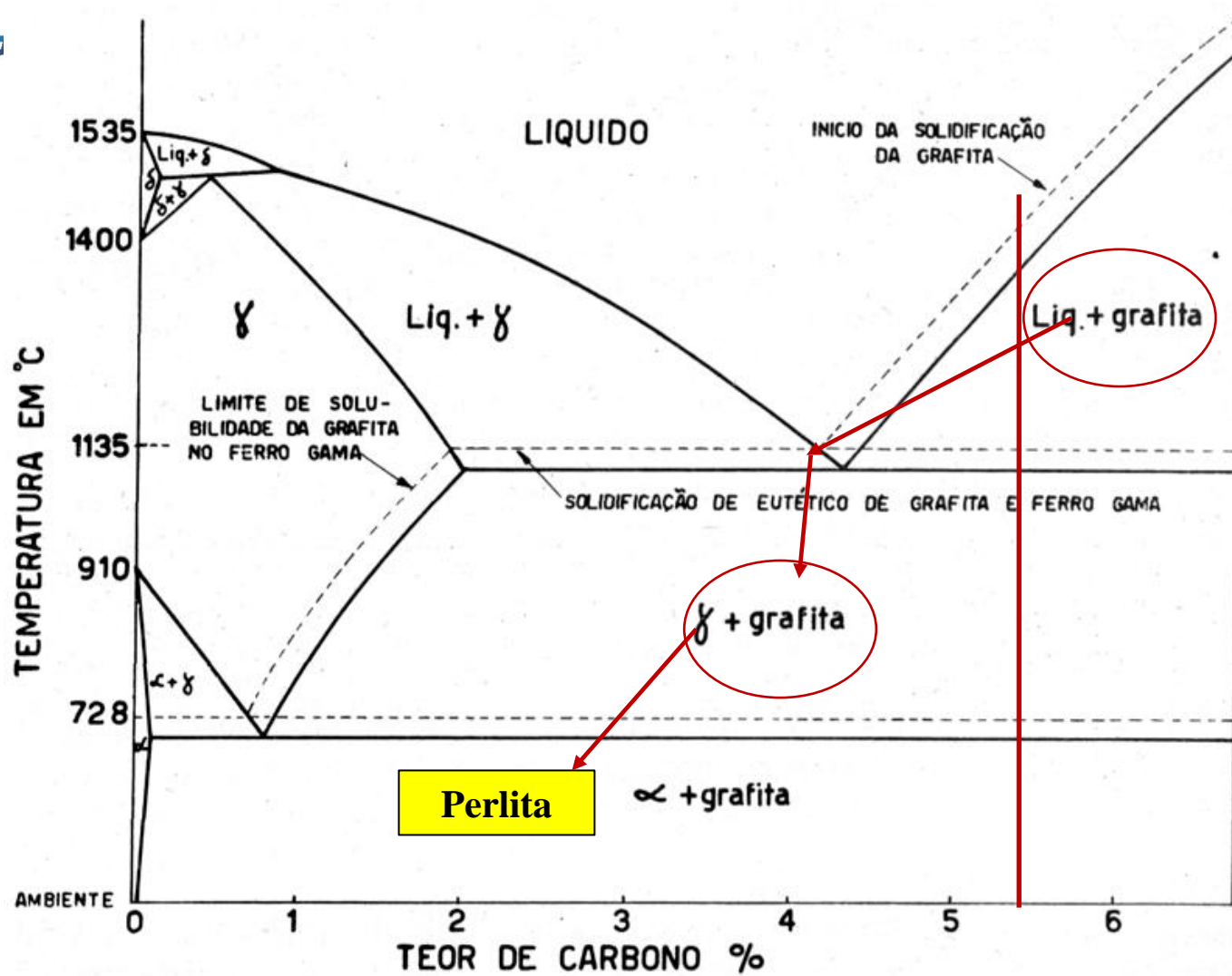
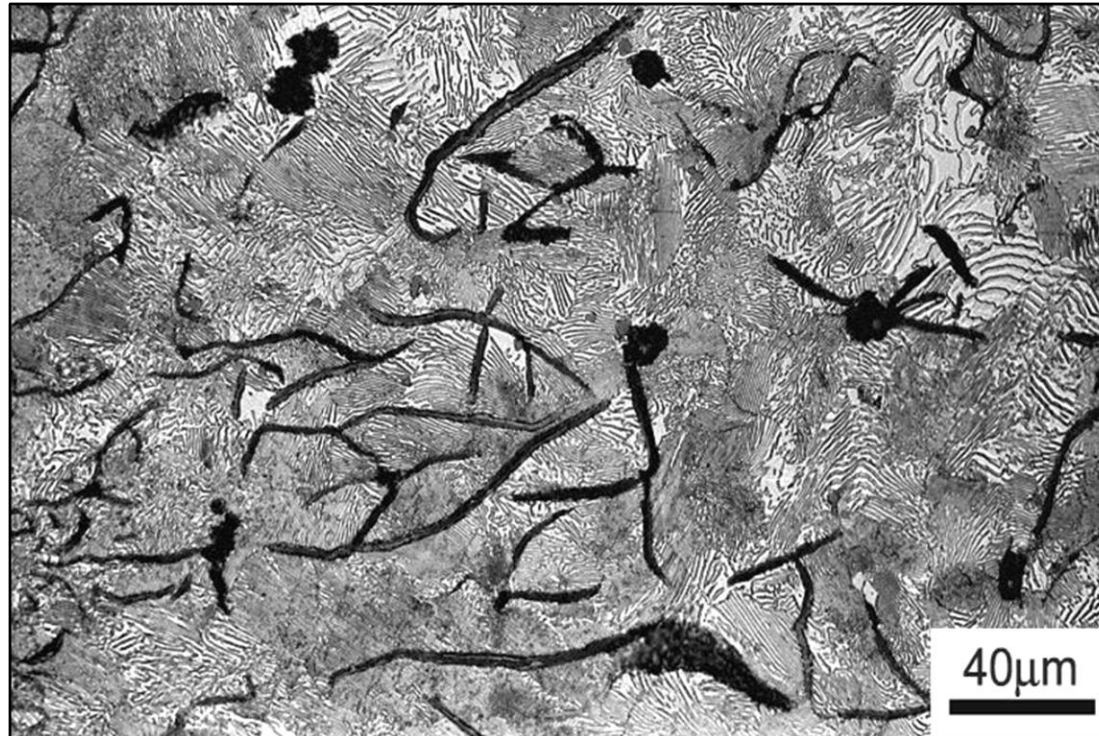


Fig. 521 — Diagrama de equilíbrio ferro-carbono simplificado mostrando em pontilhado o diagrama estável ferro-grafita.

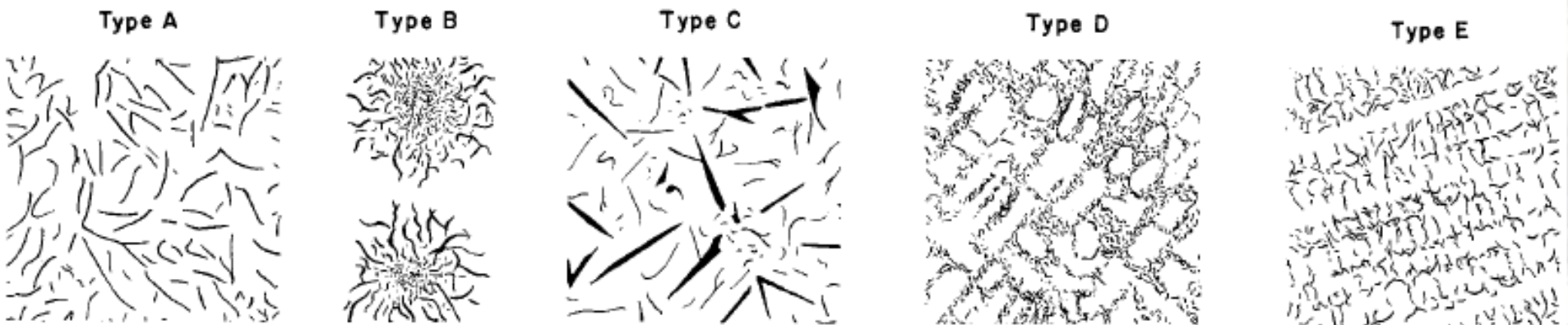
Ferro Fundido Cinzento Hipereutético

- 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**



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: composição e resfriamento intermediários

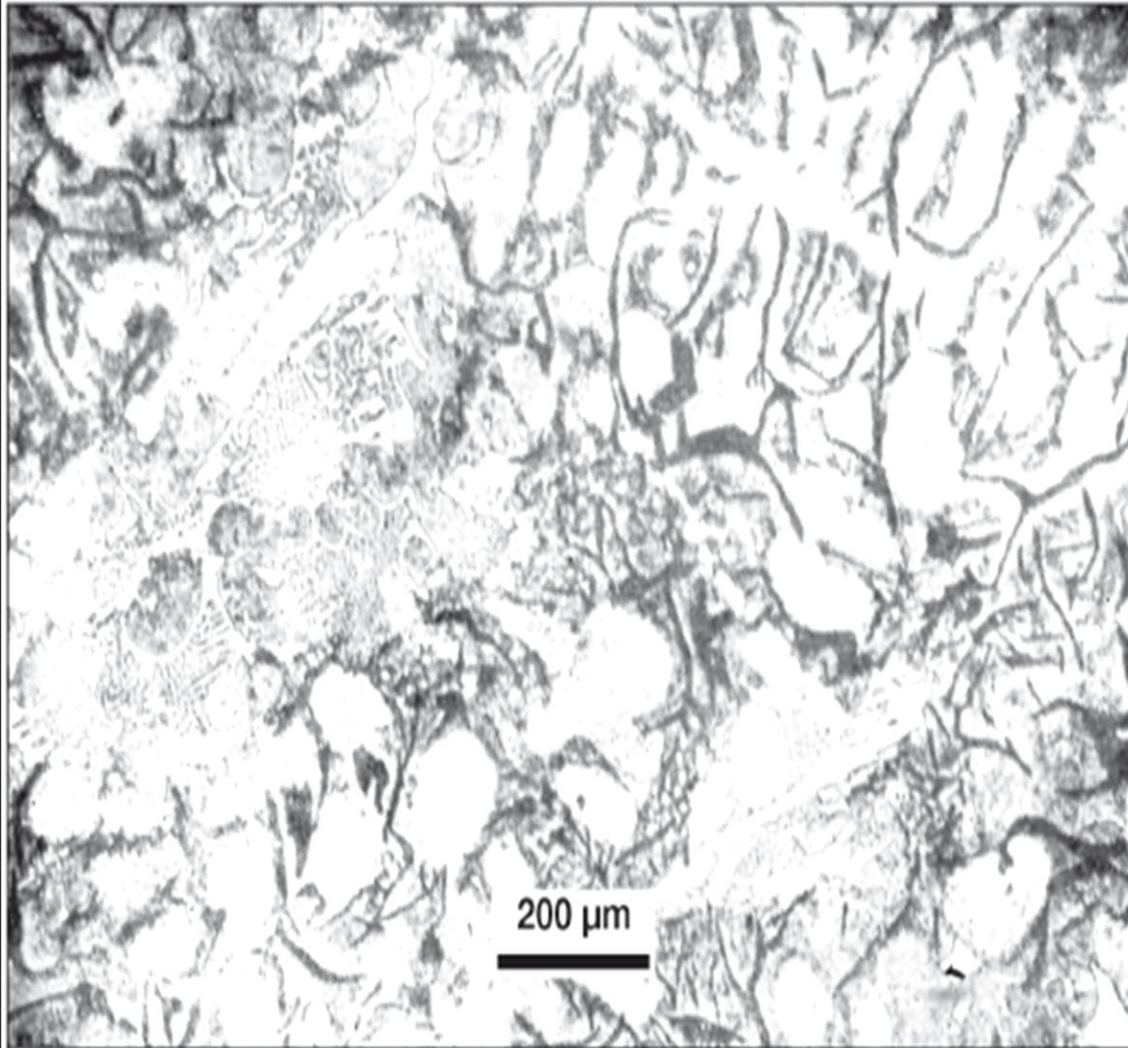


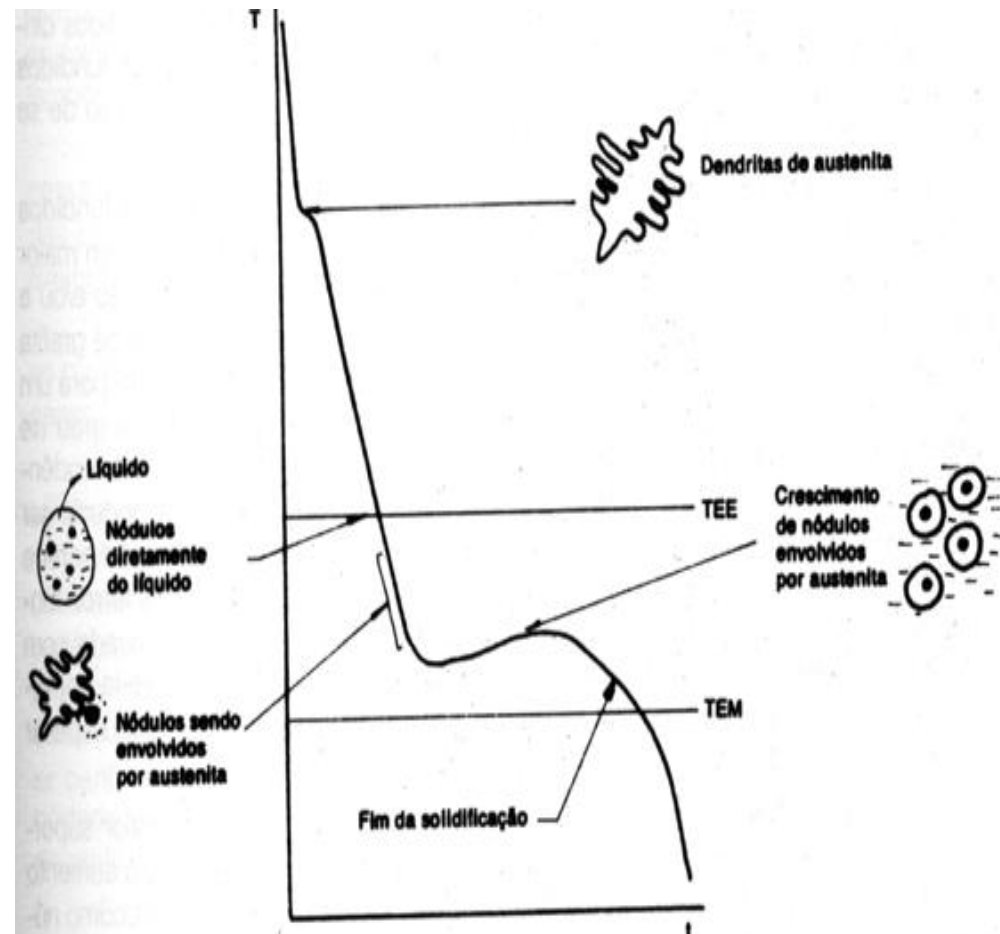
Figura 17.66

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

Ferros Fundidos Nodulares – Sequência de solidificação

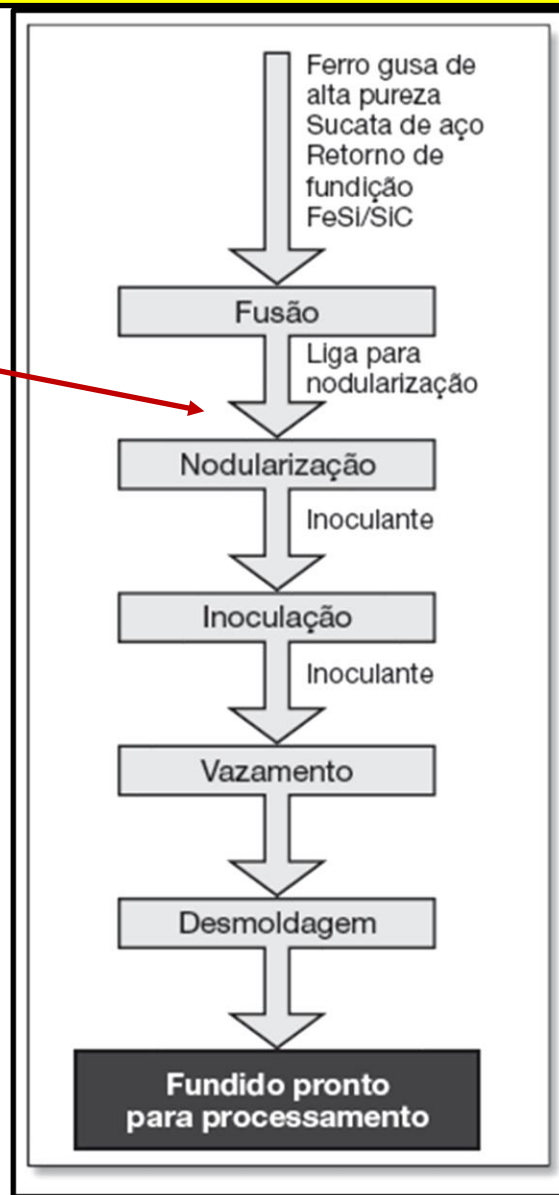
✓ **Hipoeutéticos:** Formação de **dendritas de austenita**. A temperatura **diminui**, o líquido que sobrou torna-se mais rico em carbono e silício. Abaixo da temperatura do eutético, ocorre a **formação de nódulos de grafita** que são posteriormente **envolvidos pela austenita**

✓ **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

**MAGNÉSIO OU
CÉRIO**



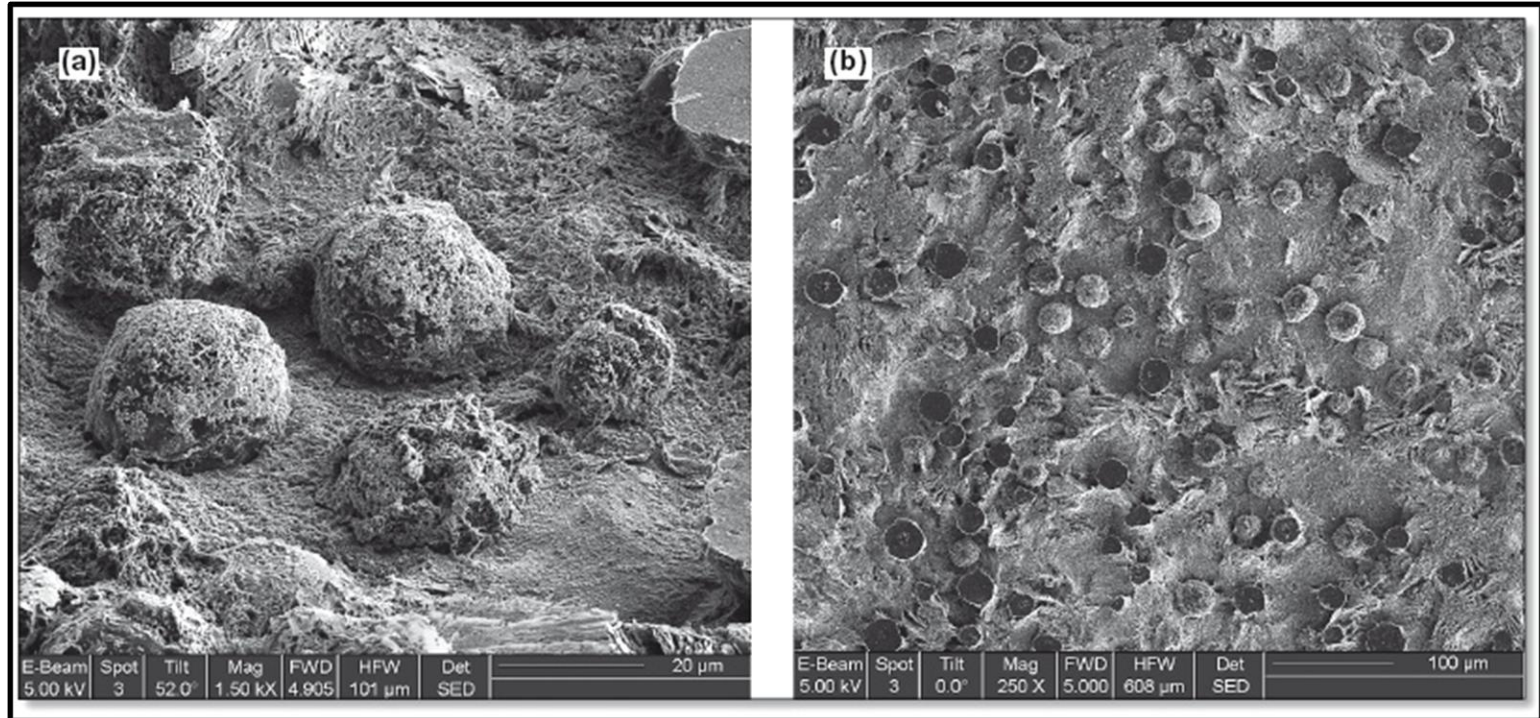


Figura 17.78(a) e (b)

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)

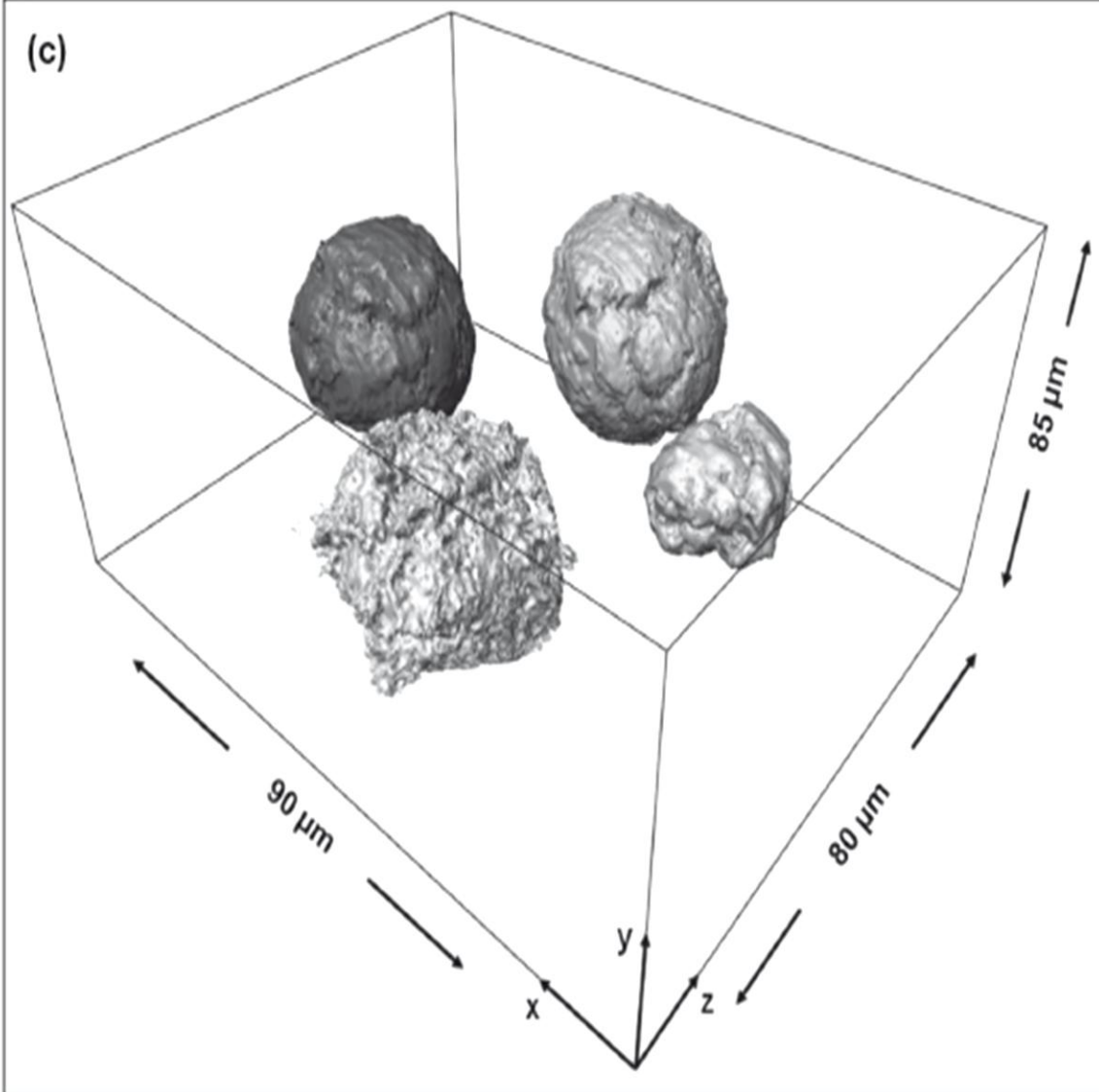


Figura 17.78(c)

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.



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.**

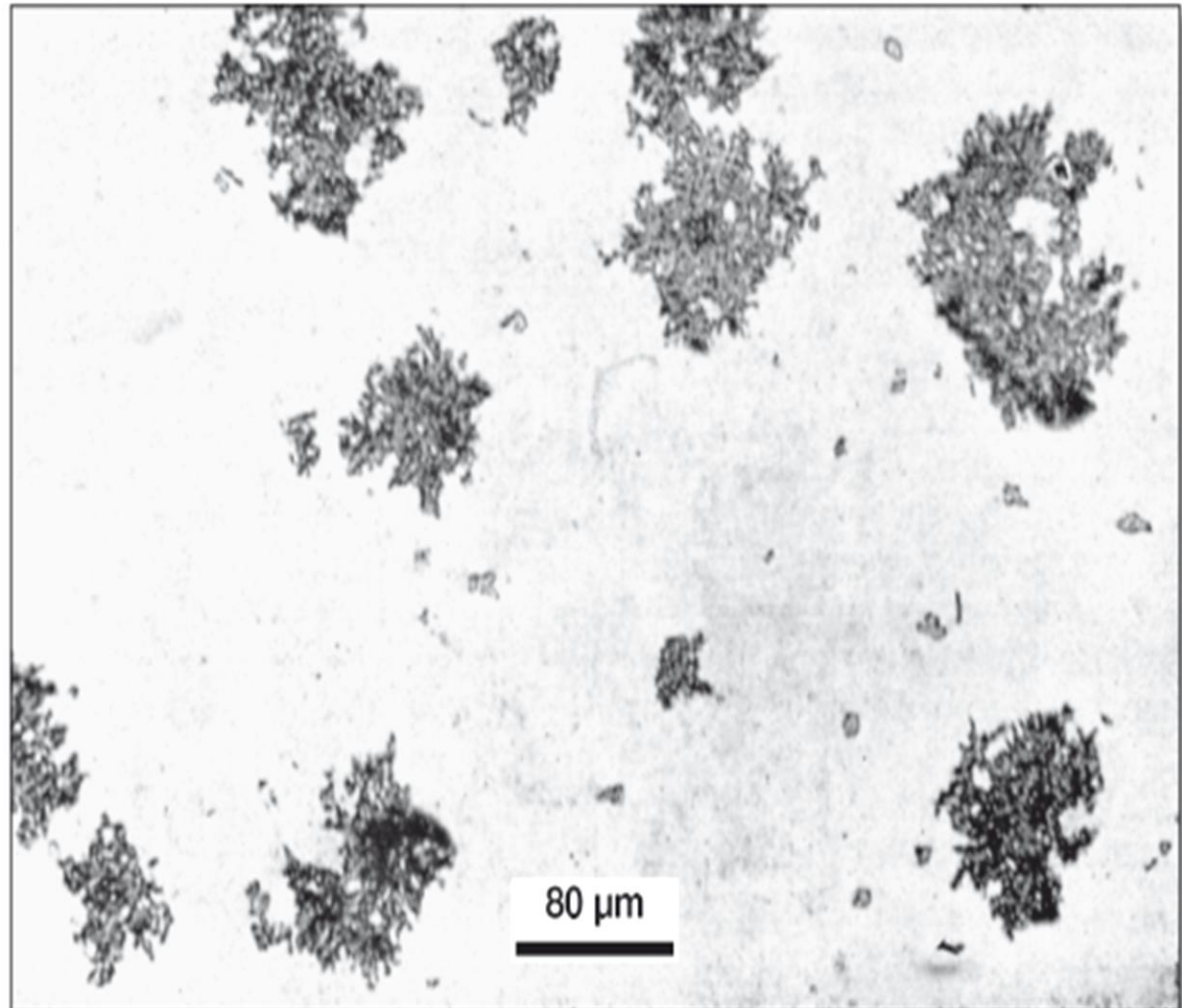
Maleável preto ou de núcleo preto:

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

FERRO FUNDIDO MALEÁVEL 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

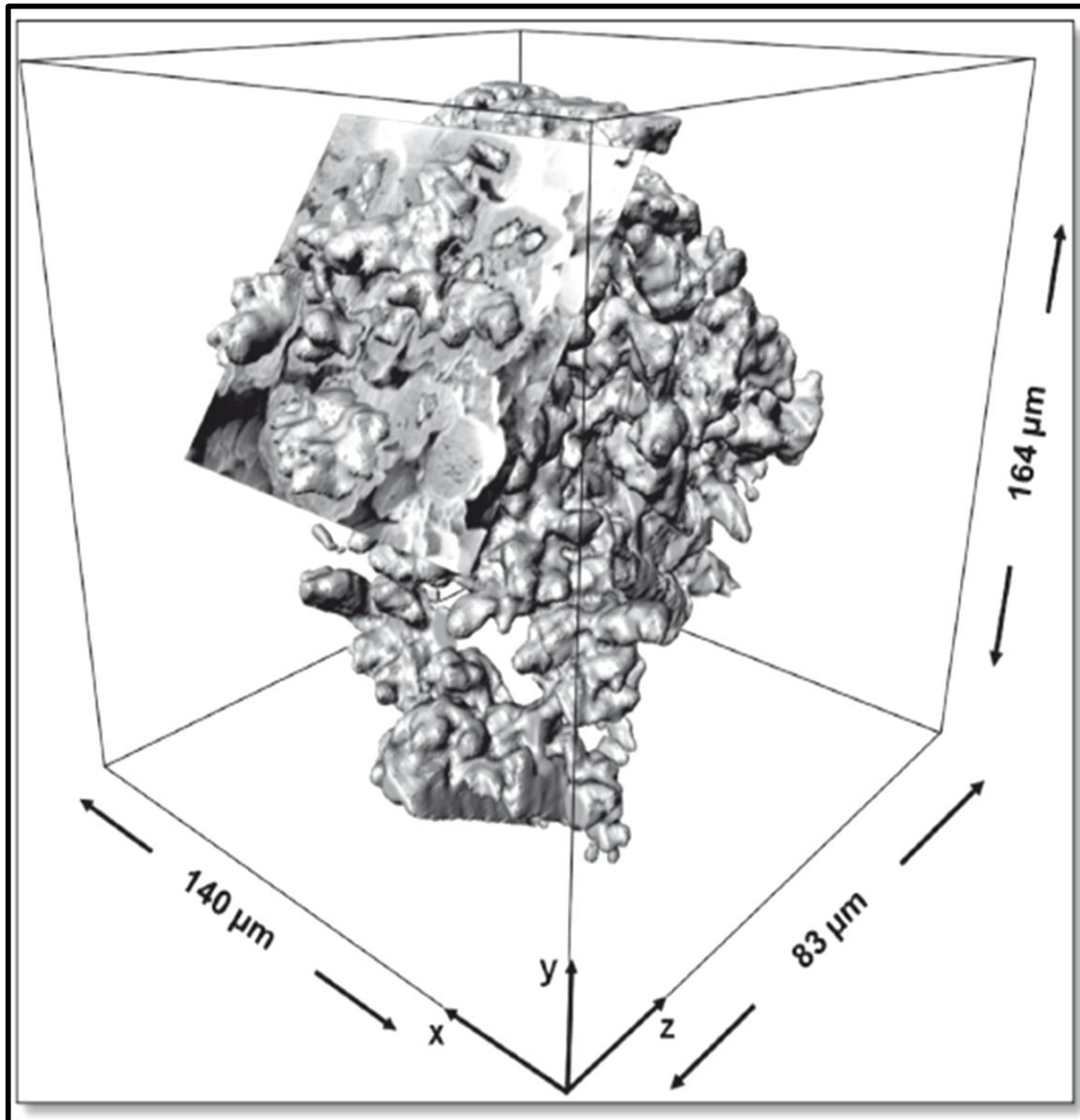


Figura 17.101

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 F₀F₀ MALEÁVEL FERRÍTICO

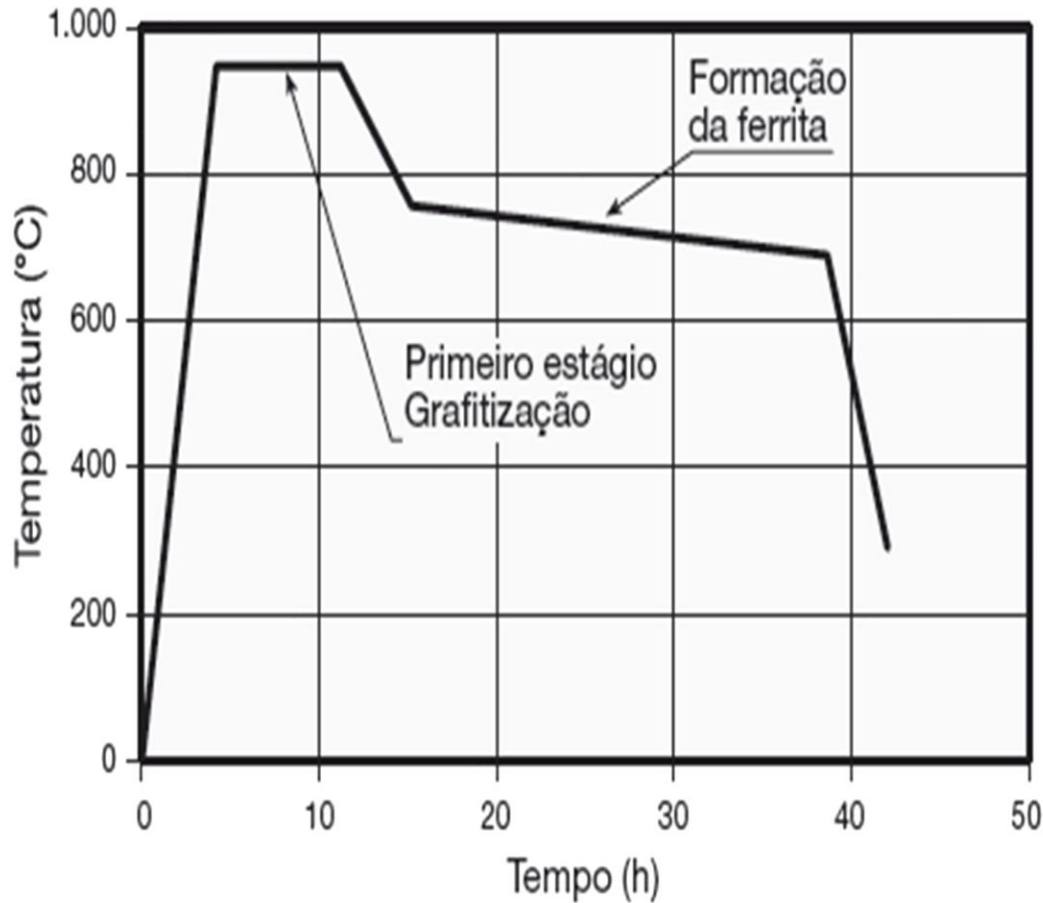


Figura 17.103

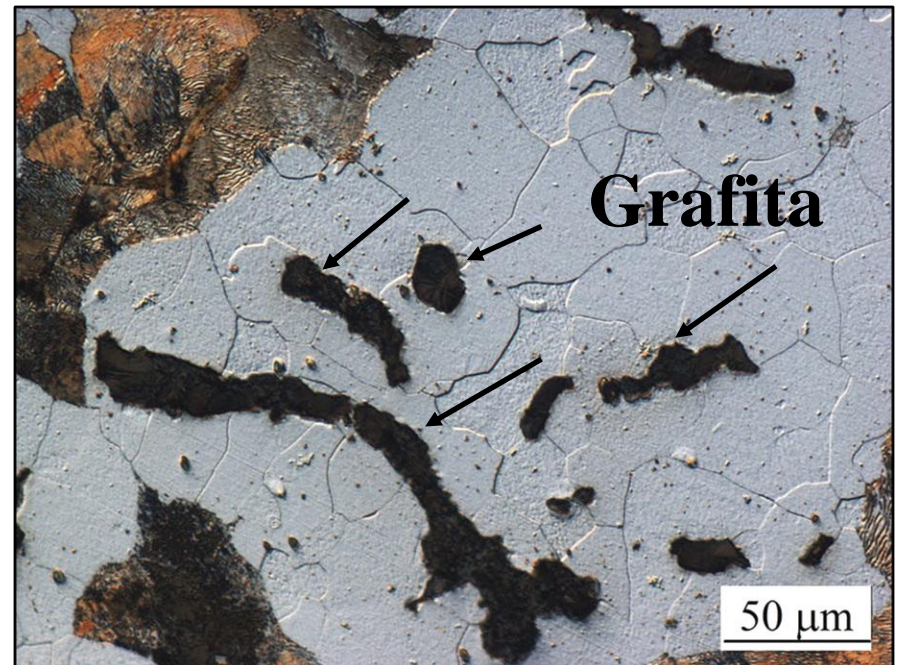
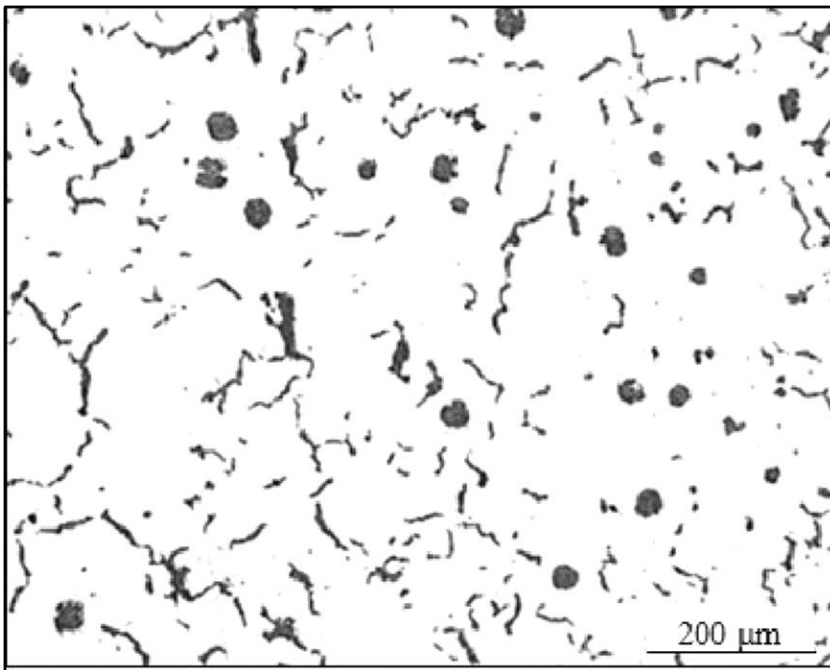
Ciclo de tratamento térmico típico para a obtenção de ferro fundido maleável preto ferrítico. O primeiro estágio em que a cementita é transformada em grafita pode levar cerca de 8 h. O resfriamento, no campo austenítico, deve levar à precipitação adicional de grafita, evitando a supersaturação da austenita 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.

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 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

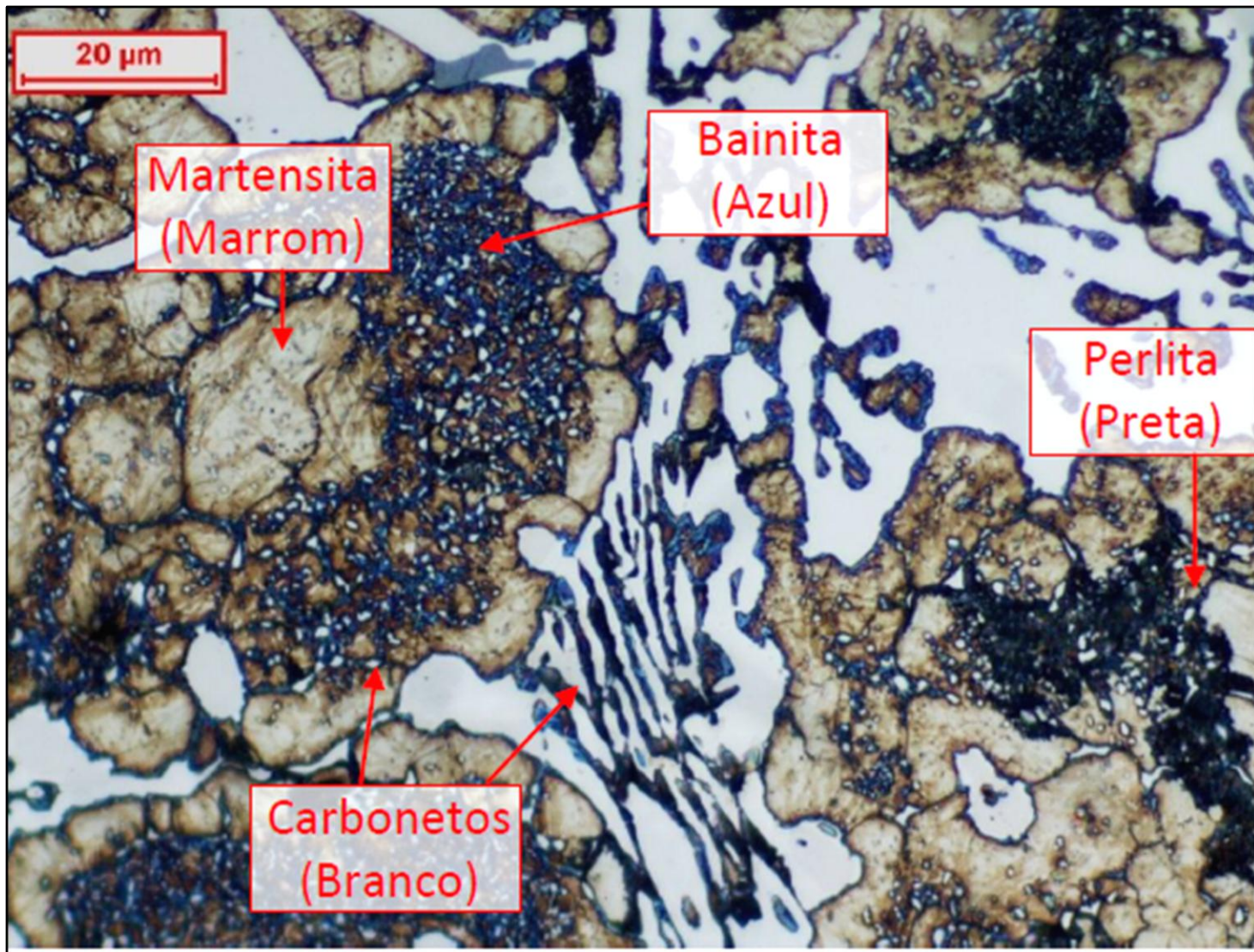
(YOKOMIZO, SASAGURI, NANJO, & MATSUBARA, 2002), (YOKOMIZO, SASAGURI, NANJO, & MATSUBARA, 2005), (YOKOMIZO, SASAGURI, & MATSUBARA, 2000), (YOKOMIZO, SASAGURI, NANJO, & MATSUBARA, 2010) e (OKOMIZO, Y., SASAGURI, N., YAMAMOTO, K., ERA, H., & MATSUBARA, Y., 2010)

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:

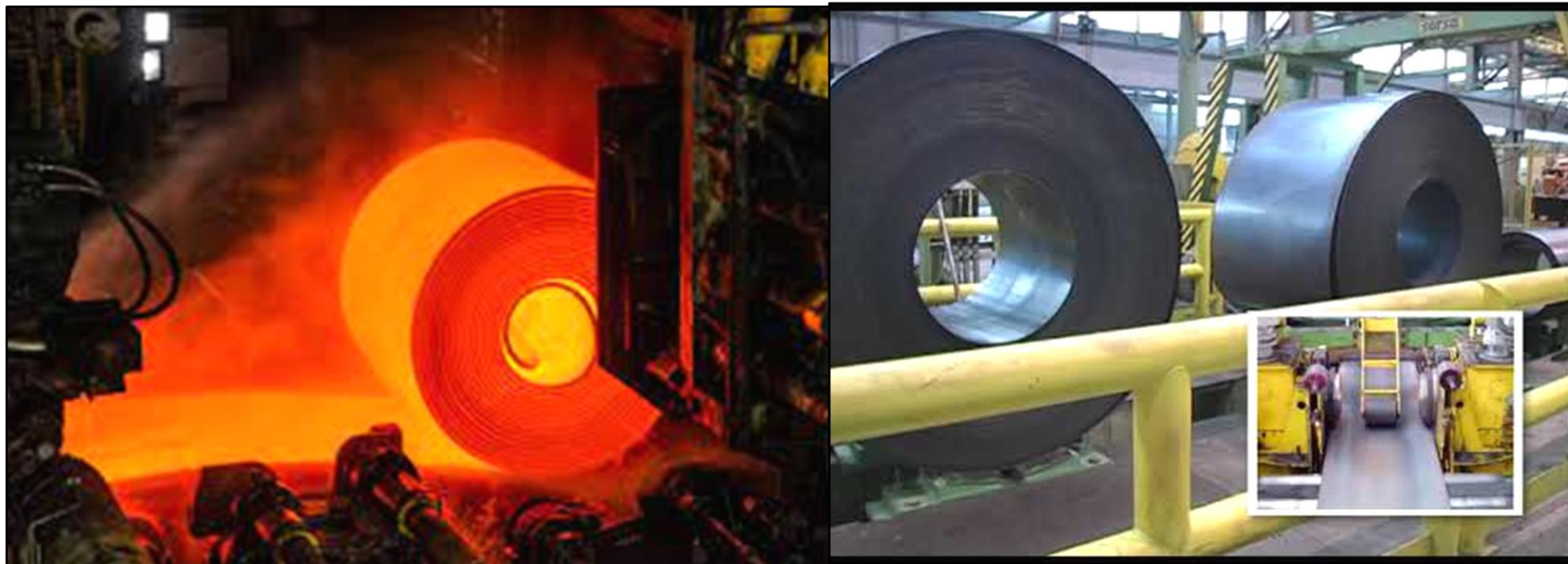
- Resistência à Fadiga Térmica (superfície);
- Resistência ao desgaste (superfície);
- Boa tenacidade (interna).

Exemplo: Cilindros de Laminação de tiras a quente.

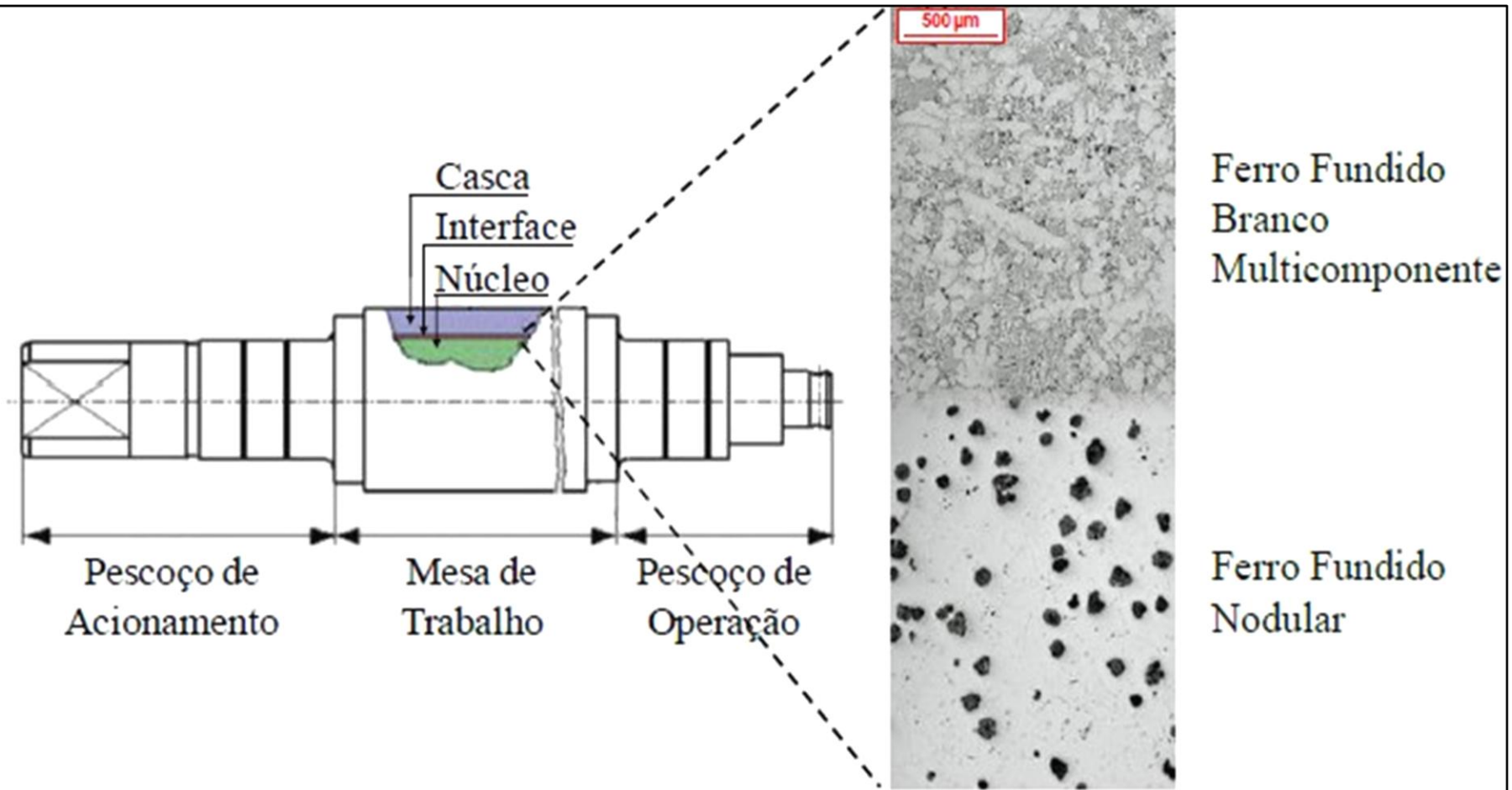
LAMINAÇÃO DE TIRAS A QUENTE (LTQ)

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



PROPRIEDADES DOS FoFos

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.

TRATAMENTO TÉRMICOS DOS AÇOS NORMALIZAÇÃO E RECOZIMENTO

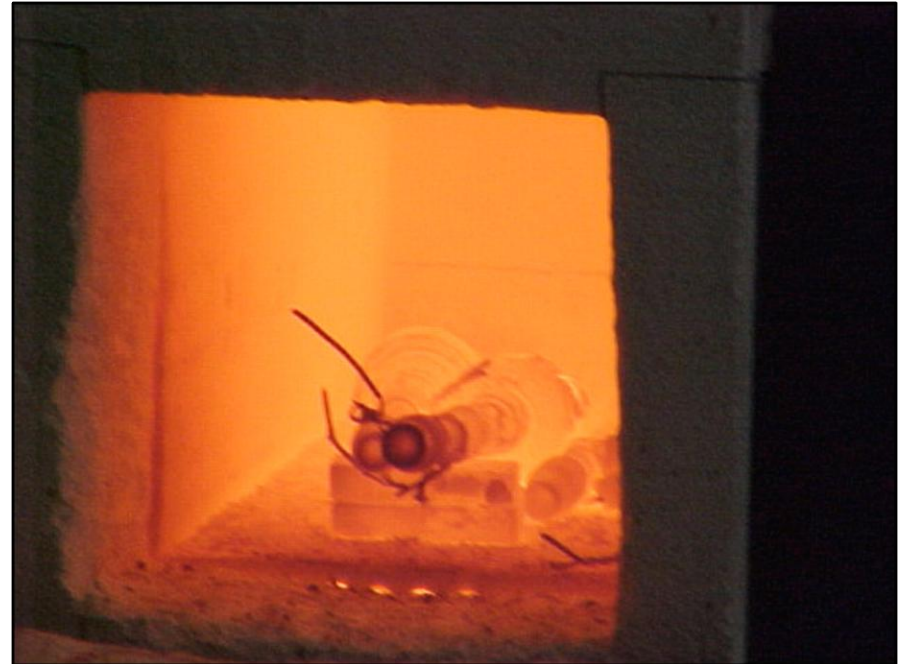
TRATAMENTO TÉRMICOS

- **ALTERAM A MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES;**
- **ADEQUAÇÃO AOS PROJETOS;**
- **FACILITAR OU VIABILIZAR PROCESSOS DE FABRICAÇÃO;**

FORNOS

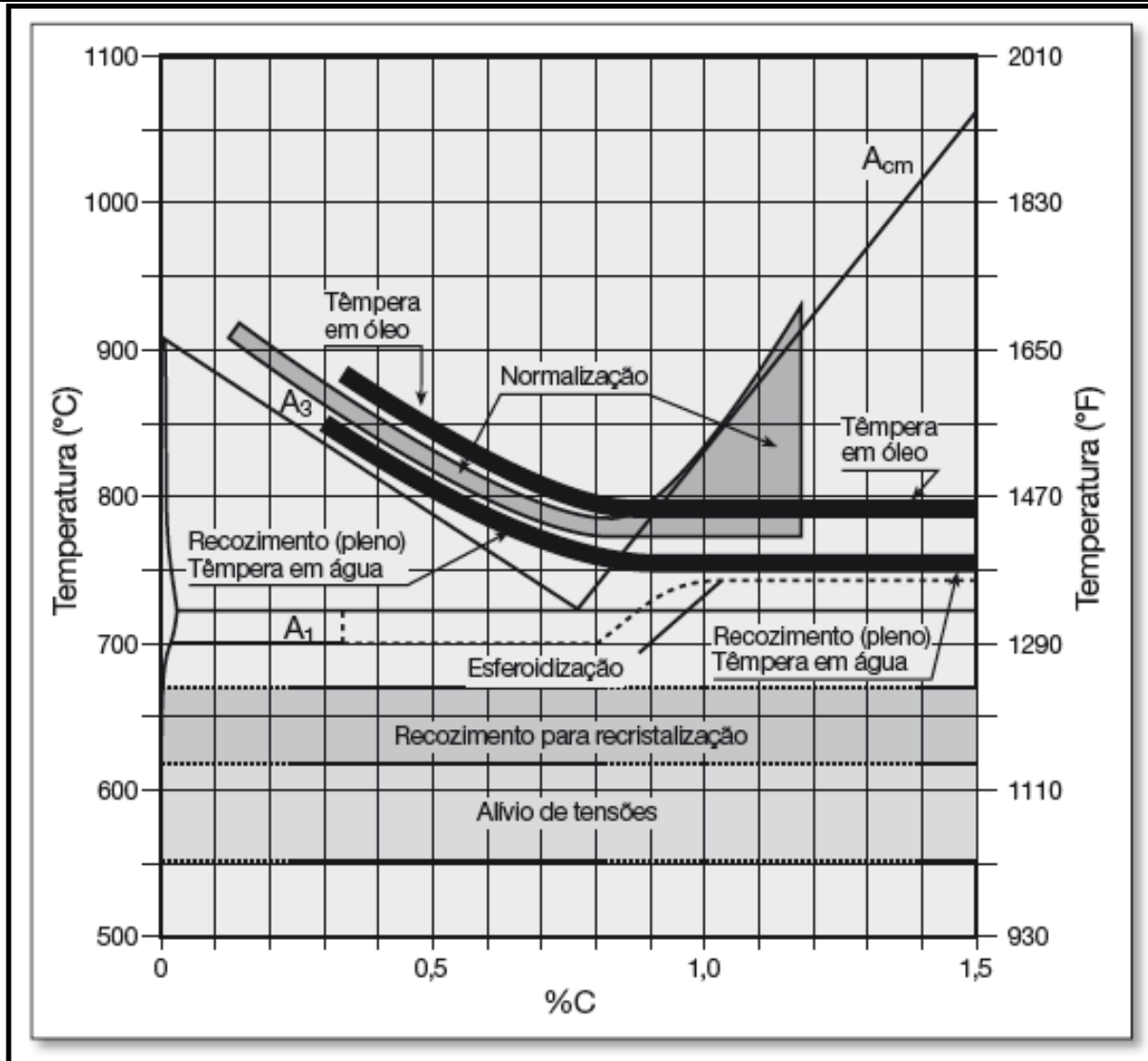


FORNO TIPO MUFLA



**Tratamento térmico de cps –trabalho de mestrado-
Marcomini-2008**

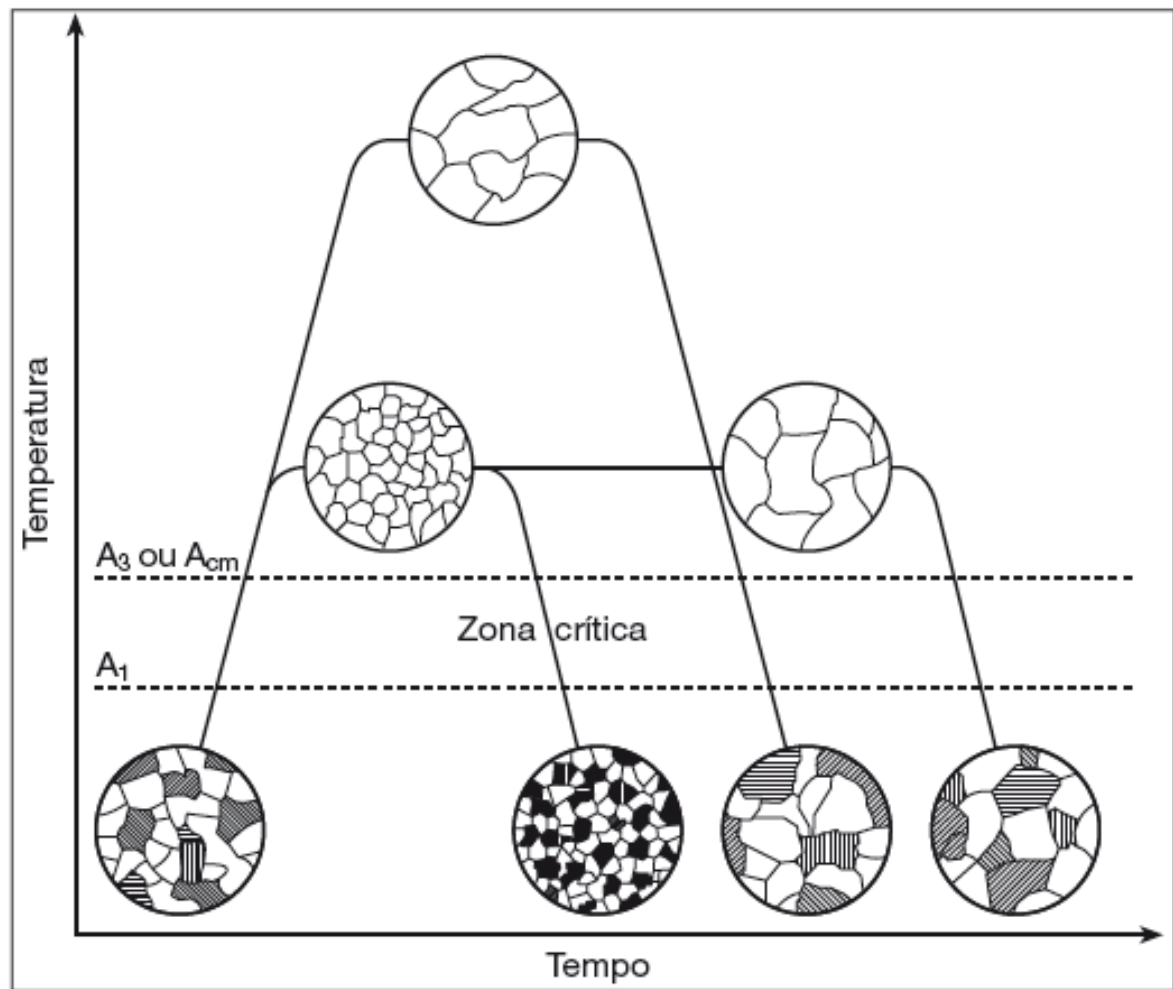
TEMPERATURAS DE AUSTENITIZAÇÃO



EFEITO DO TEMPO E TEMPERATURA DE AUSTENITIZAÇÃO NO TAMANHO DE GRÃO

Figura 9.49

Representação esquemática do efeito do tempo e da temperatura de austenitização sobre o tamanho de grão austenítico e o efeito sobre a microestrutura resultante (resfriamento ao ar). O esquema assume austenita homogênea, tanto em tamanho de grão como em composição química.

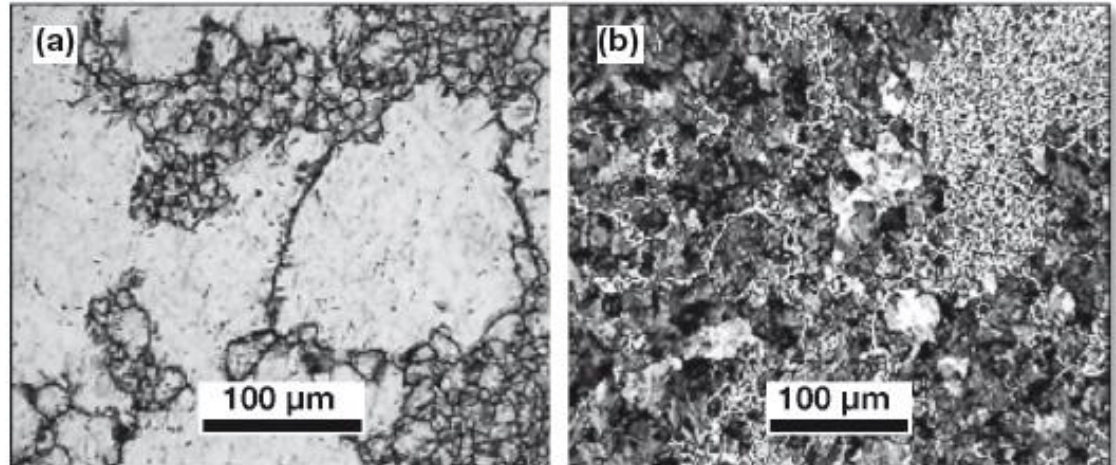


TEMPO DE “ENCHARQUE”: 1 HORA POR POLEGADA, ATÉ 2” E MAIS 15 MINUTOS A CADA POLEGADA EXCEDENTE;

PARA CHAPAS: 1,5 MINUTOS POR mm DE ESPESSURA.

Figura 9.56

Aço com a composição indicada na Figura 9.55 austenitizado a 900 °C por 200 min (a) grão austenítico heterogêneo revelado por ataque à base de ácido pícrico⁽²³⁾, (b) resfriado ao ar, com microestrutura composta de ferrita e perlita de tamanho e distribuição heterogêneos.



TEMPO DE “ENCHARQUE” EXCESSIVO PREJUDICA A ESTRUTURA PARA O PROCESSO SUBSEQUENTE.

NORMALIZAÇÃO E RECOZIMENTO PLENO

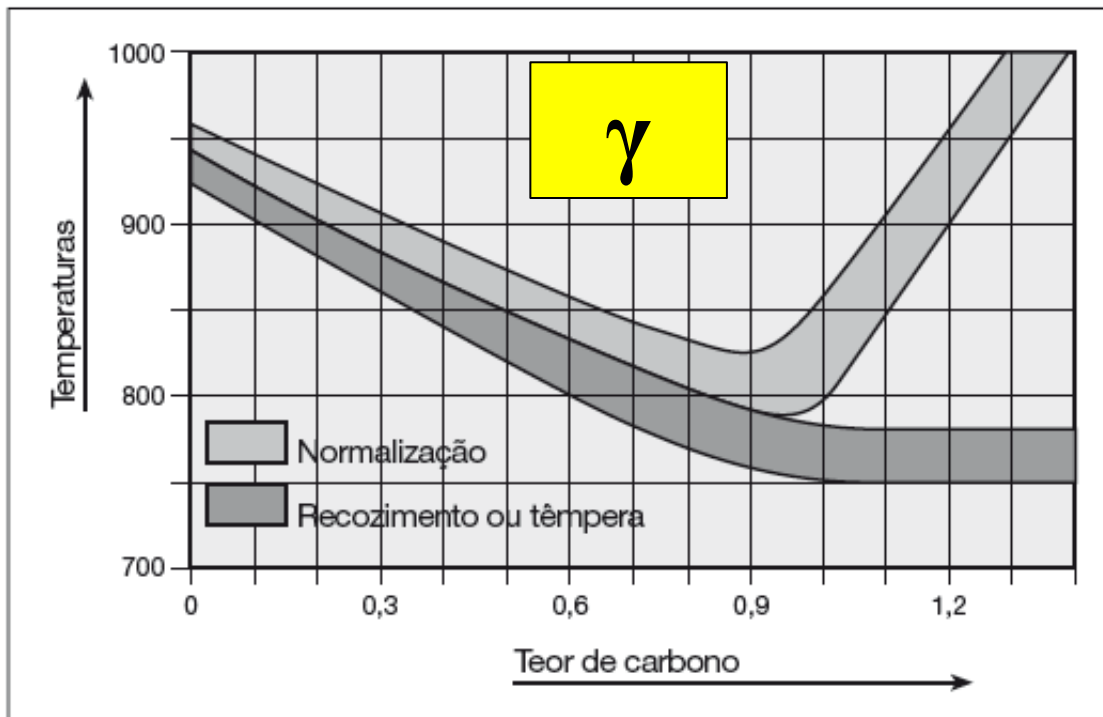


Figura 10.1

Temperaturas recomendadas, para austenitização para recozimento (pleno), normalização e têmpera. Para aços ligados, as temperaturas podem ser diferentes, em função das alterações das temperaturas de equilíbrio de fases (ver [2]).

NORMALIZAÇÃO E RECOZIMENTO PLENO

NORMALIZAÇÃO: REFINO DA ESTRUTURA

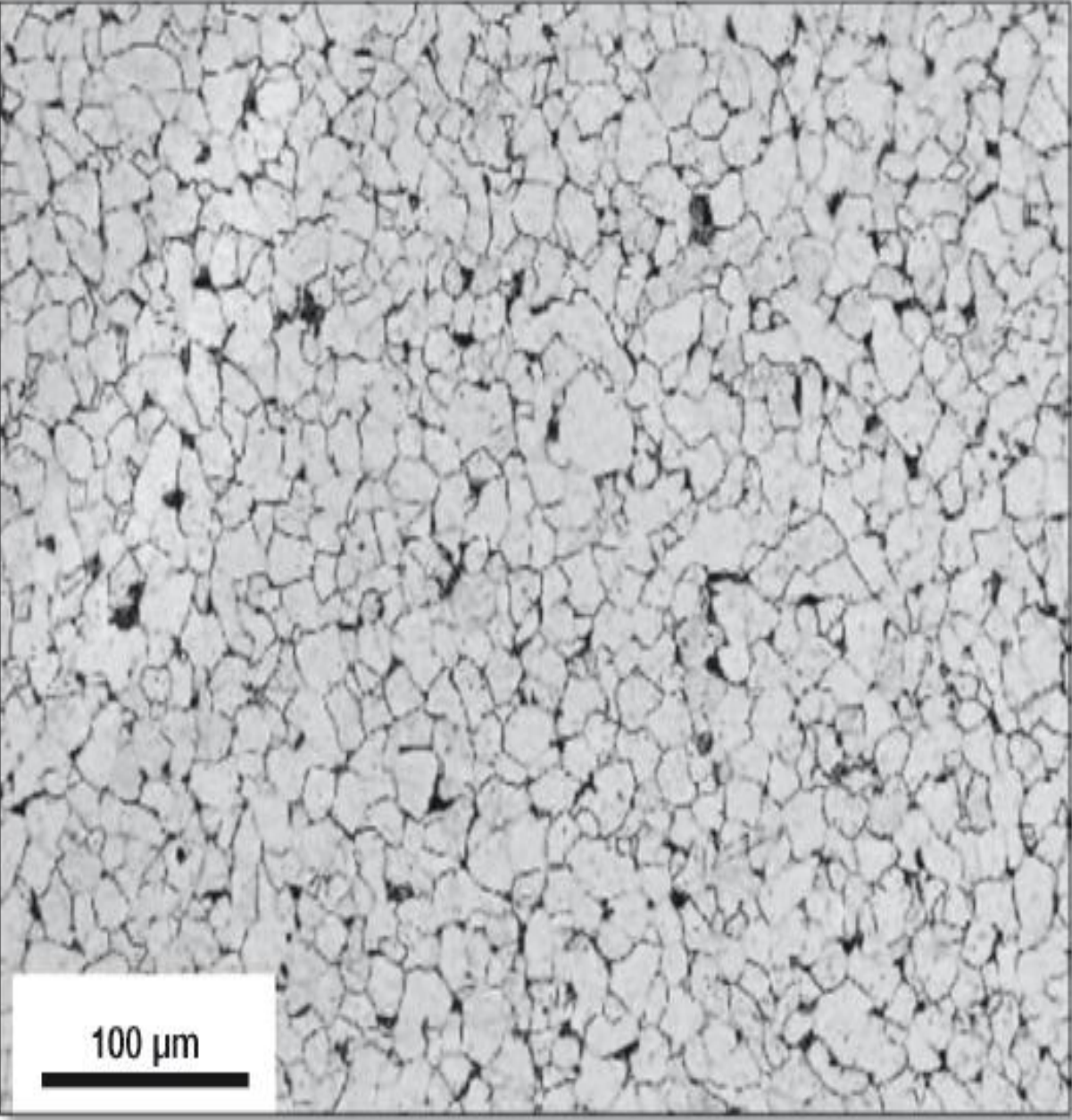
RECOZIMENTO PLENO:

- RESTITUIR AS PROPRIEDADES ALTERADAS POR CONFORMAÇÃO E/OU TRATAMENTOS TÉRMICOS ANTERIORES: REDUÇÃO DE DUREZA E RESISTÊNCIA MECÂNICA;**
- ANULAR CAMPOS MAGNÉTICOS E ELÉTRICOS (DESORIENTAÇÃO DOS DIPOLOS);**
- HOMOGENEIZAÇÃO E REFINO DE ESTRUTURAS BRUTAS DE FUSÃO.**

Figura 7.23

Seção transversal de fio-máquina de aço AISI 1005 normalizado. Ferrita e perlita (fração volumétrica $\approx 5\%$). Tamanho de grão ferrítico ASTM 9. Ataque: Nital 2%. Cortesia ArcelorMittal Aços Longos, Juiz de Fora, MG, Brasil.

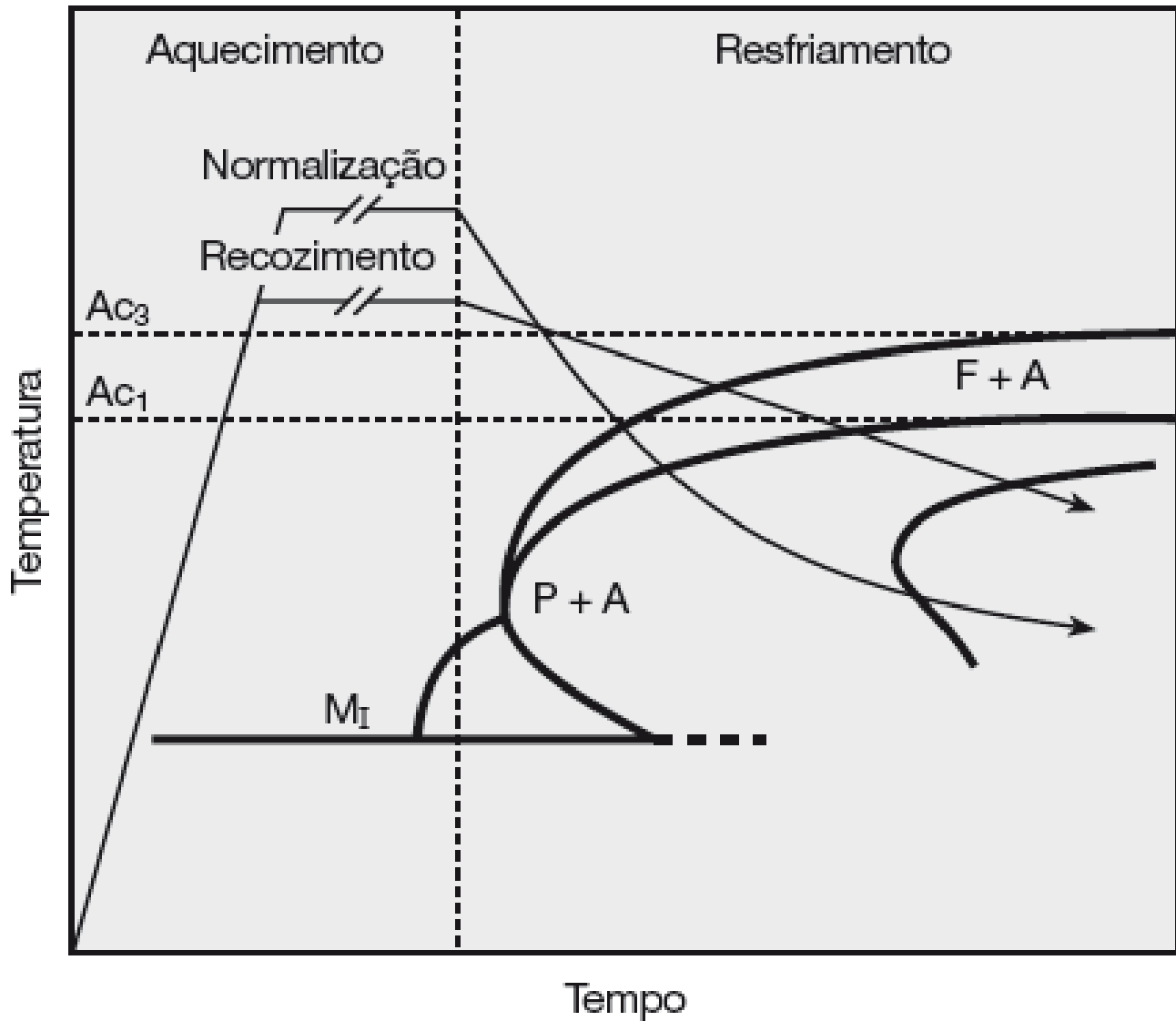
(Colpaert)

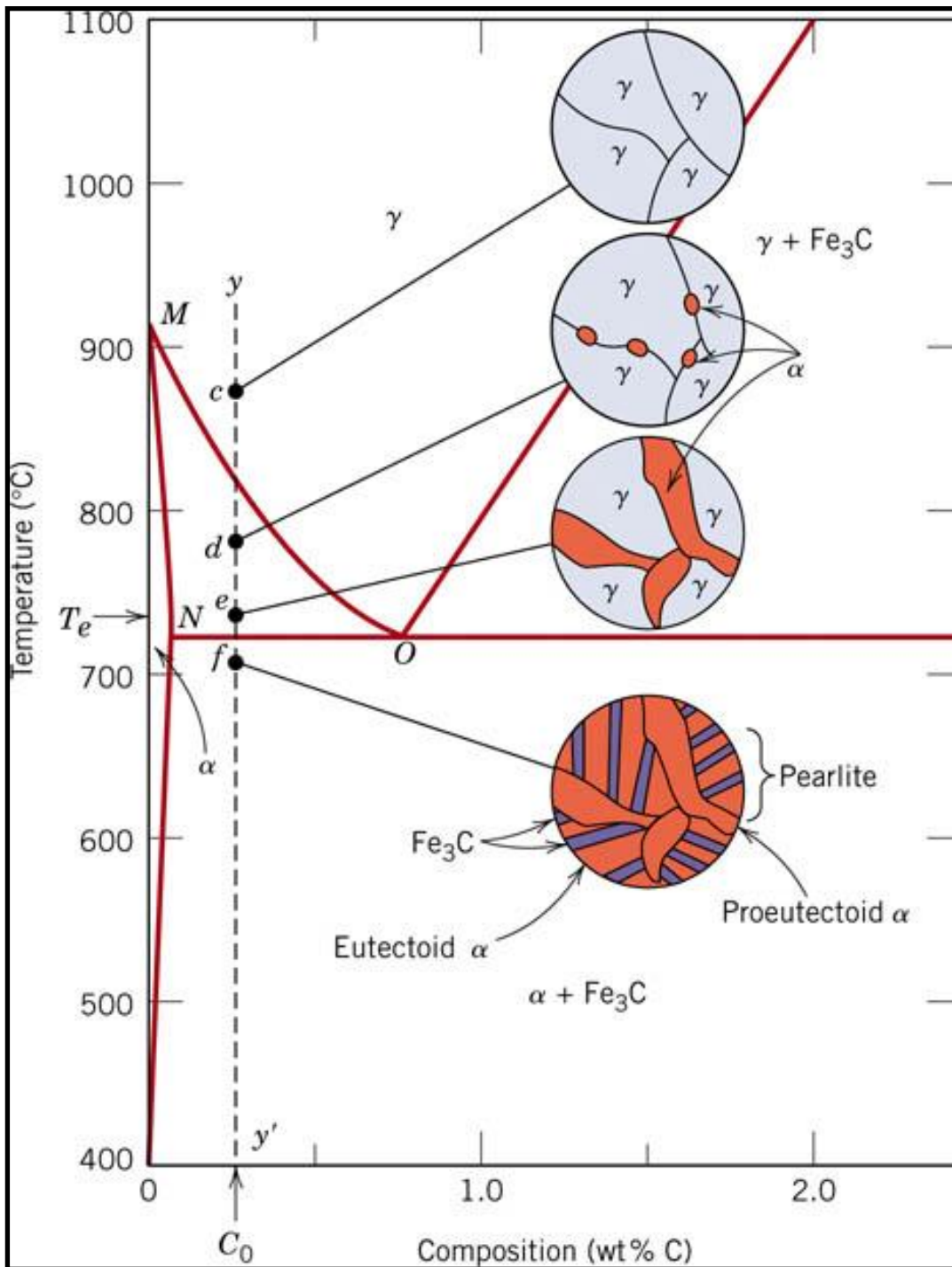


100 μm

NORMALIZAÇÃO E RECOZIMENTO PLENO

Esquema do tratamento





(Callister)

AÇO 1045 NORMALIZADO

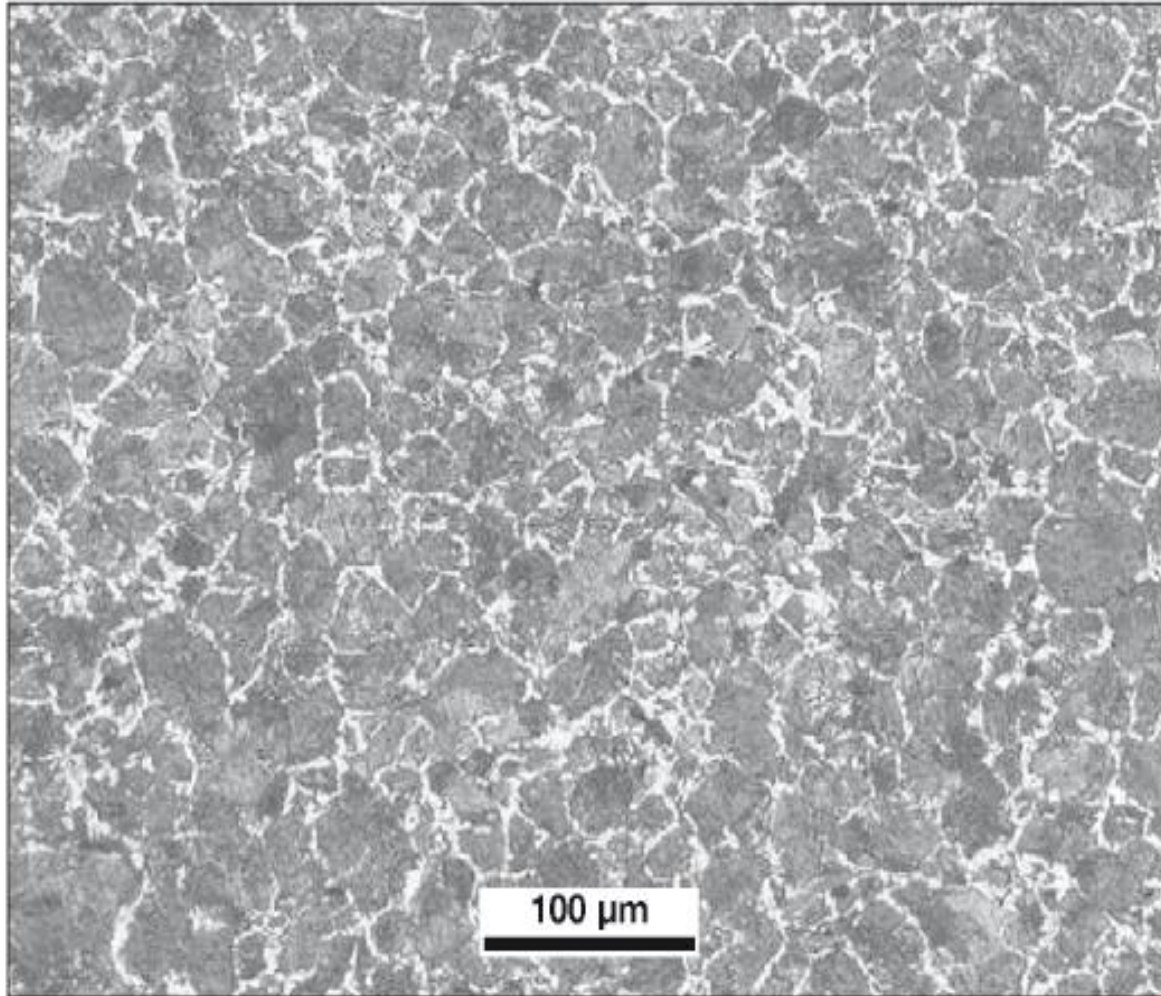
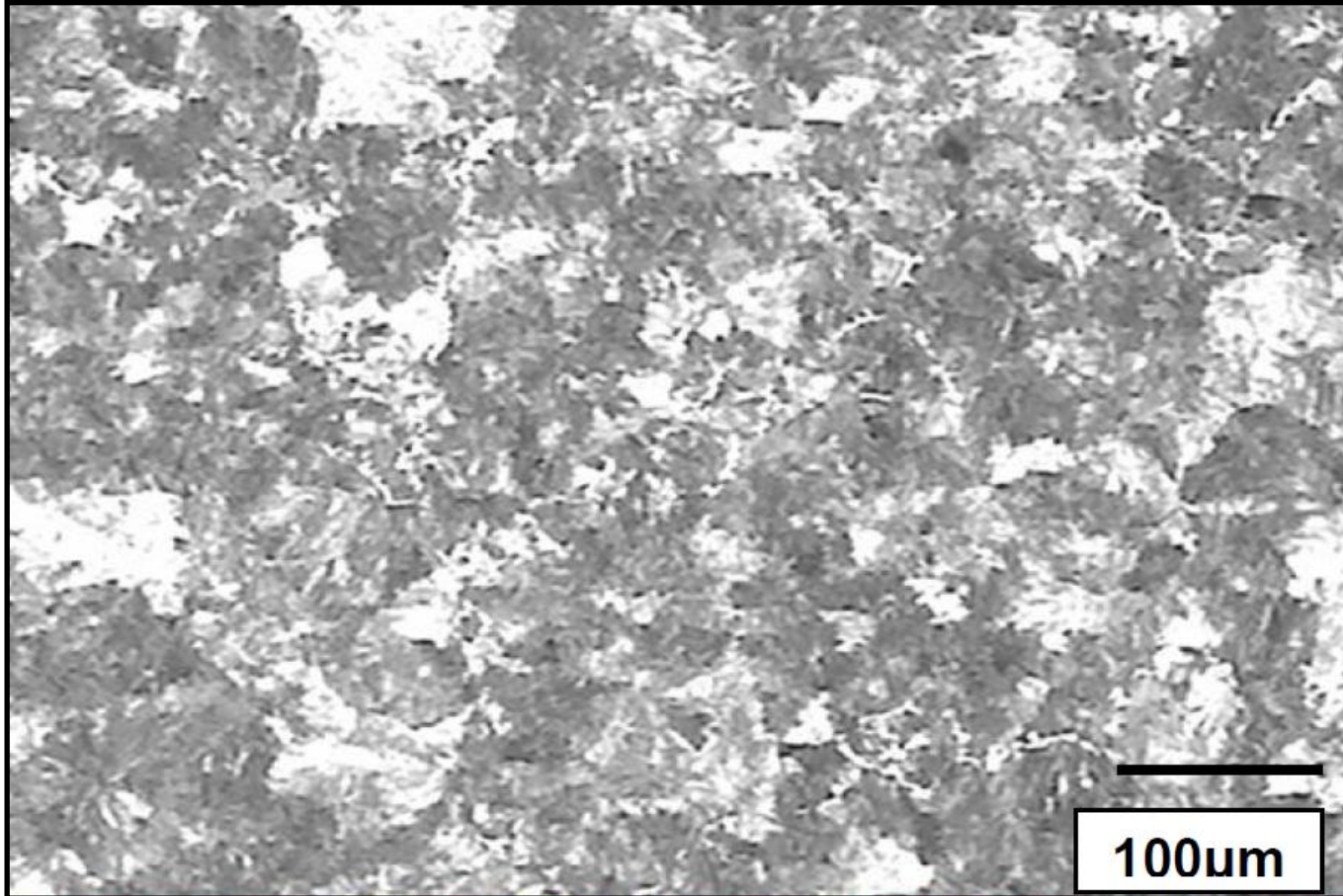


Figura 10.15

Fio-máquina de aço AISI 1045, normalizado. Ferrita pró-eutectóide e perlita. Ataque: Nital 2%. Cortesia ArcelorMittal Aços Longos, Juiz de Fora, MG, Brasil.

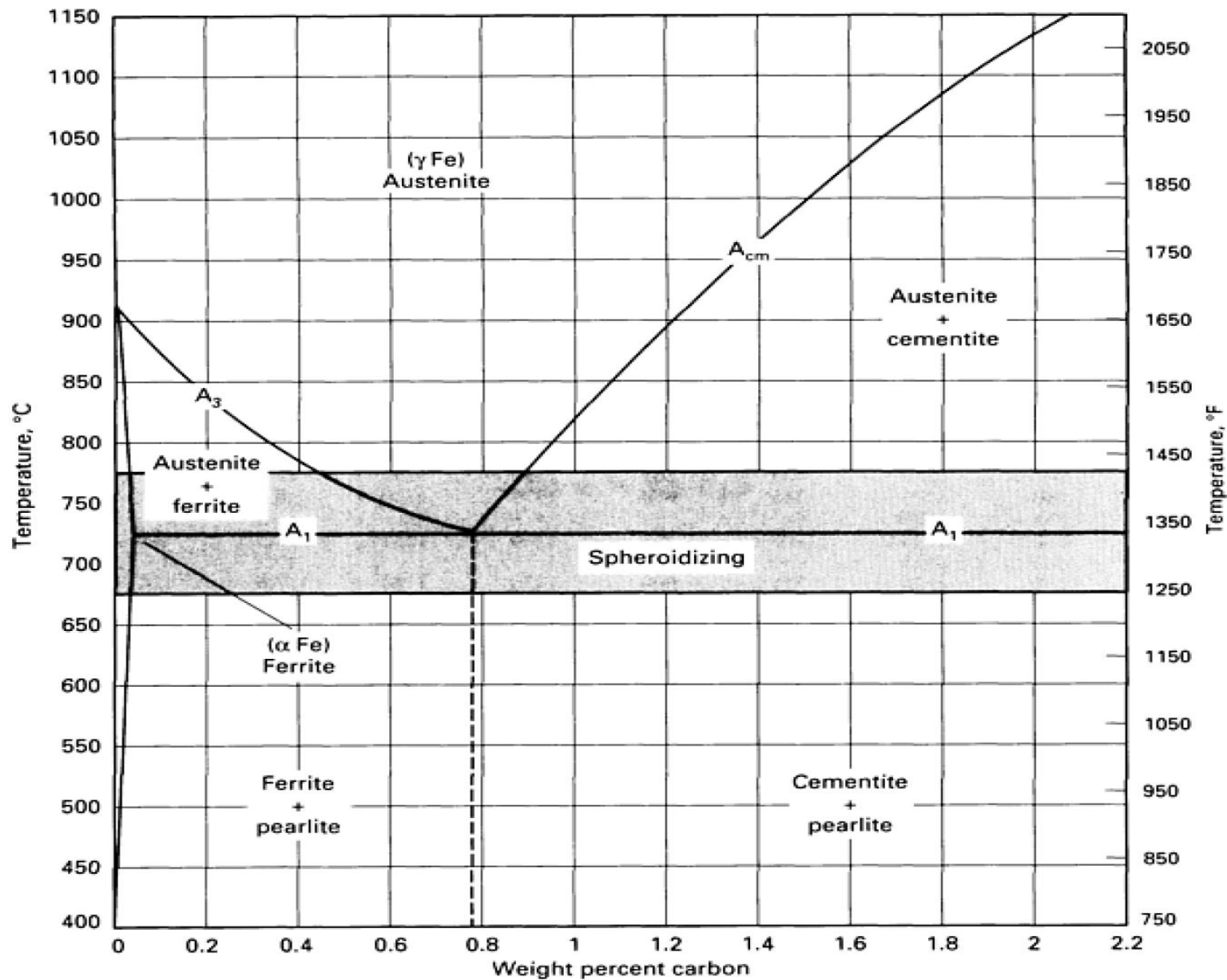
RECOZIMENTO PLENO



**AÇO SAE 4140
RECOZIDO:
FERRITA PRÓ-
EUTETÓIDE,
FERRITA
POLIGONAL,
PERLITA, TG 5
ASTM E 112**

100µm

ESFEROIDIZAÇÃO





ESFEROIDIZAÇÃO

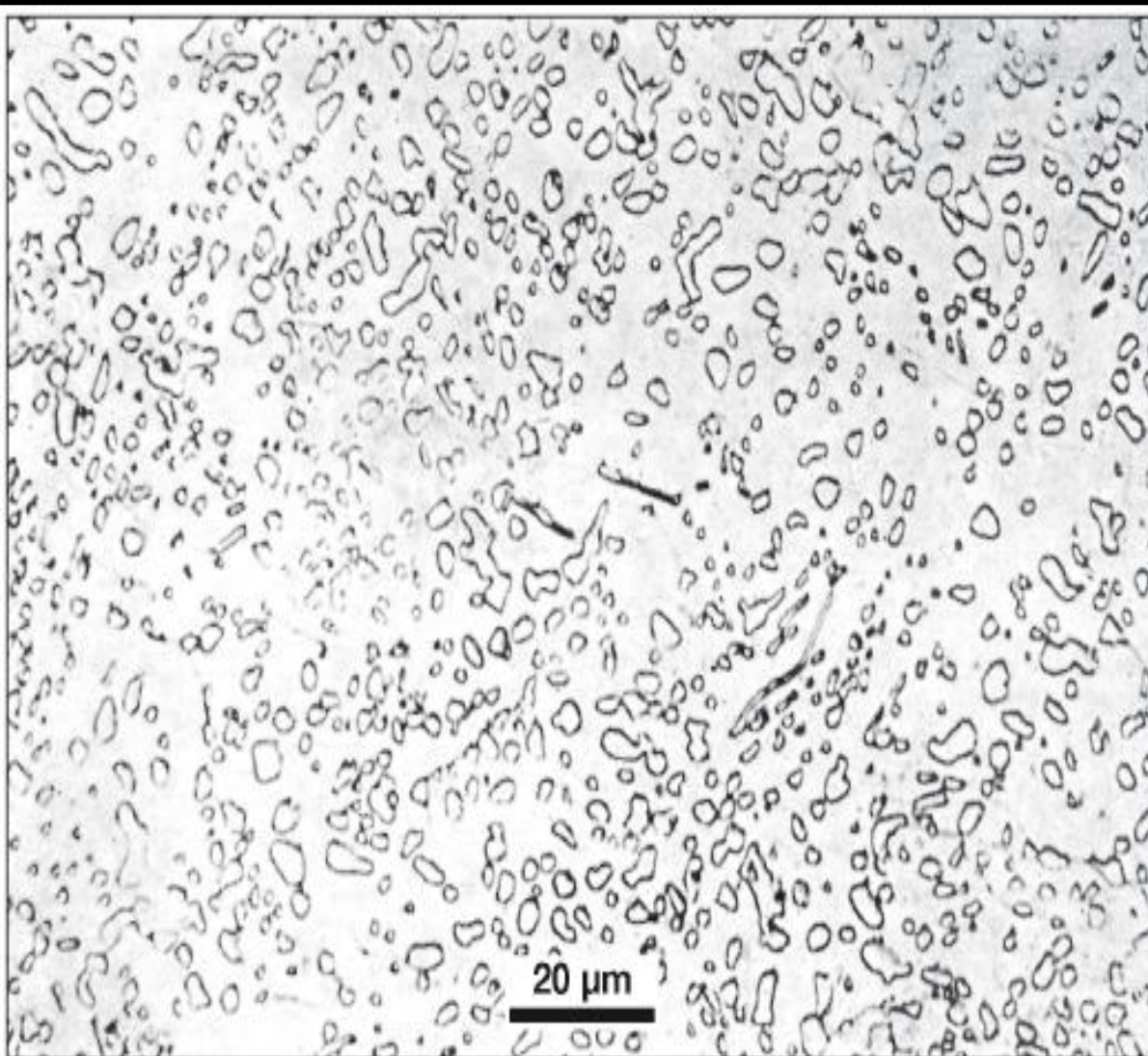


Figura 10.3

Aço hipereutectóide submetido a recozimento de esferoidização. Glóbulos de cementita (coalescida ou esferoidizada) em matriz ferrítica. Ataque: Nital.

ALÍVIO DE TENSÕES

- RECOZIMENTO PARA ALÍVIO DE TENSÕES OU RECOZIMENTO SUBCRÍTICO: RECUPERAÇÃO E/OU RECRISTALIZAÇÃO;
- REDUZ A DUREZA E AUMENTA A DUTILIDADE;
- RECUPERAÇÃO NÃO É VISUALIZADA EM MICROSCOPIA ÓPTICA.

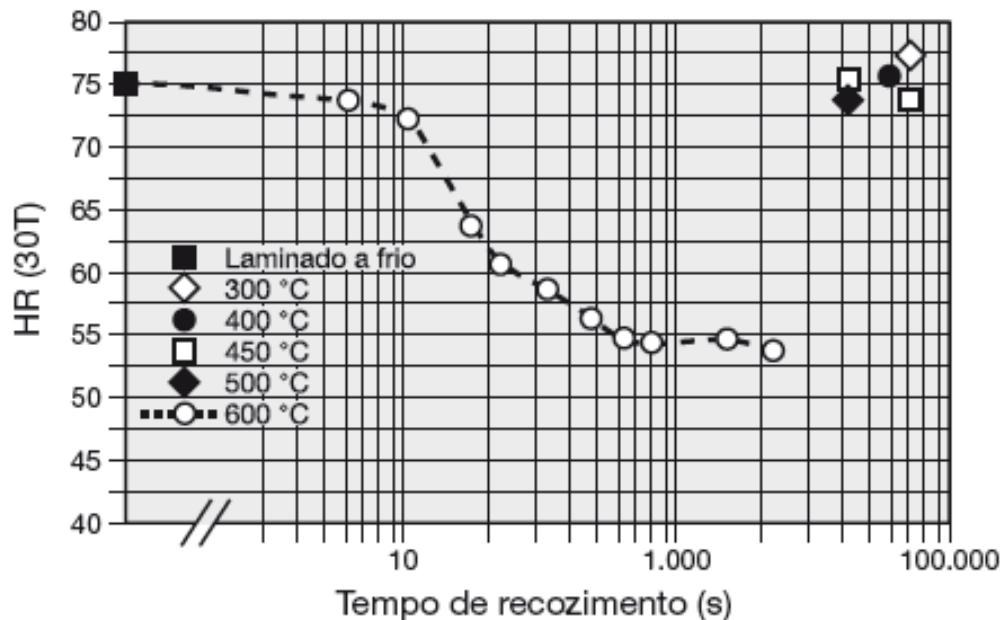


Figura 12.15

Efeito do tempo e temperatura de recozimento sobre a dureza de um aço de baixo carbono (C = 0,03%, Mn = 0,19%, Al = 0,13%) submetido à redução de 84%, por laminação a frio. Para temperaturas inferiores a 500 °C a dureza é praticamente insensível às alterações de estrutura, para um tempo longo de tratamento (aproximadamente 13,6 h). Adaptado de [8].



RECOZIMENTO PARA RECRISTALIZAÇÃO

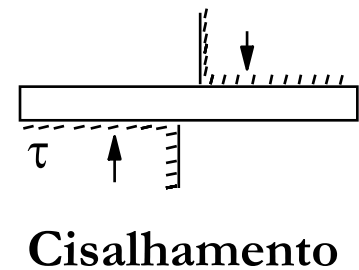
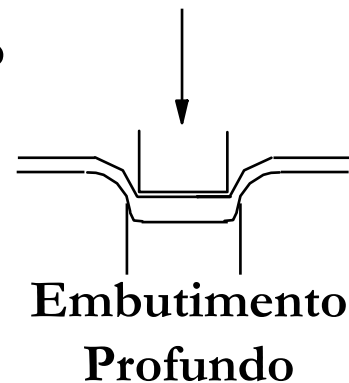
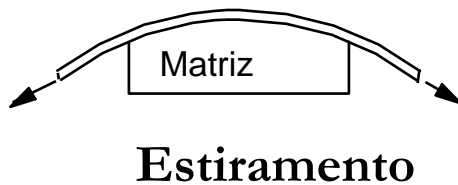
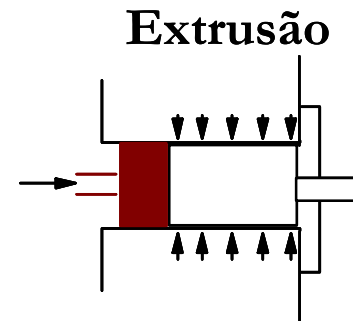
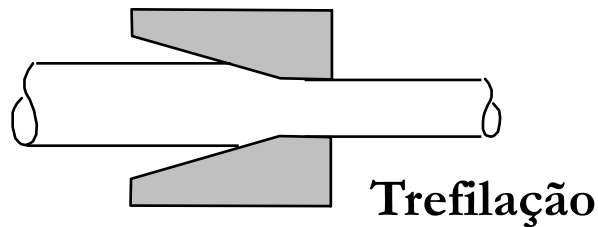
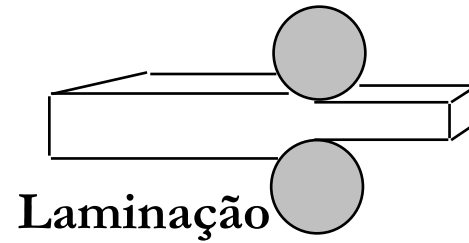
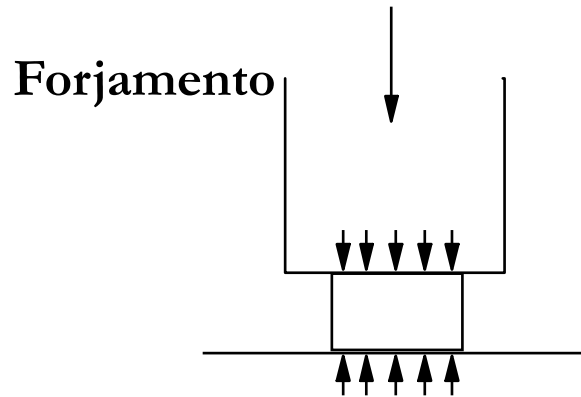
TRABALHO (DEFORMAÇÃO) A QUENTE E A FRIO

- **2% A 10%** da energia nos processos de **conformação (deformação)** é armazenada no material, em forma de **defeitos cristalinos (energia de deformação)**. A maior parte é dissipada em forma de calor;
- **Trabalho (deformação) a frio:** realizado em **temperatura** na qual **não** ocorrem processos de **recuperação e/ou recristalização**.
Conserva a energia de deformação: não há eliminação de defeitos;
- **Trabalho (deformação) a quente:** realizado em **temperatura** na qual **ocorrem** processos de **recuperação e/ou recristalização**. **A energia de deformação é reduzida: ocorre a eliminação de defeitos.**

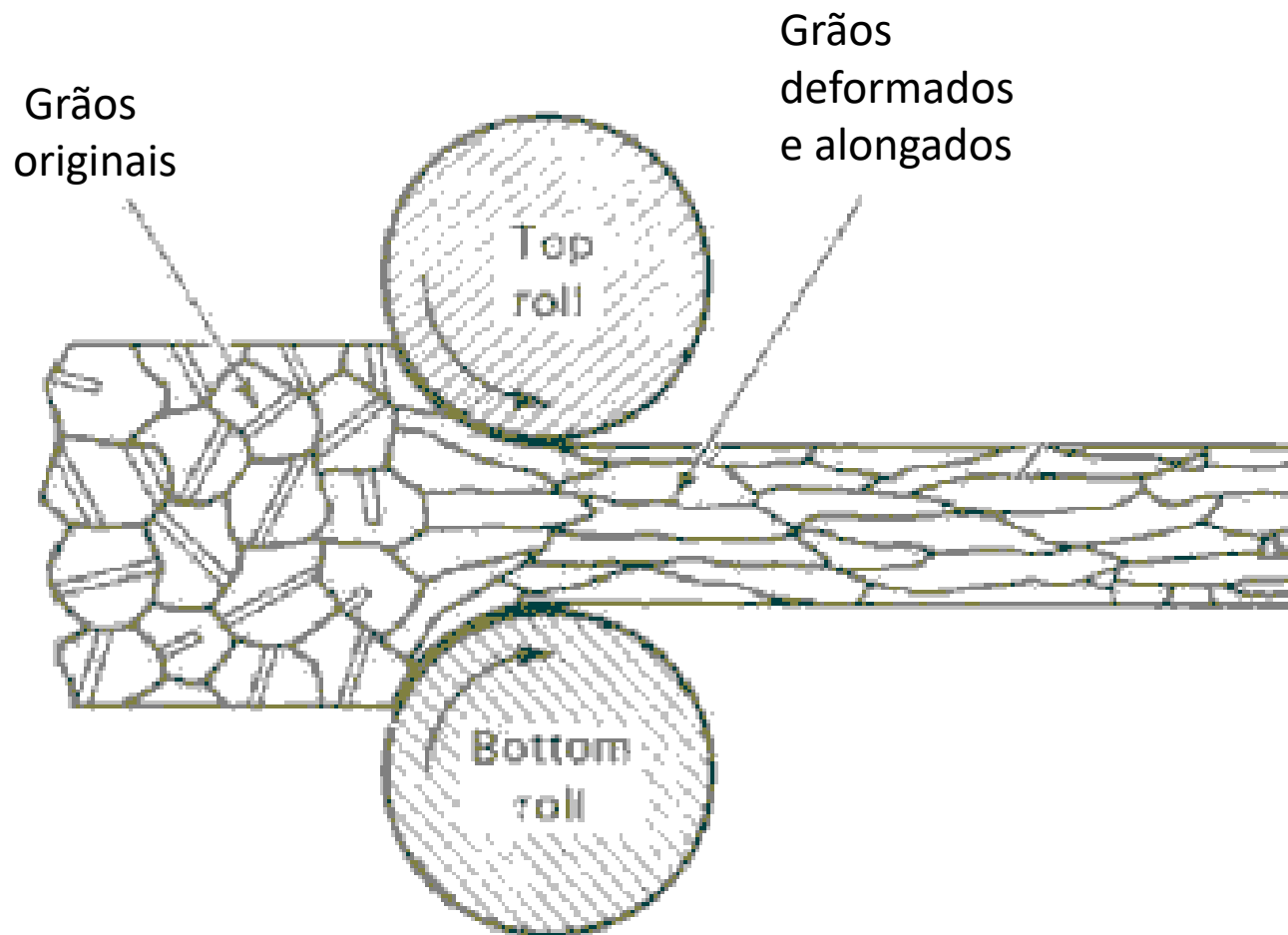


- A definição de **temperatura** de trabalho a **quente** ou a **frio** é **complexa** mas pode-se definir um **limite aceitável**, em relação à **temperatura de fusão (T_f) em K** [TOMIZ et al, 2000-ISIJ]
- Trabalho a **quente**, acima de **$0,5T_f$** ;
- Trabalho a **frio**, abaixo de **$0,5T_f$** .
- Trabalho a **frio** provoca **encruamento**, pode **fragilizar o** material. Para **recuperar a ductilidade/tenacidade** do material pode-se fazer um recozimento **pleno (recuperação)** ou recozimento para **recristalização**.

PRINCIPAIS TIPOS DE CONFORMAÇÃO

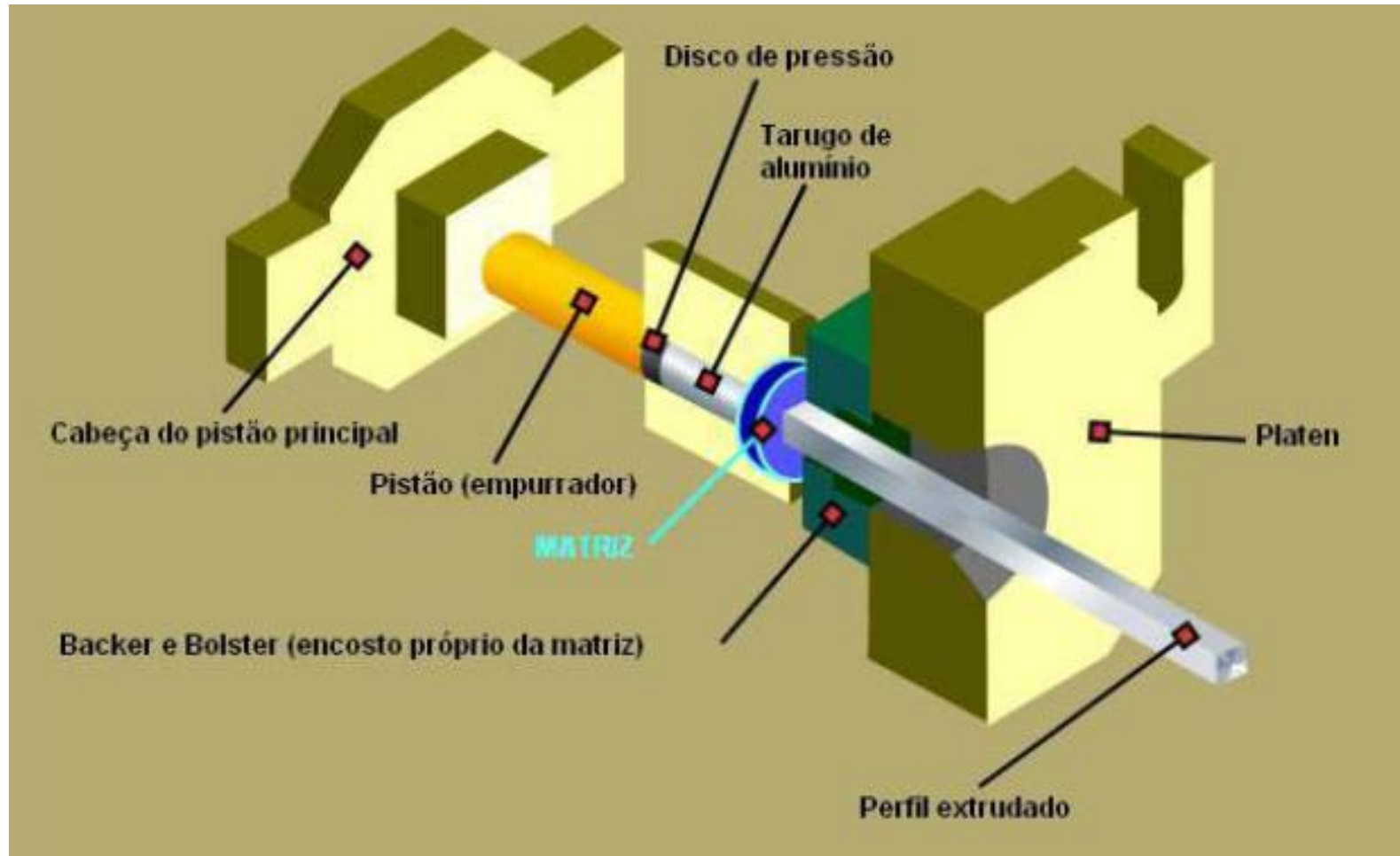
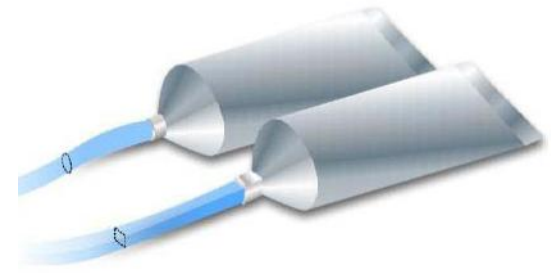


LAMINAÇÃO A FRIO

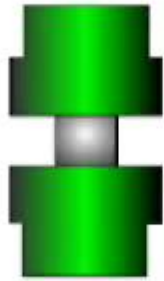


EXTRUSÃO

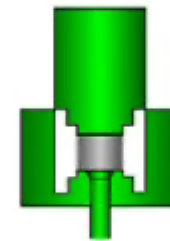
Quente ou a frio



FORJAMENTO (Quente ou Frio)



MATRIZ ABERTA



MATRIZ FECHADA S/
REBARBAS

FORJAMENTO EM MATRIZ ABERTA



**FORJAMENTO EM MATRIZ
FECHADA COM REBARBA.**

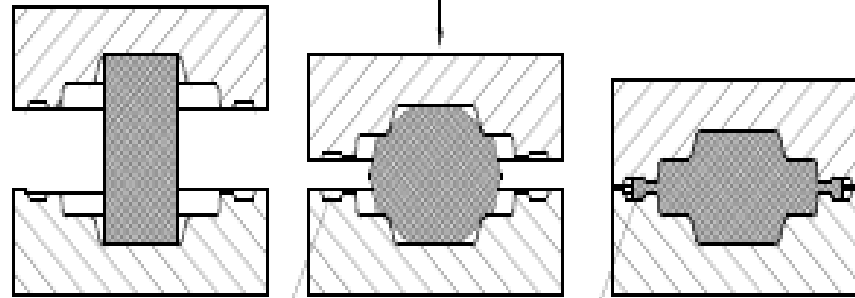


FIBRAMENTO DE FLANGE FORJADO



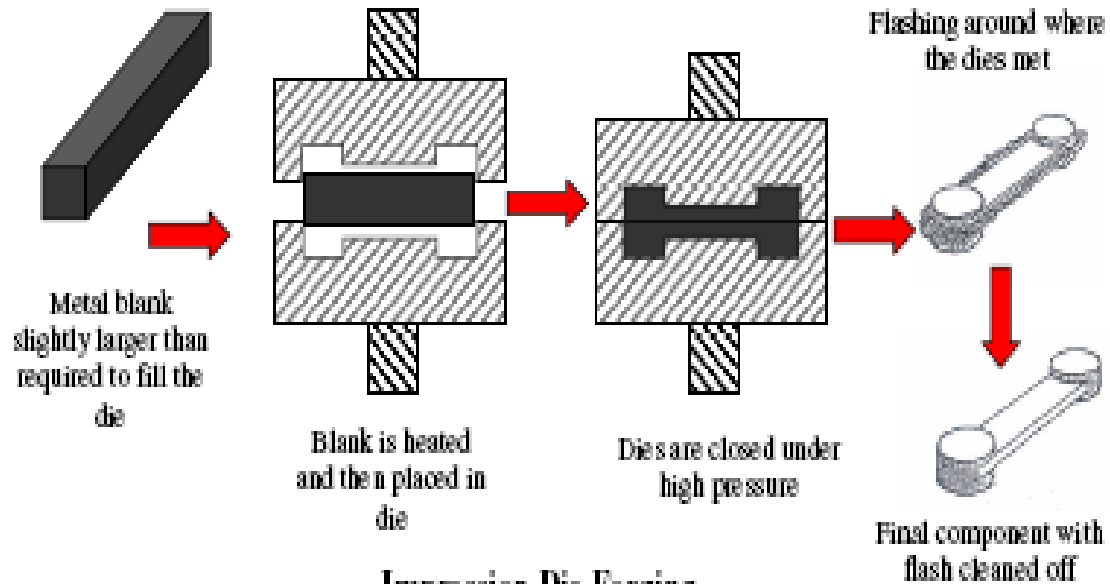
FIBRAMENTO/FIBRAGEM: PARTÍCULAS (INCLUSÕES, GRAÇOS PERLÍTICOS) ALINHADOS COM O FLUXO DE MATERIAL.

MATRIZ FECHADA



Flash gutter

Flash

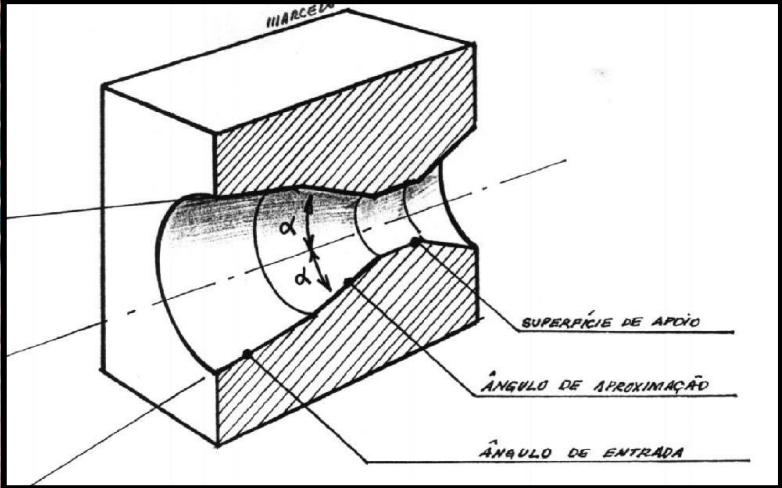
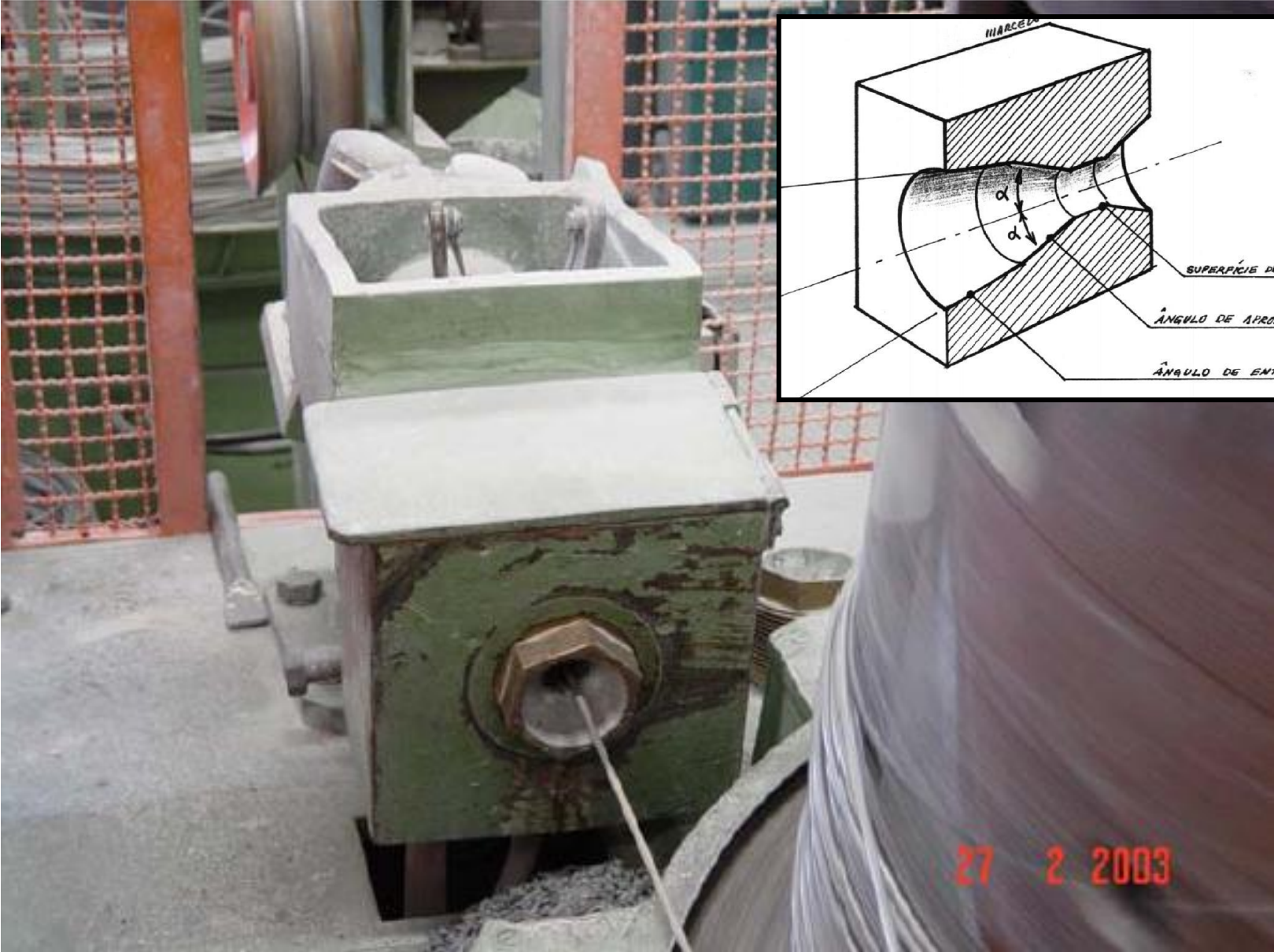


Impression Die Forging

PRODUTOS FORJADOS



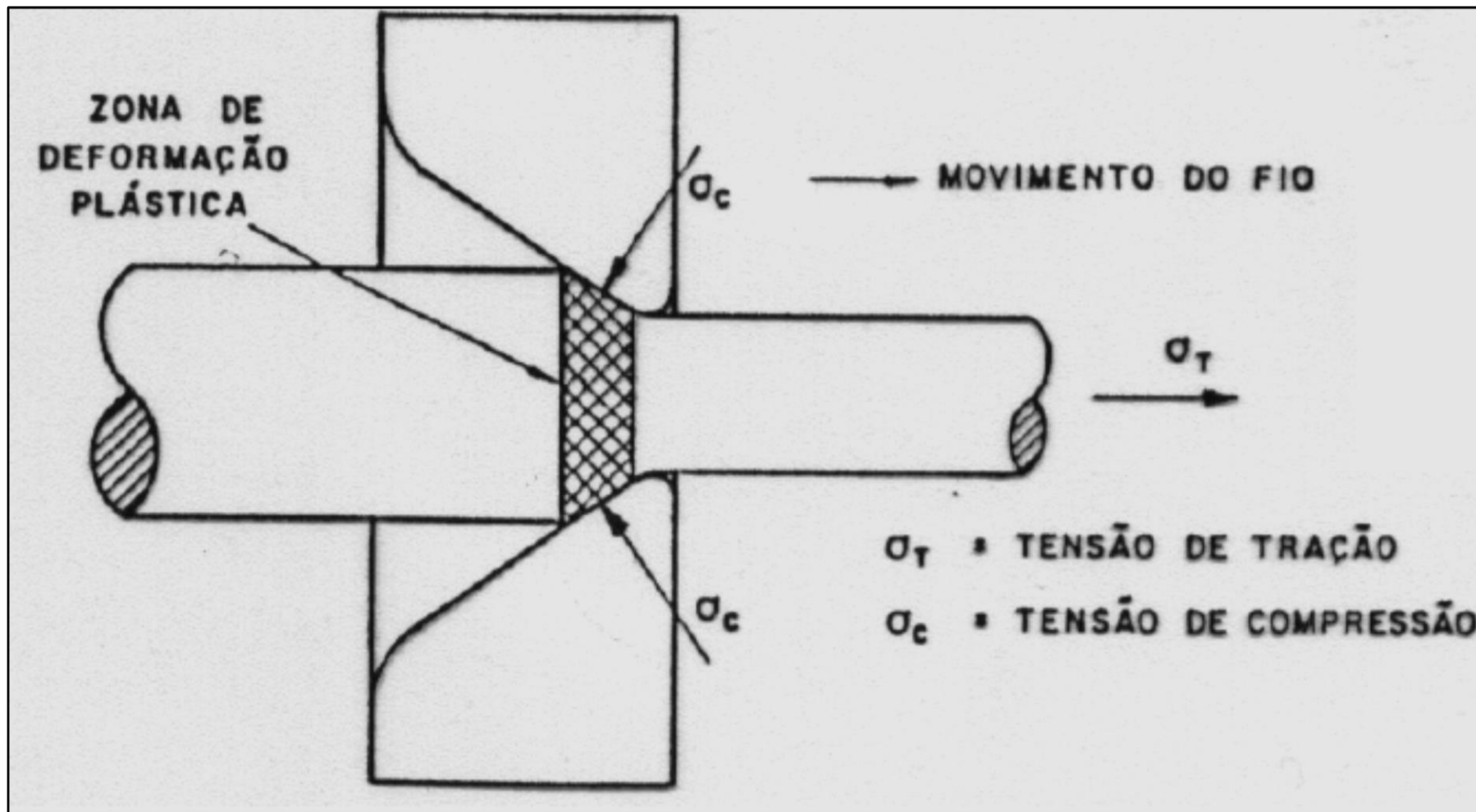
TREFILAÇÃO



27 2 2003

MECÂNICA DA TREFILAÇÃO-SEMPRE A FRIO

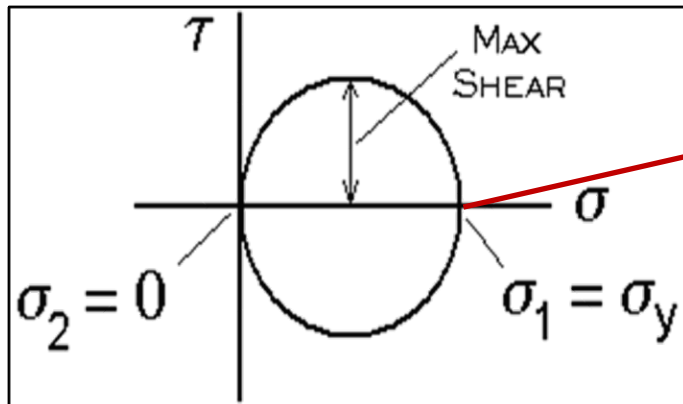
EXCEÇÃO: Mg



TENSÕES NA TREFILAÇÃO – ANÁLISE POR CÍRCULO DE MOHR

TREFILAÇÃO

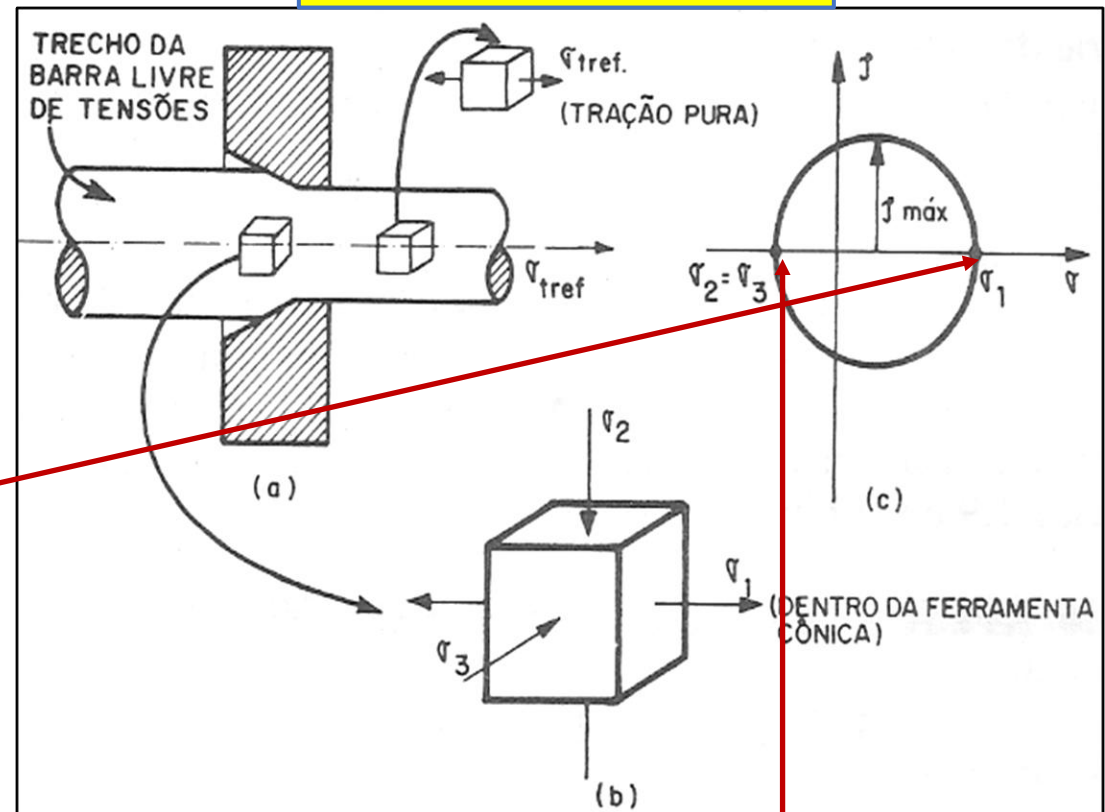
TRAÇÃO PURA



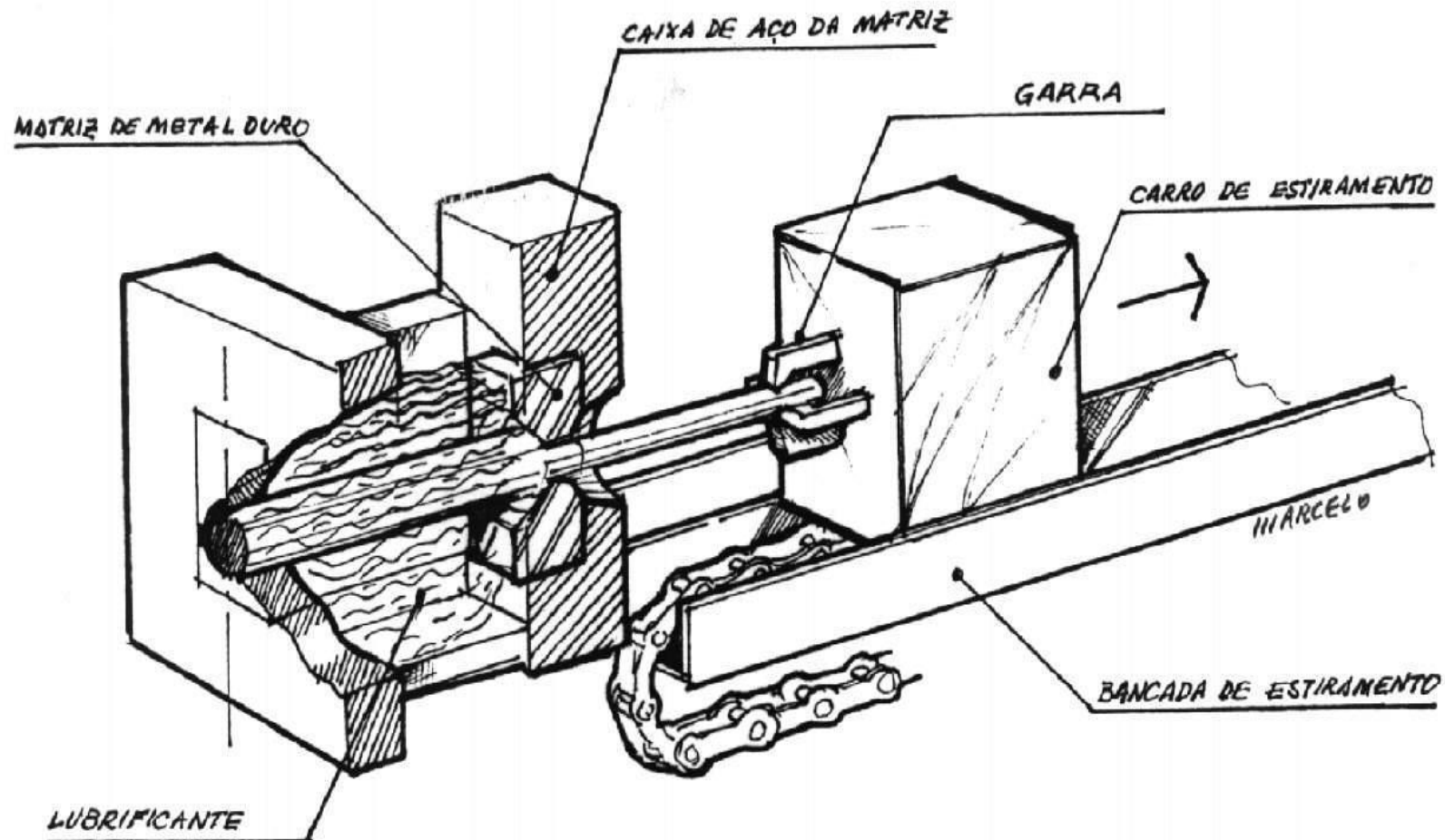
TENSÃO SOMENTE DE TRAÇÃO

$$\sigma_1 \text{ trefilação} < \sigma_1 \text{ tração}$$

TENSÕES COMPRESSIVAS DA FIEIRA



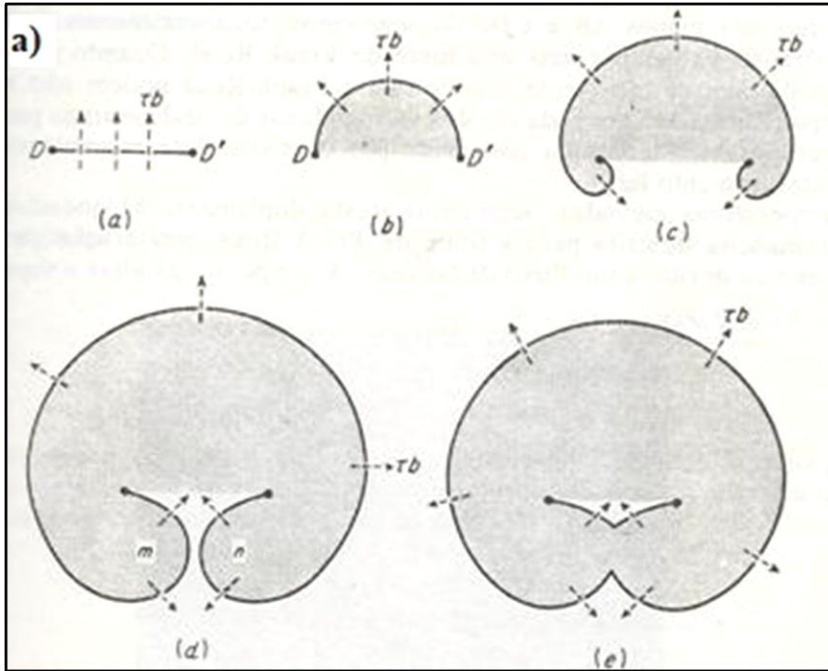
Banco de Trefila



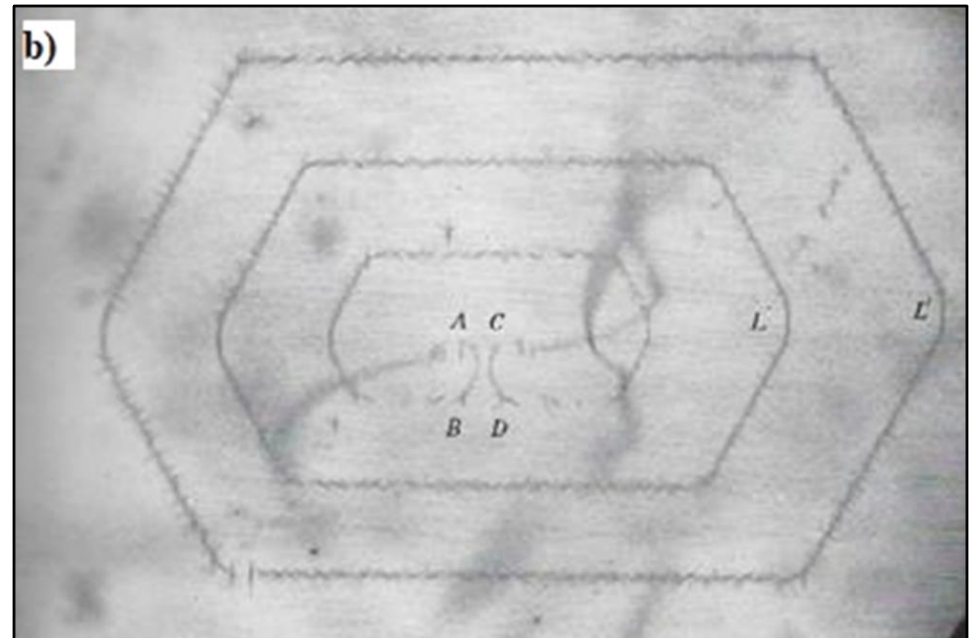
ENCRUAMENTO OU ENDURECIMENTO PELA DEFORMAÇÃO À FRIO

- É o fenômeno no qual um **material endurece** devido à **deformação plástica (realizado pelo trabalho à frio)**;
- Esse endurecimento dá-se devido ao **aumento de densidade de discordâncias** e imperfeições promovidas pela deformação;
- A medida que se **aumenta o encruamento maior é a força** necessária para produzir **deformação plástica**;
- O **encruamento** pode ser **removido** por **tratamentos térmicos** que reduzem a densidade discordâncias: **Recozimento/Alívio de tensões**, que promove a **recuperação** e/ou **Recozimento para recristalização**.

FONTES DE FRANK-READ



Geração de linhas de discordância





DENSIDADE DE DISCORDÂNCIAS

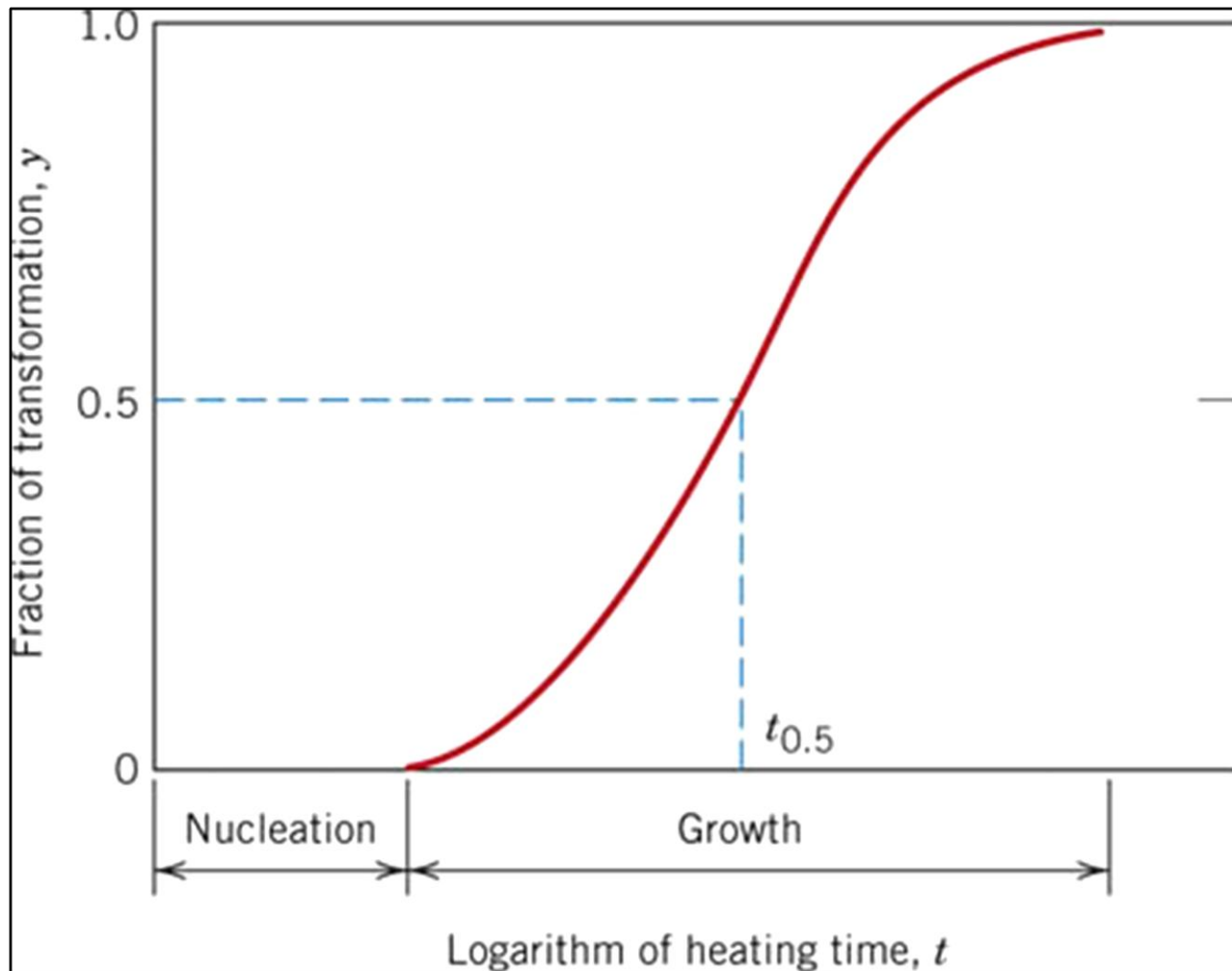
- 10^5 a 10^6 cm^{-2} para um metal totalmente recozido;
- 10^{10} a 10^{12} cm^{-2} para um metal trabalhado a frio (encruado);

O processo de recozimento envolve normalmente três etapas: **recuperação, recristalização e crescimento de grão.**

A **recuperação** é um processo de **aniquilação de discordâncias**, que promove um **rearranjo** das linhas de discordância para uma **configuração de menor energia.**

RECRISTALIZAÇÃO

- Ocorre a formação de **novos grãos, com baixa densidade de defeitos**, a partir de grãos deformados: **equiaxiais e menores**;
- É um processo que pode ser utilizado para **refino da estrutura** de ligas, inclusive monofásicas: **deformação plástica e recozimento para recristalização**;
- **Após** a recristalização, se o material **permanecer** em alta temperatura pode ocorrer o **crescimento de grão** e o **efeito de refino é perdido** (quanto **maior o grão, menor a dureza** do material);
- Quanto **maior** o grau de **deformação**, **menor** a temperatura de recristalização, que normalmente está por volta de **$0,3T_f$ a $0,6 T_f$** ;
- **Leis da recristalização (Burke e Turnbull, 1952)**;
- **Modelos matemáticos: JMAK (Johnson – Mehl – Avrami – Kolmogorov): $X_V = 1 - \exp(-At^n)$ (equação tipo Arrhenius).**



$$y = 1 - \exp(-kt^n)$$

RECRISTALIZAÇÃO ESTÁTICA

Deformação a frio, acúmulo de energia de deformação (**geração e interação de linhas de discordâncias**). **Recozimento para recristalização**: formação de **novos grãos** a partir de grãos deformados, por **migração de contornos de grão**. A **força motriz** é o **gradiente de defeitos** entre o novo grão e o grão deformado.

RECRISTALIZAÇÃO DINÂMICA

O fenômeno ocorre durante a deformação a quente. Na Laminação seria quando o material está **embaixo do cilindro**. A energia de deformação armazenada, mesmo longe do cilindro, faz com que também ocorra a **recristalização estática** durante a laminação pois a temperatura do material ainda é alta.

A RECUPERAÇÃO É UM FENÔMENO QUE PODE OCORRER ANTES DA RECRISTALIZAÇÃO E EM TEMPERATURAS MAIS BAIXAS: ESTÁTICA E DINÂMICA.

RECUPERAÇÃO: ELIMINAÇÃO DE LD

FENÔMENOS TERMICAMENTE ATIVADOS: CLIMB E CROSS-SLIP

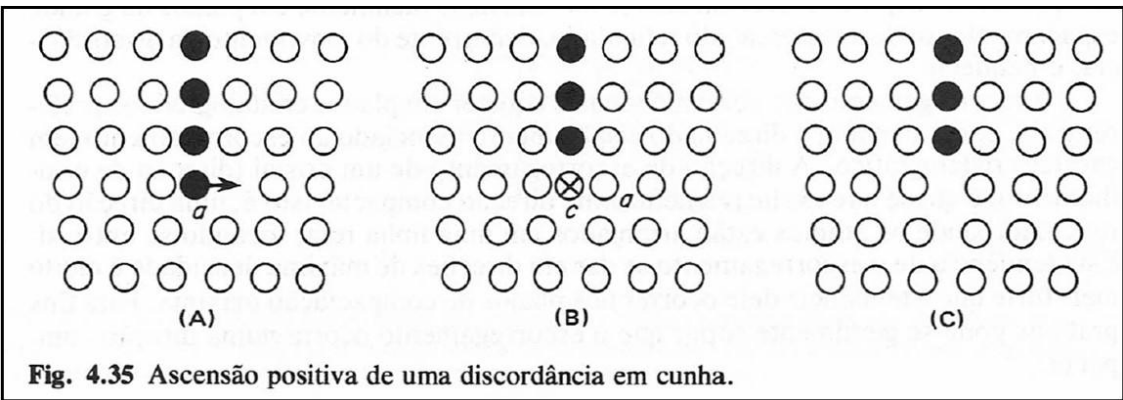


Fig. 4.35 Ascensão positiva de uma discordância em cunha.

CLIMB

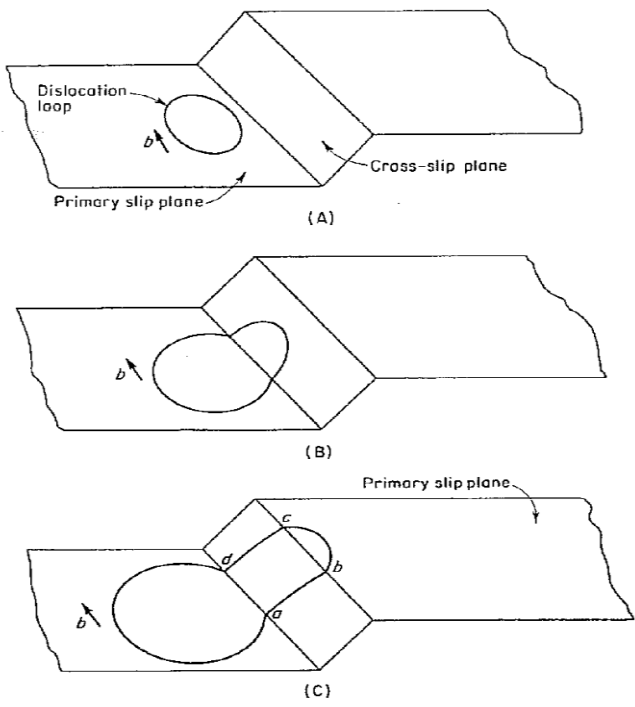


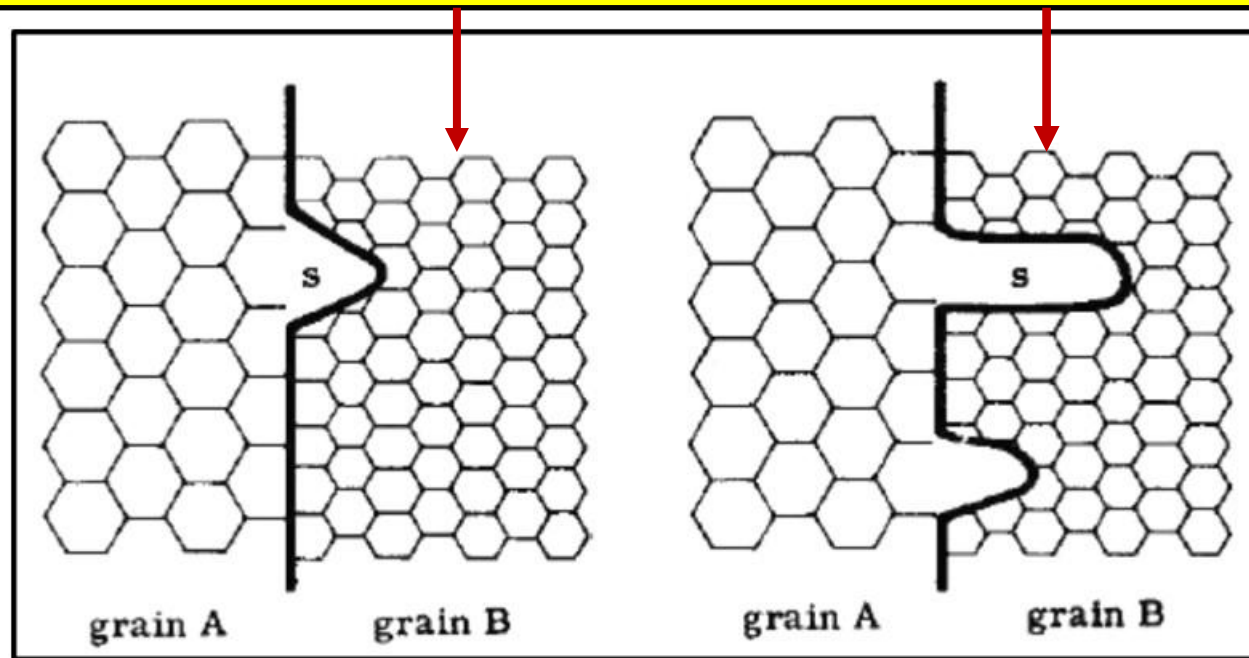
Fig. 5.5 Double cross-slip.

CROSS-SLIP

**RECRISTALIZAÇÃO: FORMAÇÃO DE NOVOS GRÃOS A PARTIR DE GRÃOS DEFORMADOS.
F.E.M.: GRADIENTE DE DENSIDADE DE DISCORDÂNCIAS**

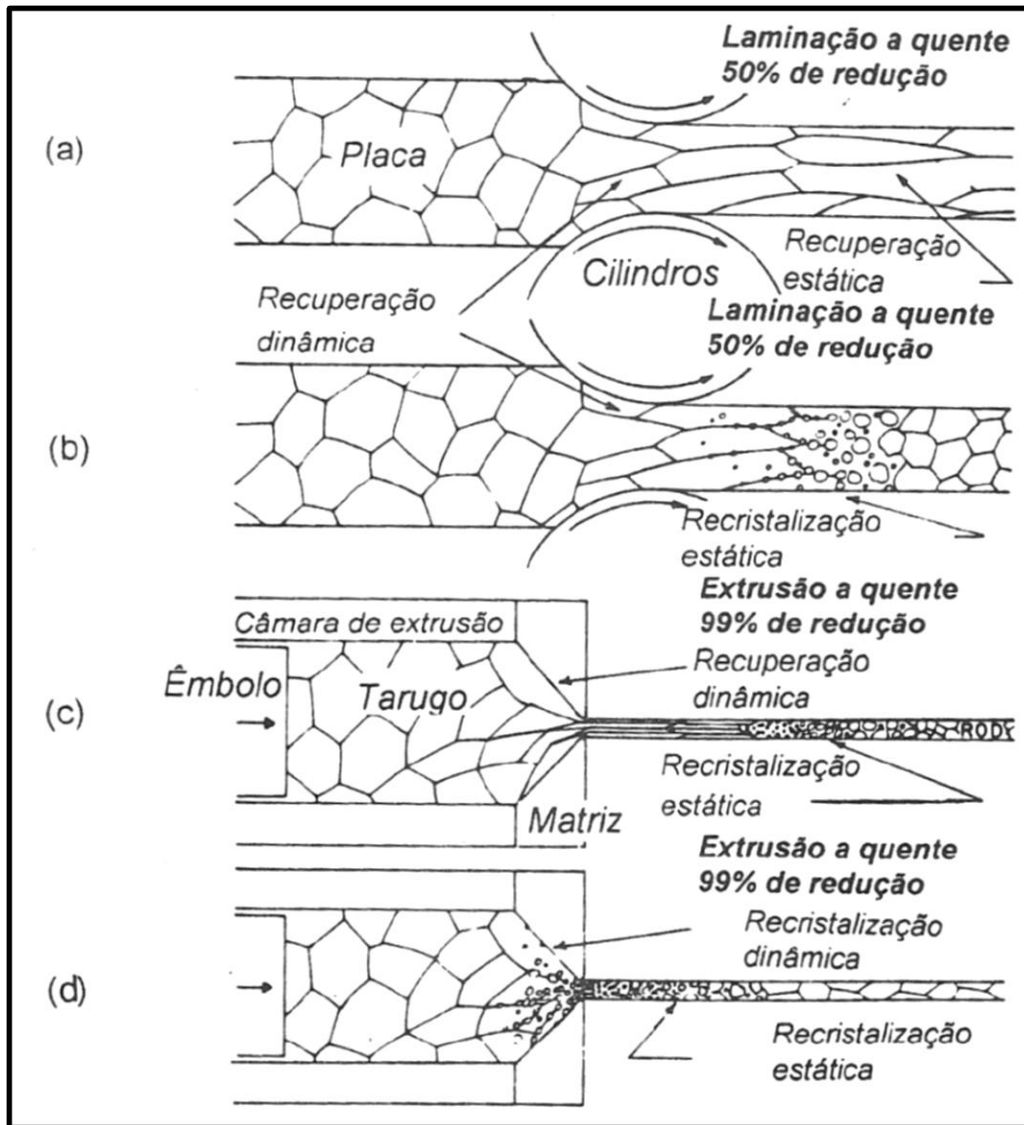
UM DOS MECANISMOS: MIGRAÇÃO DE CONTORNOS DE GRÃO DE ALTO ÂNGULO

SUBGRÃOS-CONTORNO DE BAIXO ÂNGULO (LD)



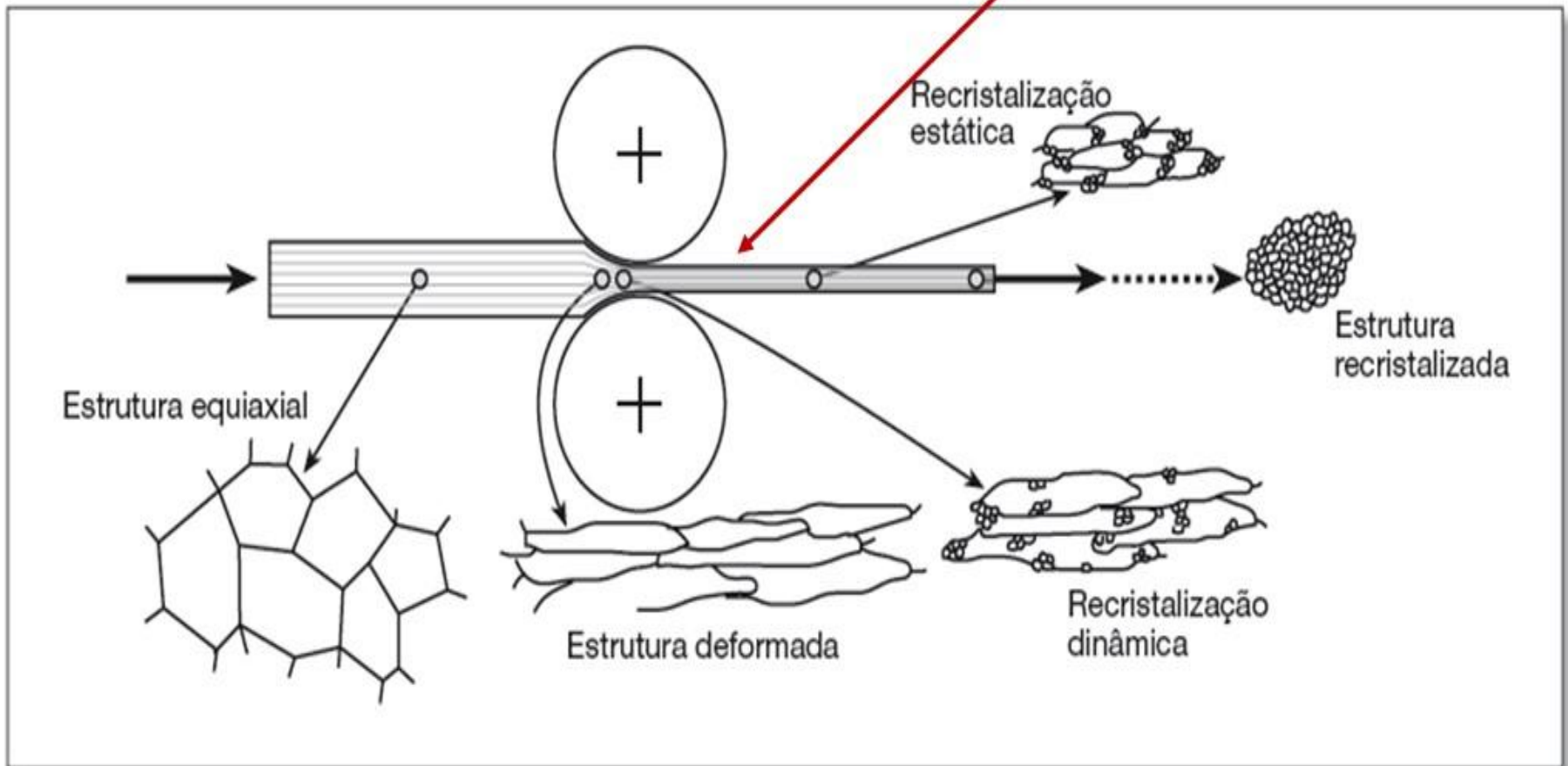
GRÃO B MAIS DEFORMADO (MAIOR DENSIDADE DE LDS/FORMAÇÃO DE SUBGRÃOS) QUE O GRÃO A

FENÔMENOS DA LAMINAÇÃO E EXTRUSÃO A QUENTE



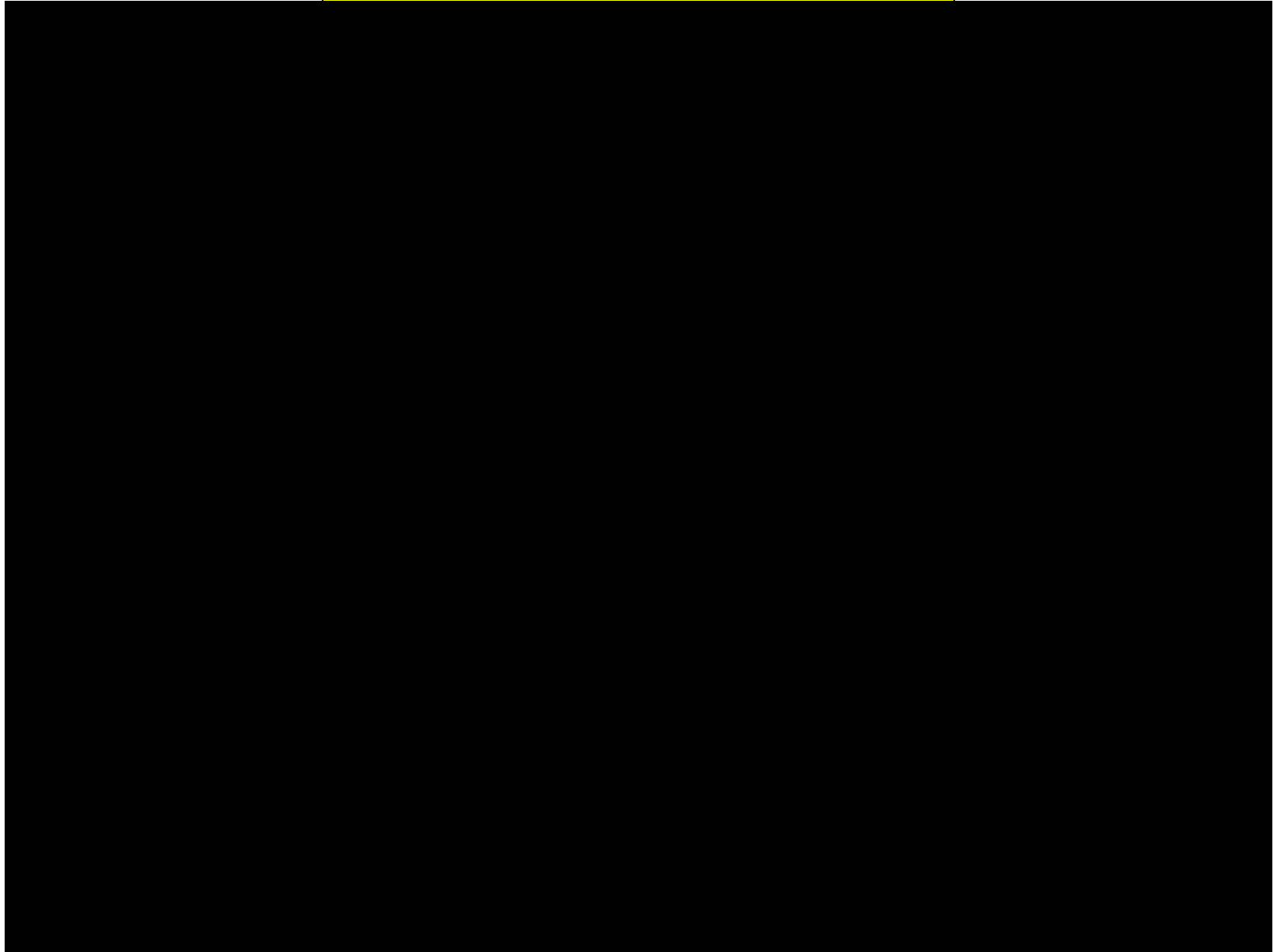
RECRISTALIZAÇÃO ESTÁTICA, DINÂMICA E METADINÂMICA

RECRISTALIZAÇÃO METADINÂMICA CRESCIMENTO DAS REGIÕES RECRISTALIZADAS DINAMICAMENTE



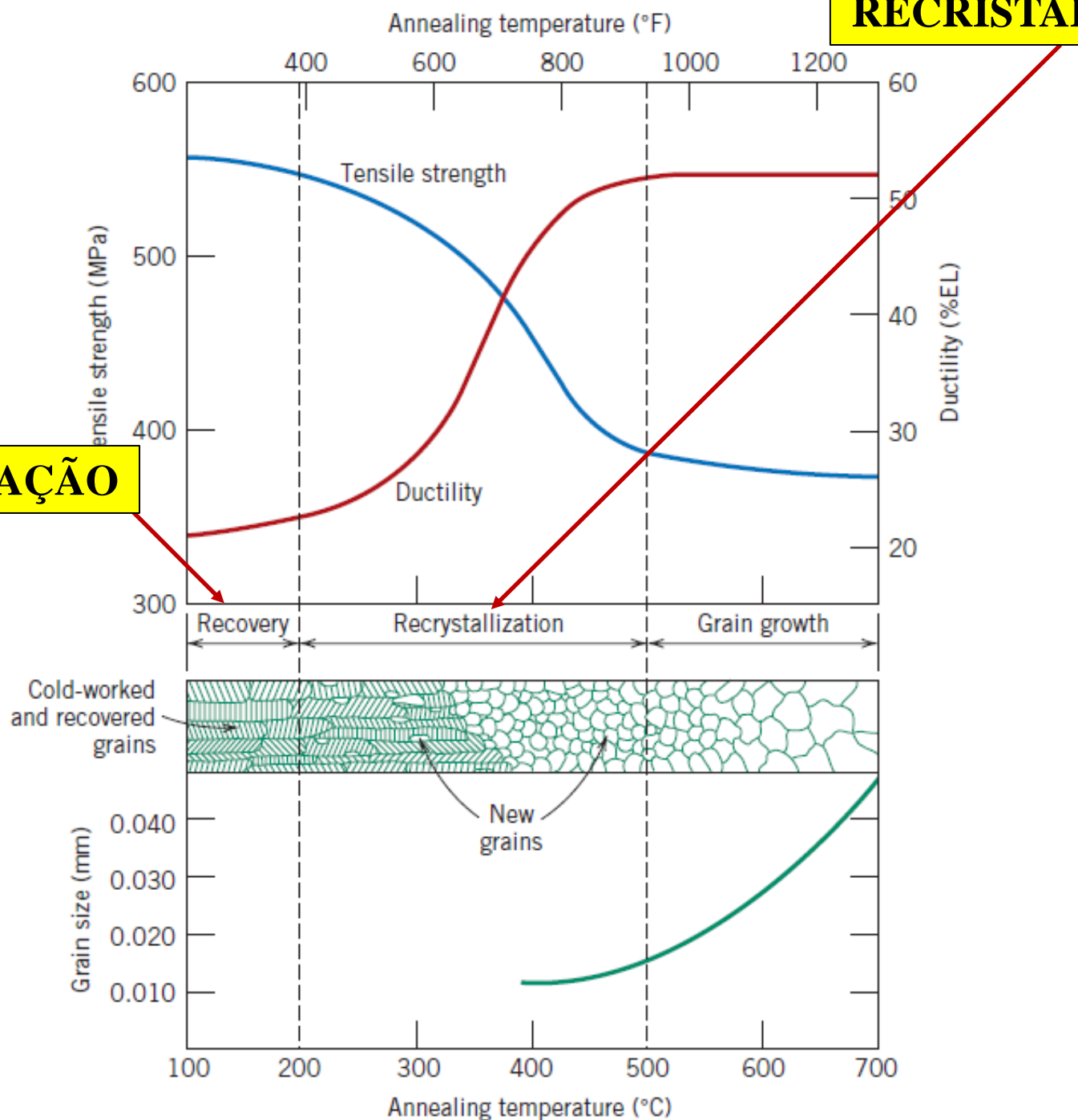


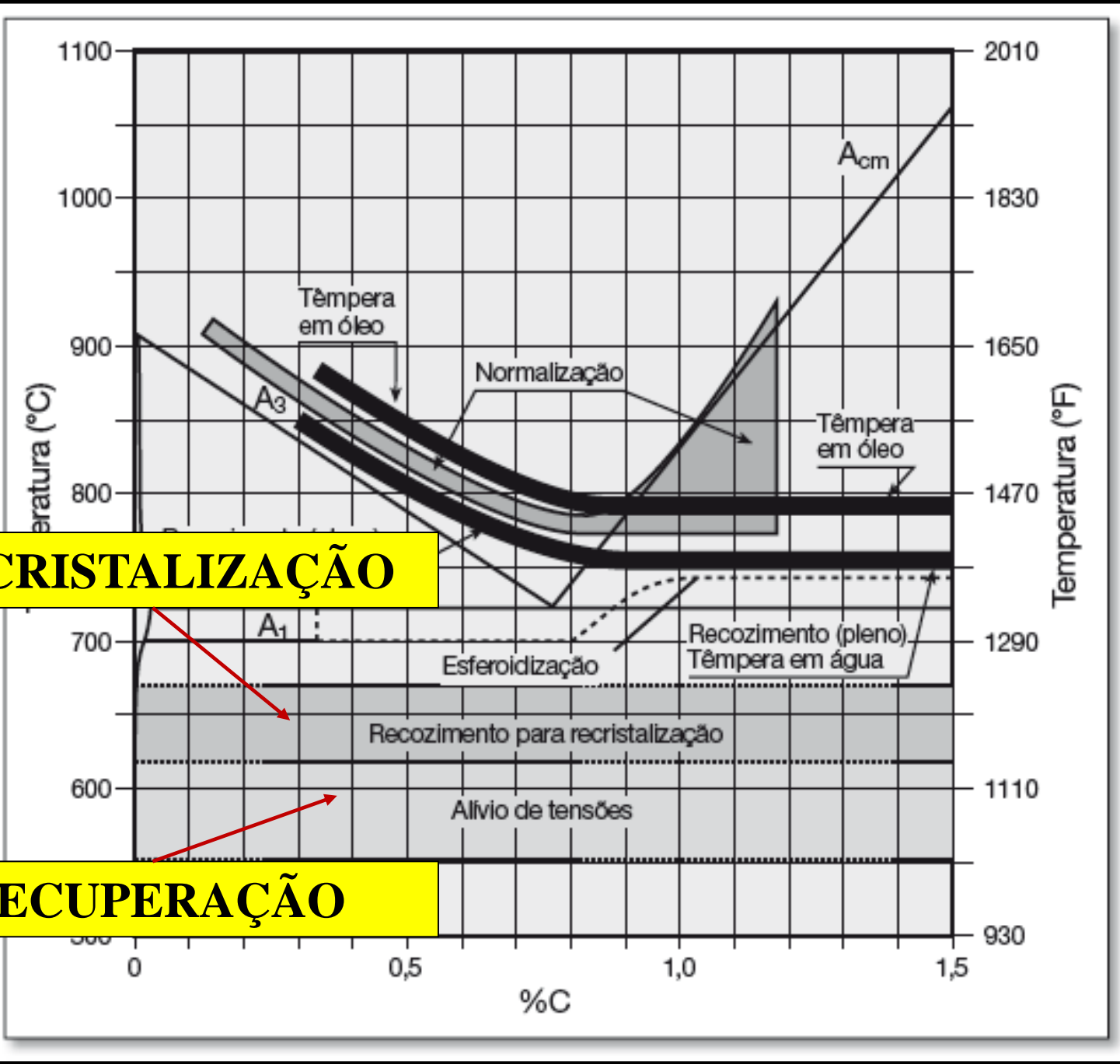
Open Die Forging



RECRISTALIZAÇÃO

RECUPERAÇÃO





RECRISTALIZAÇÃO

RECUPERAÇÃO

RECUPERAÇÃO ESTÁTICA

Metais encruados, com alto nível de linha de discordâncias passam por tratamento de **alívio de tensões**. Mecanismo básico é **aniquilação de linhas de discordância**. Ocorre redução da dureza, aumento de ductilidade, resistividade e elétrica voltam aos níveis de antes do encruamento.

O fenômeno de recuperação, normalmente ocorre a **partir de $0,2T_f$** .

RECUPERAÇÃO DINÂMICA

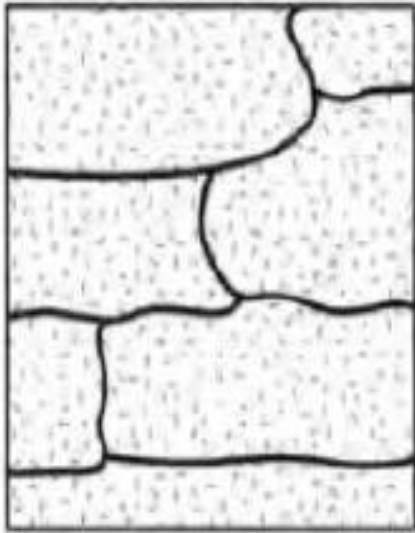
O fenômeno ocorre durante a deformação a quente.

Encruado

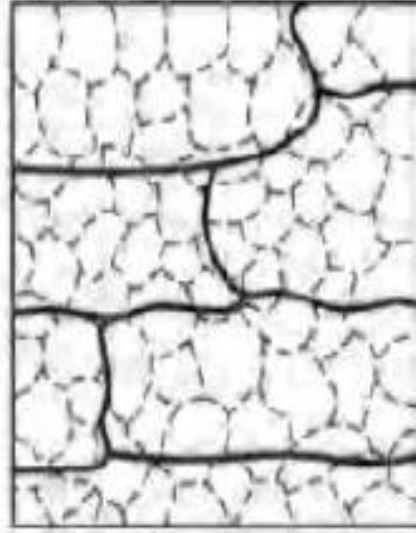
**Recuperação:
aniquilação de
discordâncias**

**Recristalização:
geração de novos
grãos**

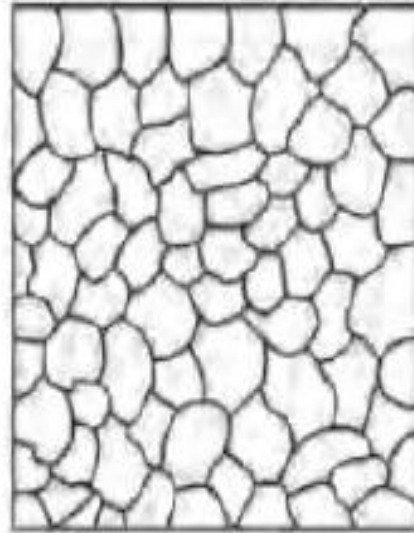
**Crescimento de
grão**



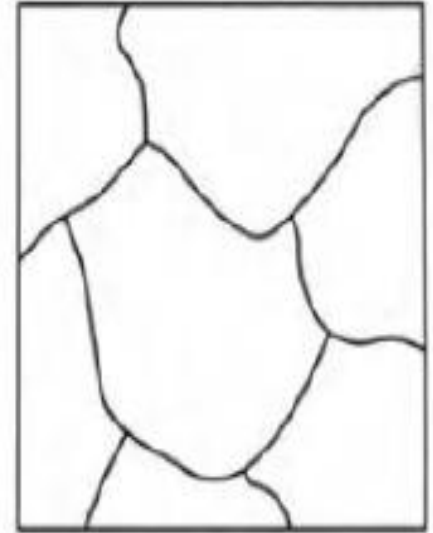
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 7.16

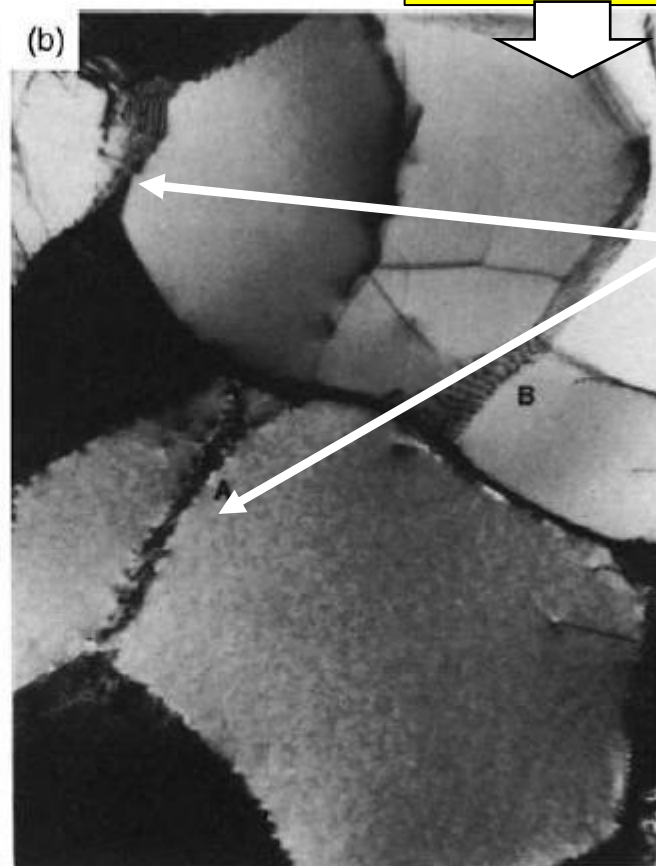
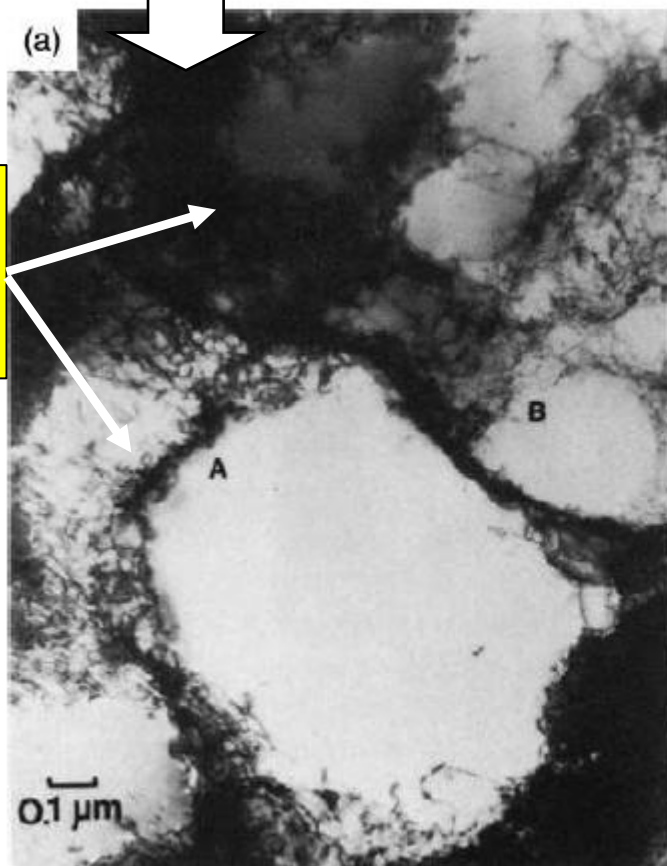
The effect of annealing temperature on the microstructure of cold-worked metals: (a) cold worked, (b) after recovery, (c) after recrystallisation, and (d) after grain growth.

**Alumínio com 10%
de deformação**

Recovery After Deformation

Após recuperação

**LD's
Antes da
Rec.**



**LD's
Após da
Rec.**

Fig. 6.13. Transmission high voltage electron micrographs (HVEM) of aluminium deformed 10% and annealed in-situ. (a) Deformed structure, (b) Same area after 2 min anneal at 250°C.

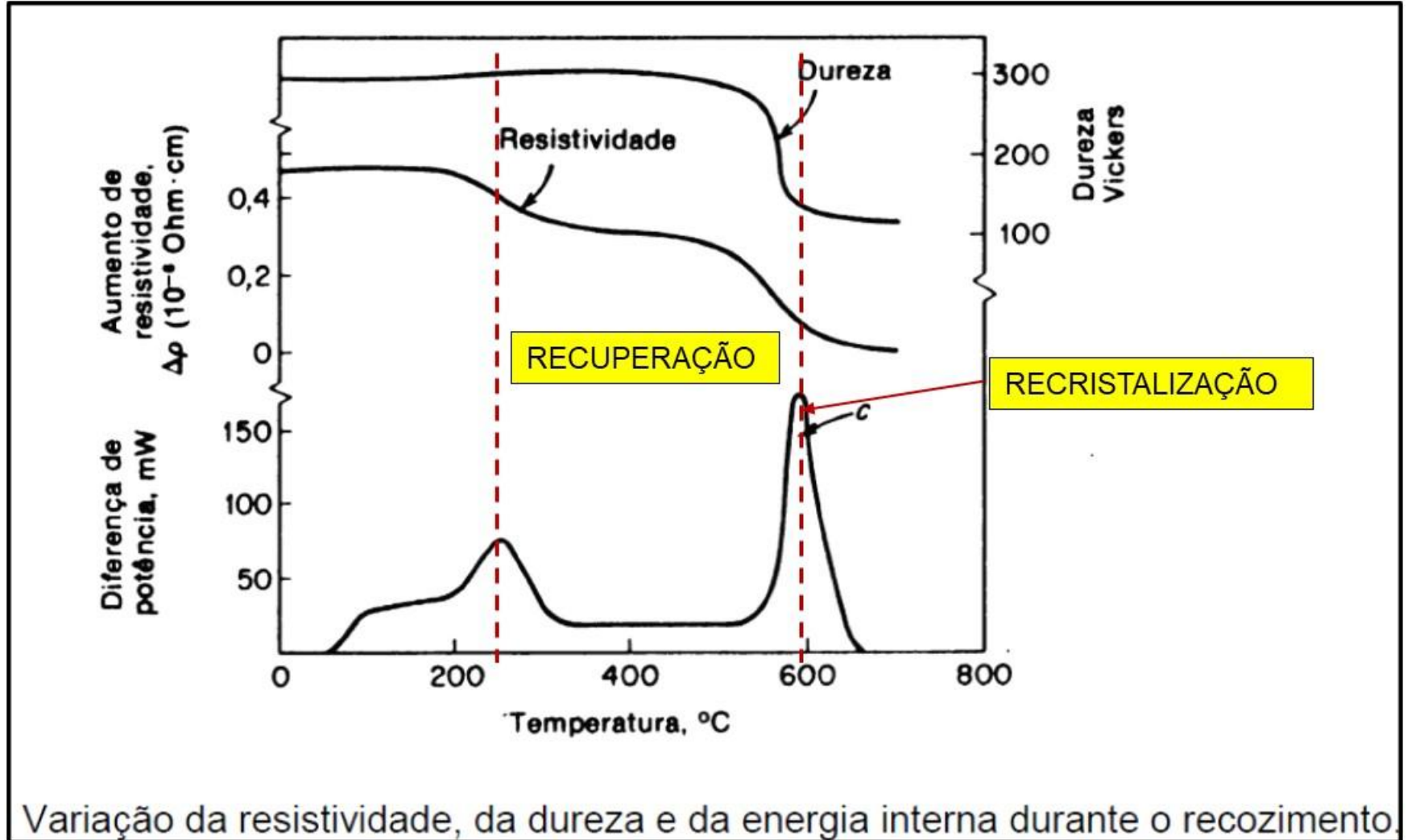


Table 7.2 Recrystallization and Melting Temperatures for Various Metals and Alloys

<i>Metal</i>	<i>Recrystallization Temperature</i>		<i>Melting Temperature</i>	
	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{F}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{F}$
Lead	-4	25	327	620
Tin	-4	25	232	450
Zinc	10	50	420	788
Aluminum (99.999 wt%)	80	176	660	1220
Copper (99.999 wt%)	120	250	1085	1985
Brass (60 Cu-40 Zn)	475	887	900	1652
Nickel (99.99 wt%)	370	700	1455	2651
Iron	450	840	1538	2800
Tungsten	1200	2200	3410	6170

RECUPERAÇÃO X RECRISTALIZAÇÃO



Materiais com alta Energia de Falha de Empilhamento (EFE) recuperam mais facilmente que recristalizam: Geralmente CFC.

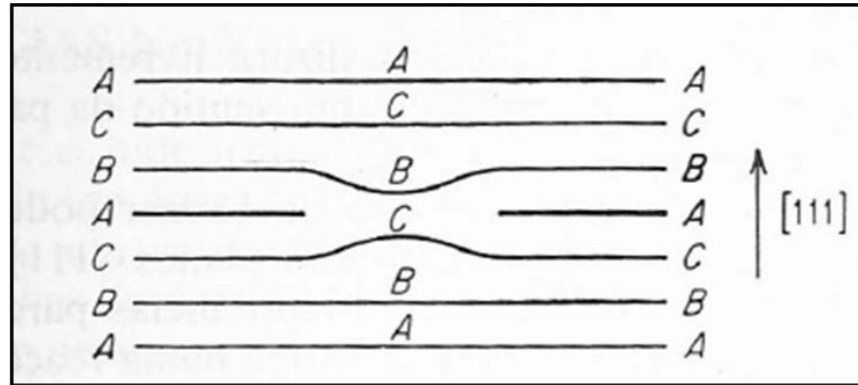
Ex: Al;

Materiais com baixa Energia de Falha de Empilhamento (EFE) recristalizam mais facilmente e recuperam com mais dificuldade.

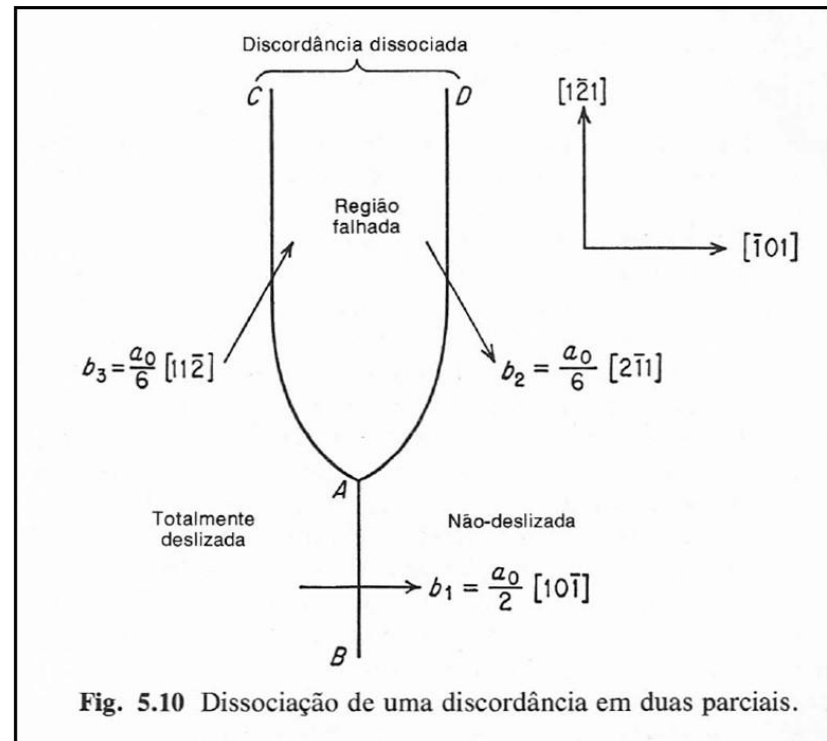
Ex: Aços;

EFE- relacionada à distância entre discordâncias parciais de Shockley.

FALHA DE EMPILHAMENTO



DISCORDÂNCIA PARCIAIS DE SHOCKLEY





FIM