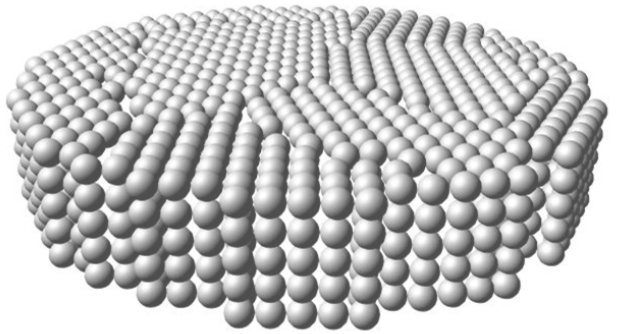
Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de Lorena

Departamento de Engenharia de Materiais



# LOM 3080 – PROCESSOS DA INDÚSTRIA METALÚRGICA E SIDERÚRGICA

**Prof. Dr. Cassius O.F.T. Ruchert, Professor Associado**

# FUNDAMENTOS SOBRE AÇOS E FERROS FUNDIDOS

- **Produção mundial de plástico (ABIPLAST):**
  **250.000.000 por ano**

- **Produção mundial de aço (World Steel Association) em 2014:**
  **1 646 729 toneladas**
- **Produção mundial de aço (World Steel Association) em 2015**
  **1 599 484 toneladas**

# O QUE É AÇO?

É UMA LIGA DE FERRO E CARBONO COM ELEMENTOS RESIDUAIS: P, S, Mn

# ESTRUTURA

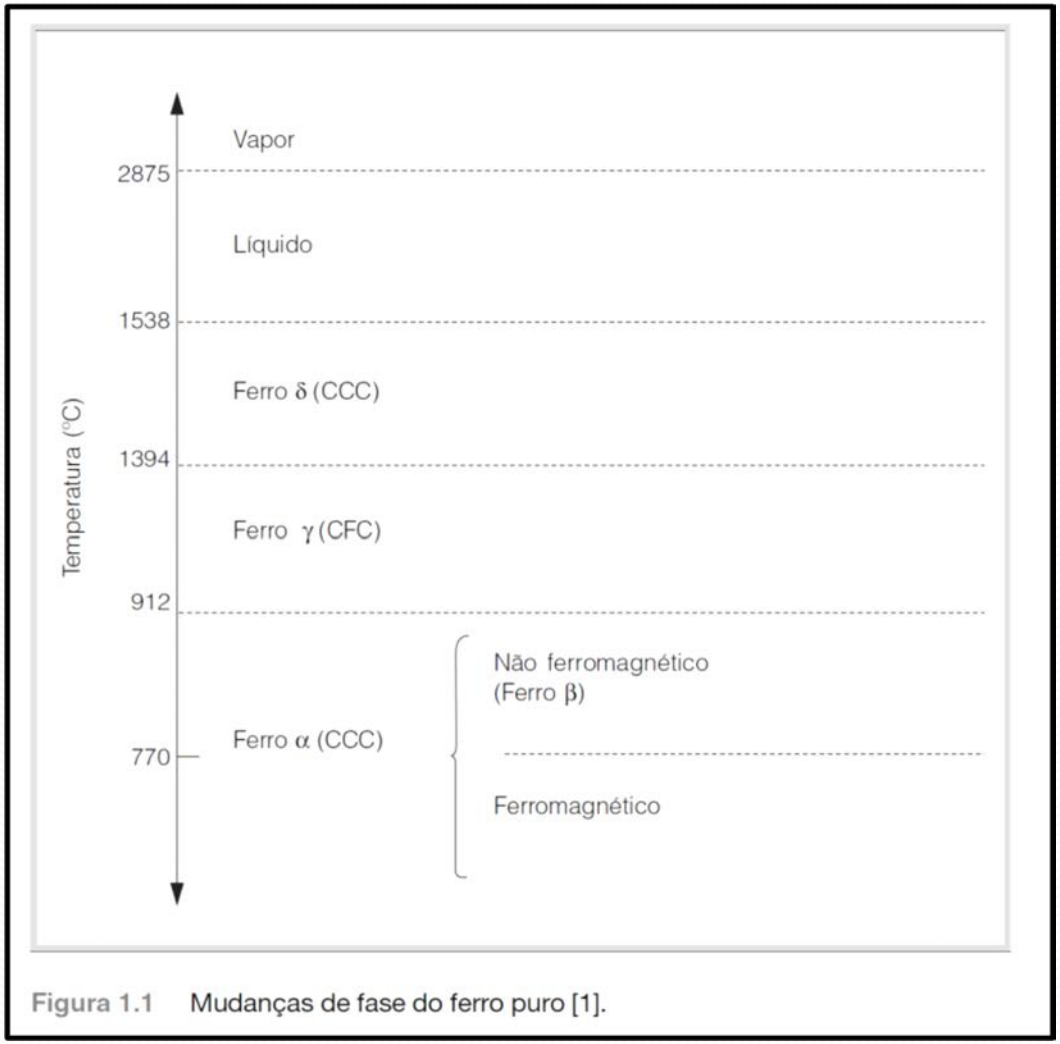



Figura 1.1 Mudanças de fase do ferro puro [1].

*(André.V. Costa e Silva e P.Mei)*

# DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO

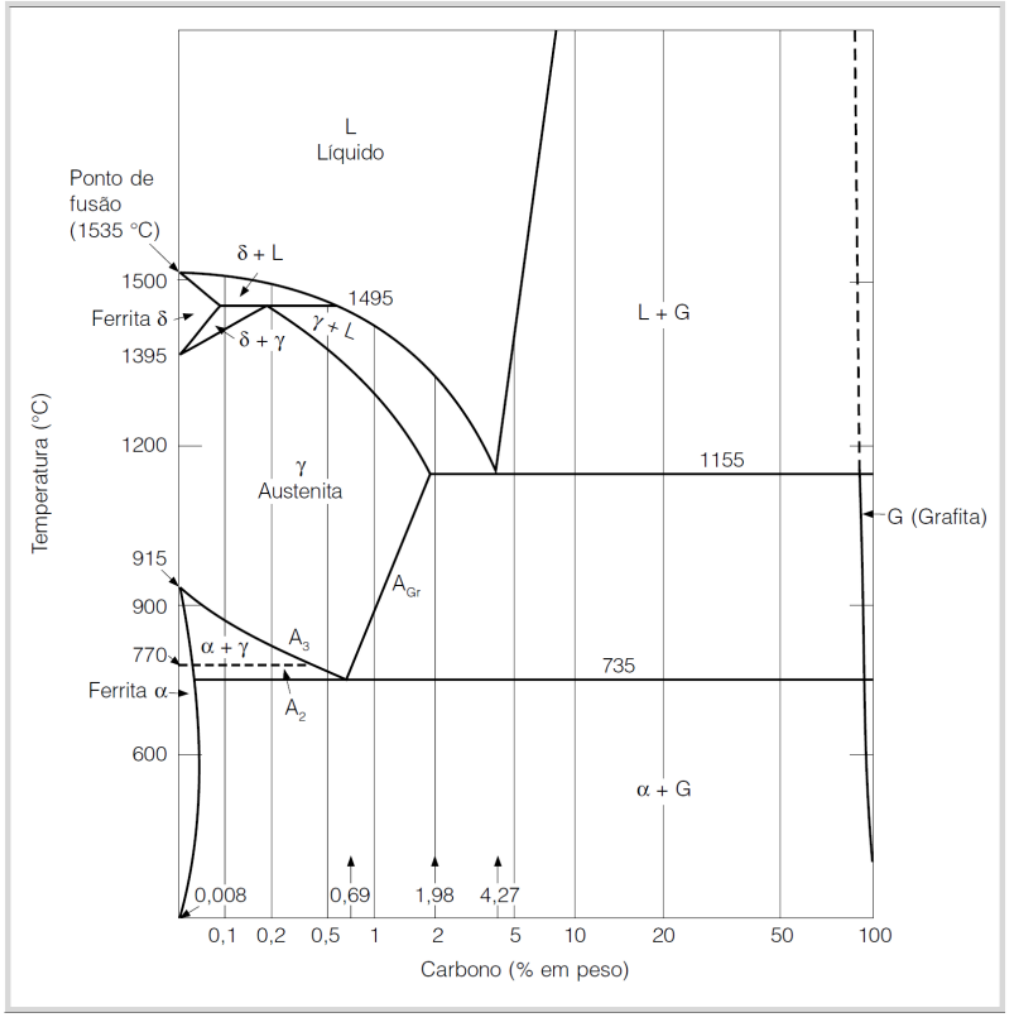
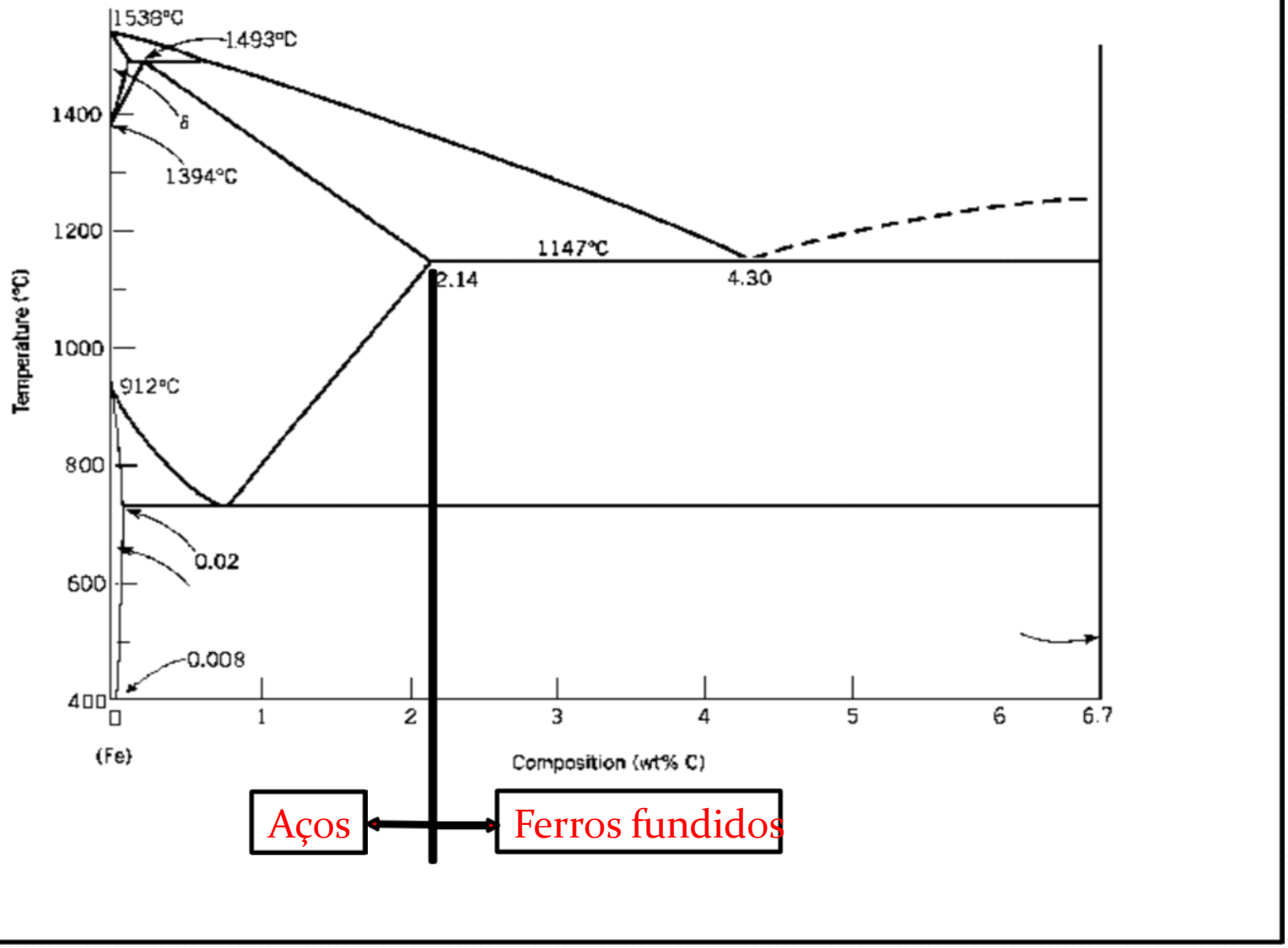



Figura 1.9 Diagrama de equilíbrio ferro-grafita [12].

Em ***equilíbrio termodinâmico real***, no resfriamento da liga Fe-C, as fases de equilíbrio em temperatura ambiente seriam o ferro α (ferrita) e a grafita.

*(André.V. Costa e Silva e P.Mei)*

# DIAGRAMA


1538°C
1493°C
δ
1400
1394°C
1200
1147°C
2.14
4.30
1000
912°C
800
0.02
600
0.008
400
Temperature (°C)
0
1
2
3
4
5
6
6.7
(Fe)
Composition (wt% C)
Aços
Ferros fundidos

# DIAGRAMA DE FASES

Na produção real do aço, os resfriamentos são muito rápidos e não existe o ***equilíbrio termodinâmico real***, fazendo com que ocorra uma fase metaestável: a Cementita ($Fe_3C$). Por isso a nomenclatura correta ao se referir a este diagrama é ***diagrama de fases*** e não diagrama de equilíbrio. **Tridimensional**

*(André.V. Costa e Silva e P.Mei)*

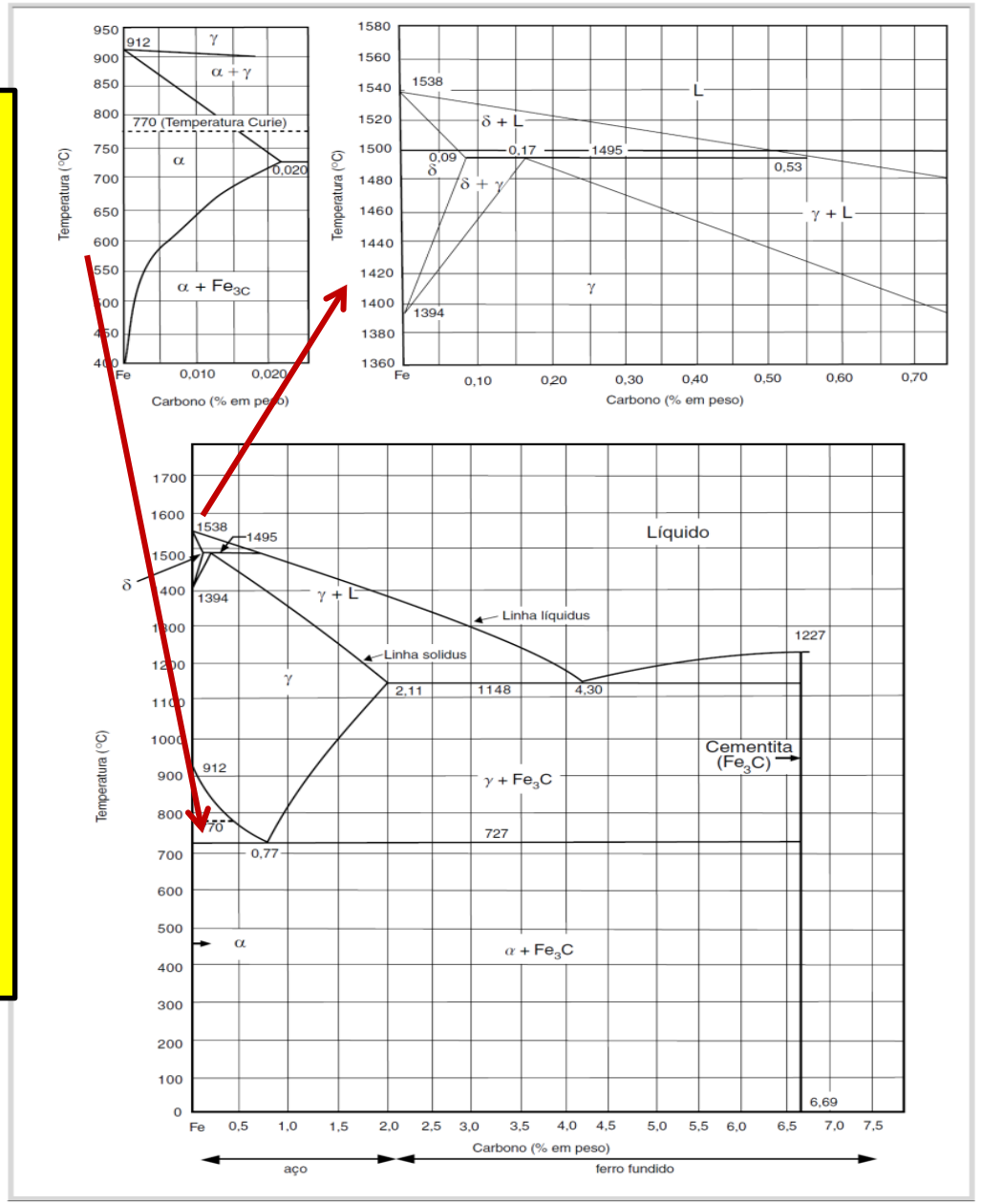



Figura 1.10 Diagrama de fases ferro-cementita [1].

# DIAGRAMA DE FASES

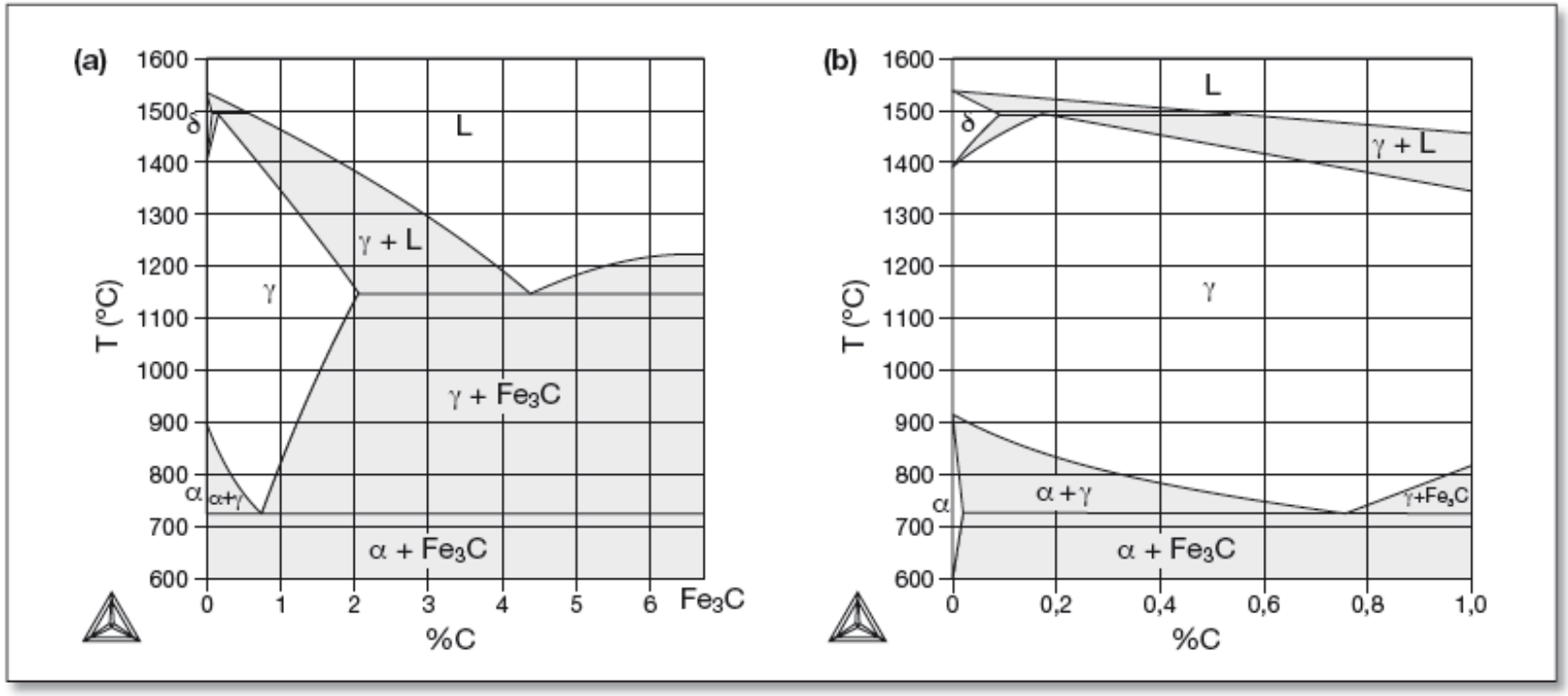
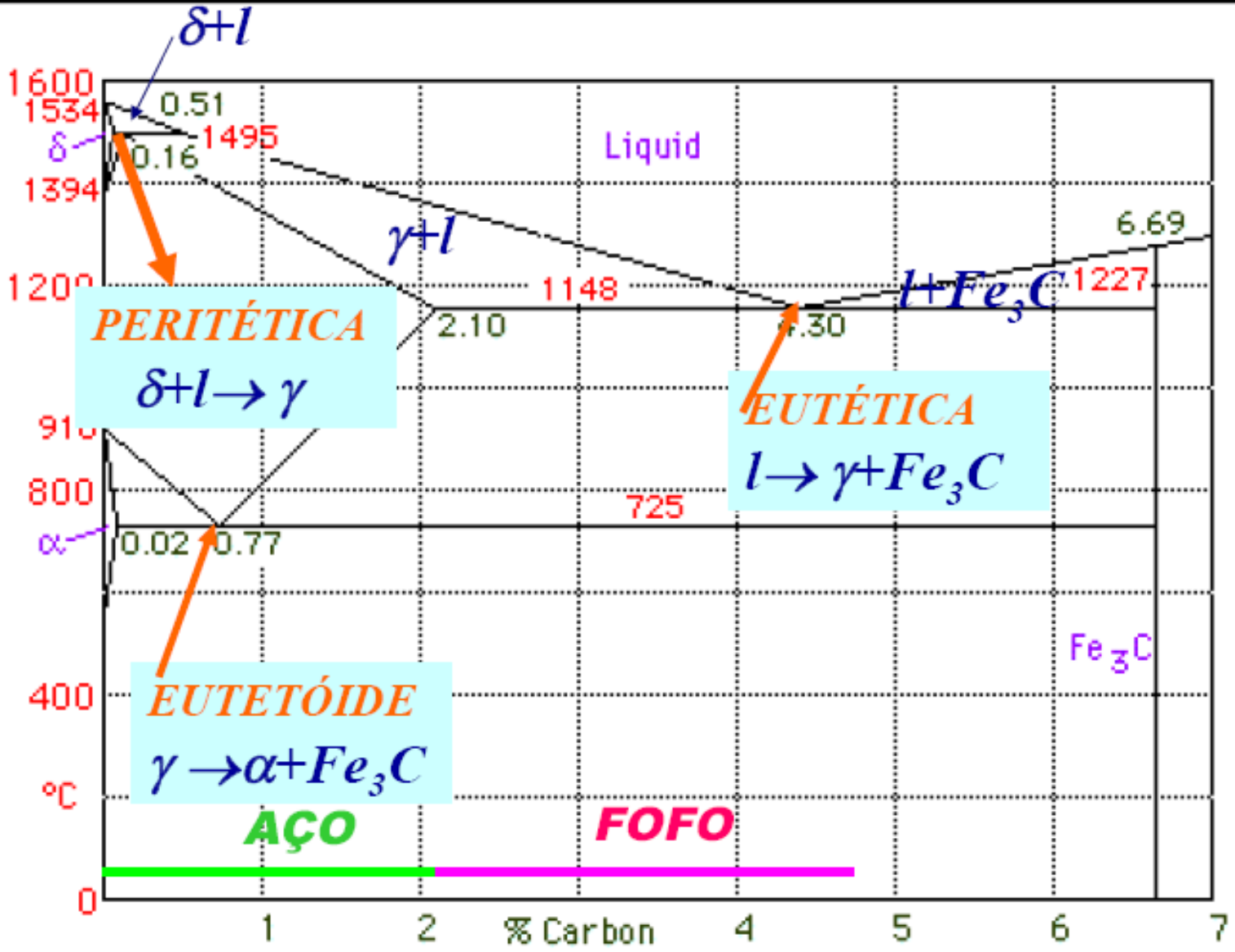


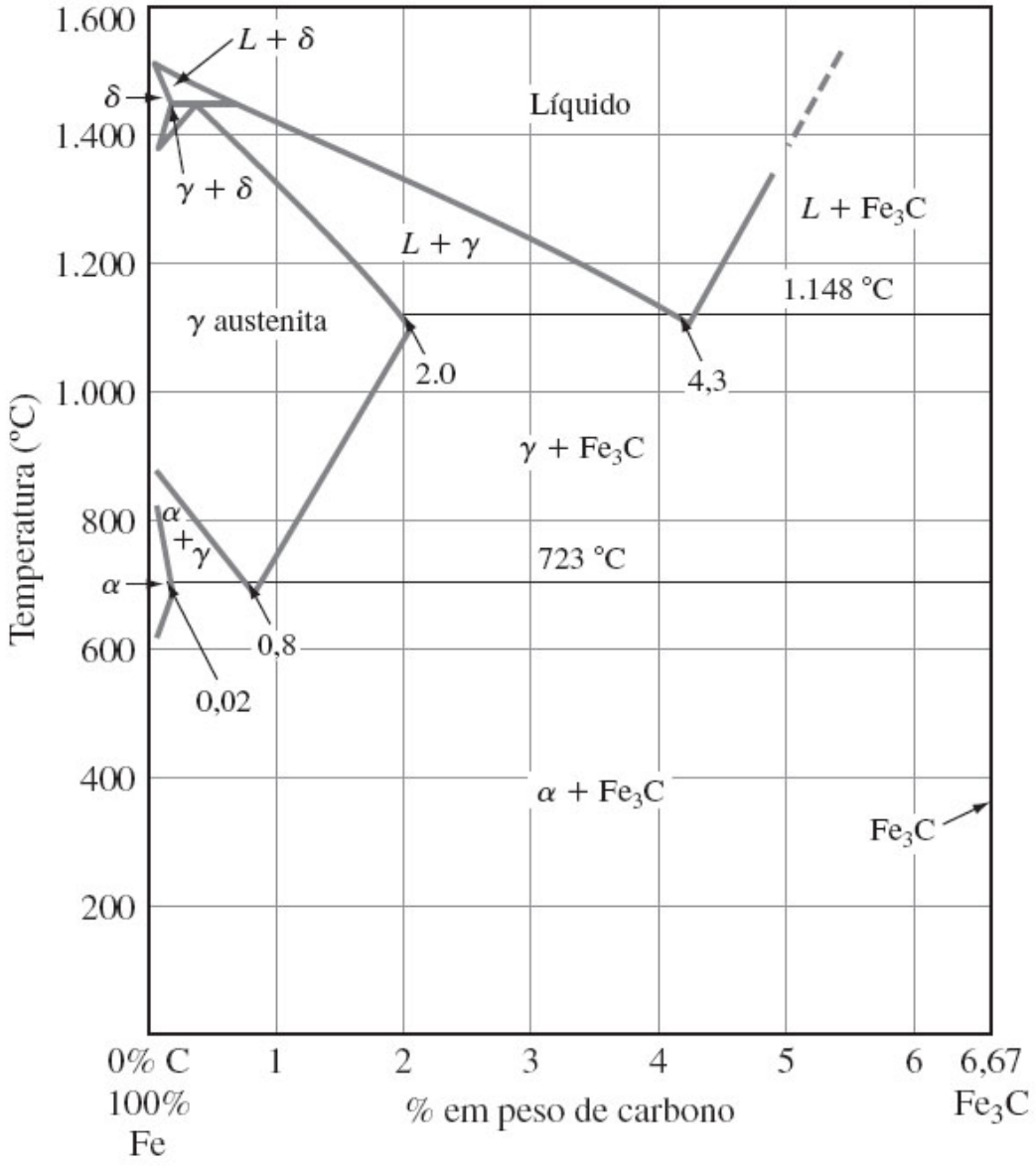

**Figura 7.1**
Diagrama de equilíbrio metastável ferro-carbono. Duas escalas diferentes no eixo da composição química. O diagrama de equilíbrio informa quais as fases de equilíbrio em cada região, mas não informa (a) se o equilíbrio será atingido; (b) quais as características microestruturais (formas, distribuições das fases) existirão em cada campo [6].

*(Colpaert)*

# DIAGRAMA DE FASES



# DIAGRAMA DE FASES




*(Smith)*

# FASES E CONSTITUINTES

- ***Ferrita (δ):*** Solução sólida de C em Fe CCC – 1.394ºC a 1.538ºC. Solubilidade máxima de 0,09% de C em 1.495ºC (a=2,91Å)

- ***Austenita (γ)***: Solução sólida de C no Fe CFC- 727ºC a 1.495ºC. Solubilidade máxima de C-2,11 % a 2,14%, em 1148º;

- ***Ferrita (α):*** Solução sólida de C no Fe CCC – até 912º. Solubilidade máxima 0,020% de C em 723ºC a 727ºC (a=2,88Å);

- ***Cementita ($Fe_3C$):*** ortorrômbico, alta dureza;

- ***Perlita***: ***microconstituinte*** formado por ***α*** e ***$Fe_3C$.***

# FASES E CONSTITUINTES

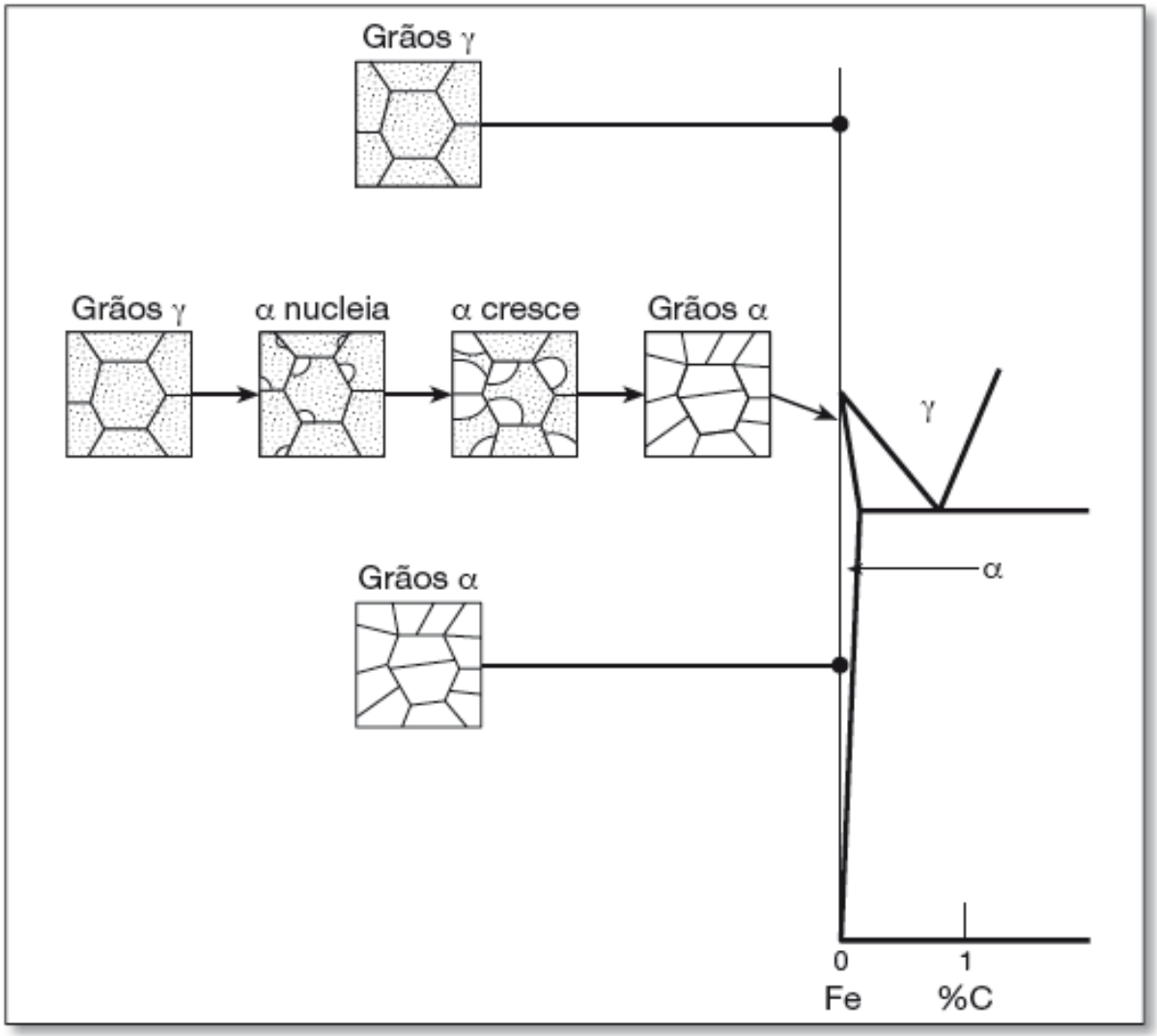



**Figura 7.2**
Representação esquemática da transformação da austenita em ferrita em condições próximas ao equilíbrio. Adaptado de Ashby [7].

*(Colpaert)*

# FASES E CONSTITUINTES

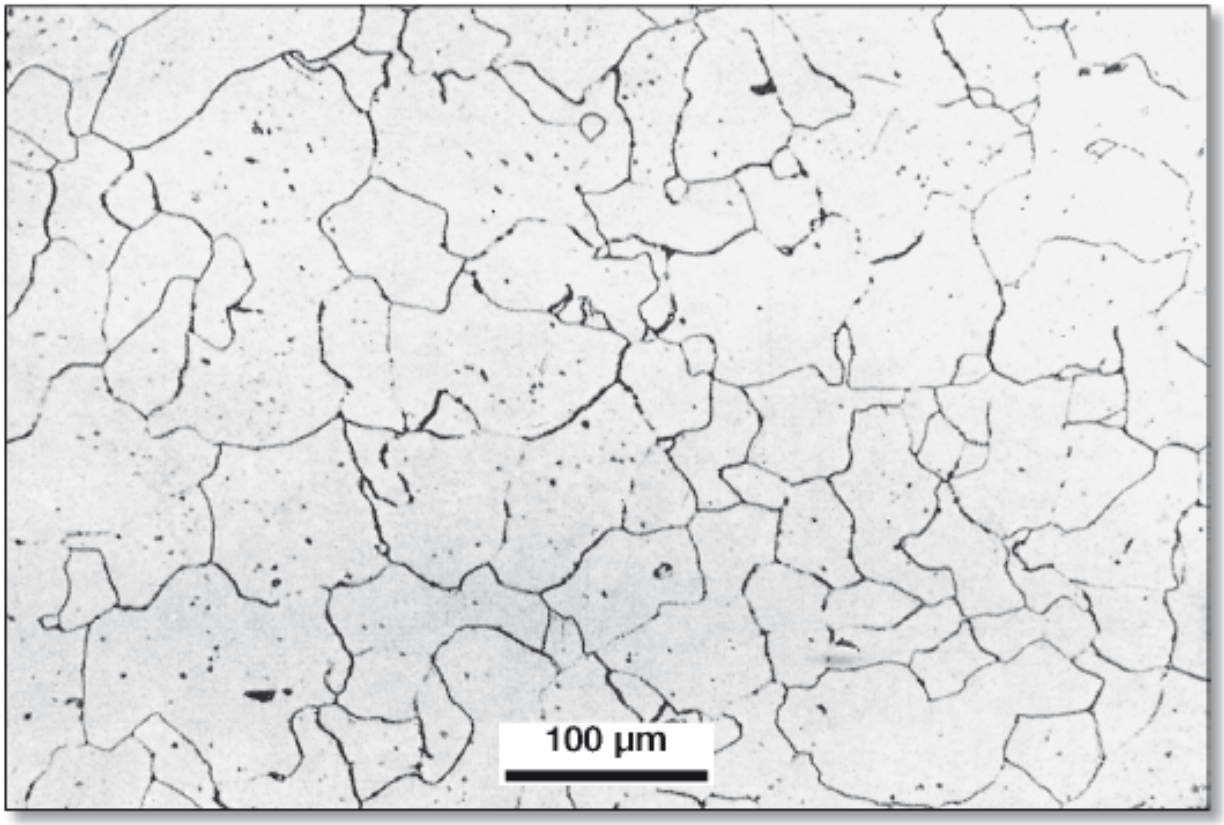
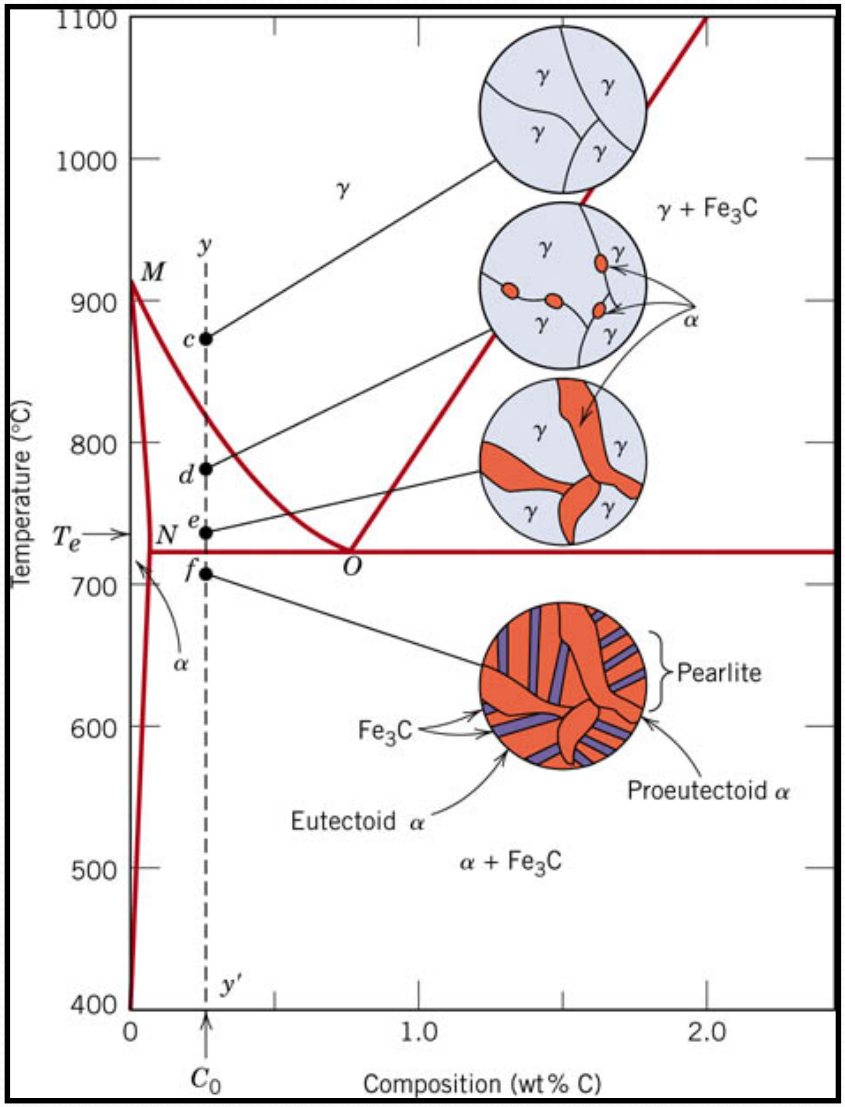



**Figura 7.3**
Aço de teor de carbono extra baixo[7] (no caso, Ferro Armco). Grãos de ferrita e pequenas inclusões não-metálicas. Ataque: água régia.

*(Colpaert)*

# FASES E CONSTITUINTES




*(Callister)*

# FASES E CONSTITUINTES

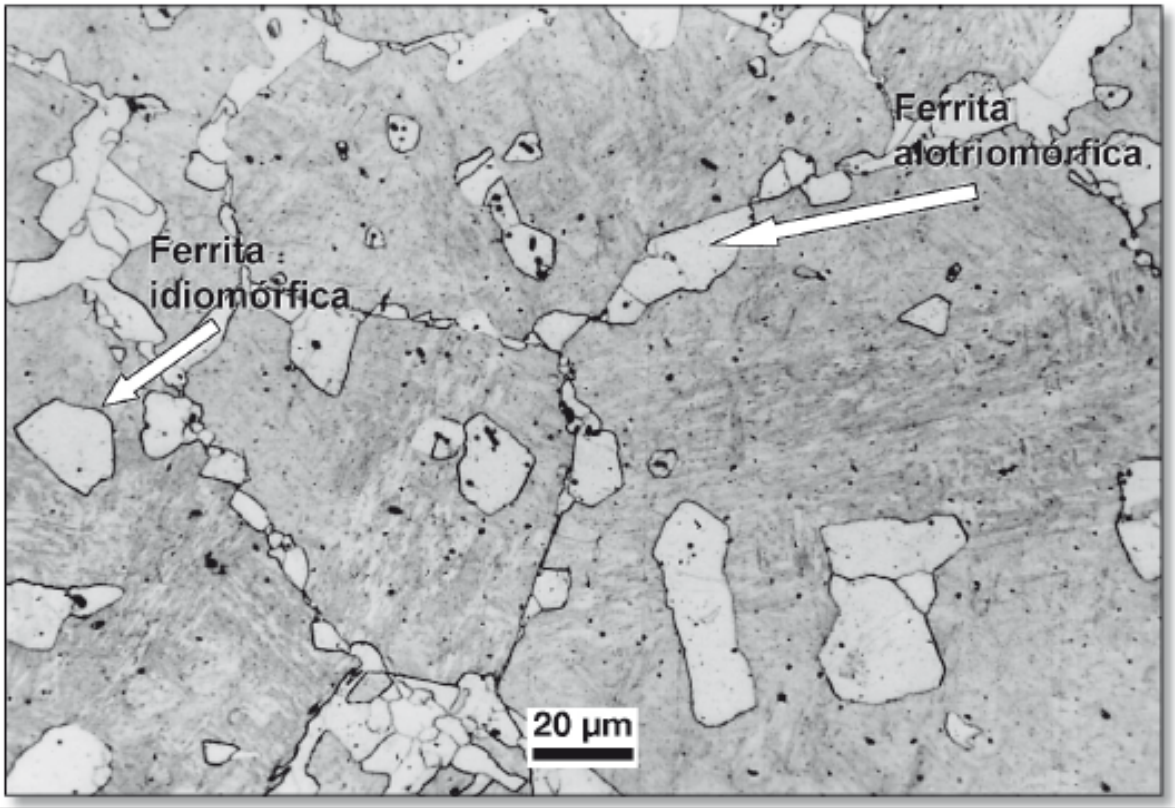



**Figura 9.64**
Diferentes morfologias de ferrita pró-eutectóide em aço com C = 0.37% Mn = 1.5% e V = 0.11% transformado isotermicamente a 700 °C. Observa-se ferrita alotriomórfica nucleada nos contornos de grão austeníticos anteriores e ferrita idiomórfica. A matriz transformou para martensita no resfriamento brusco após o tratamento isotérmico. Cortesia C. Capdevila Montes, Grupo Materialia (CENIM-CSIC), Madrid, Espanha.

*(Colpaert)*

# FASES E CONSTITUINTES

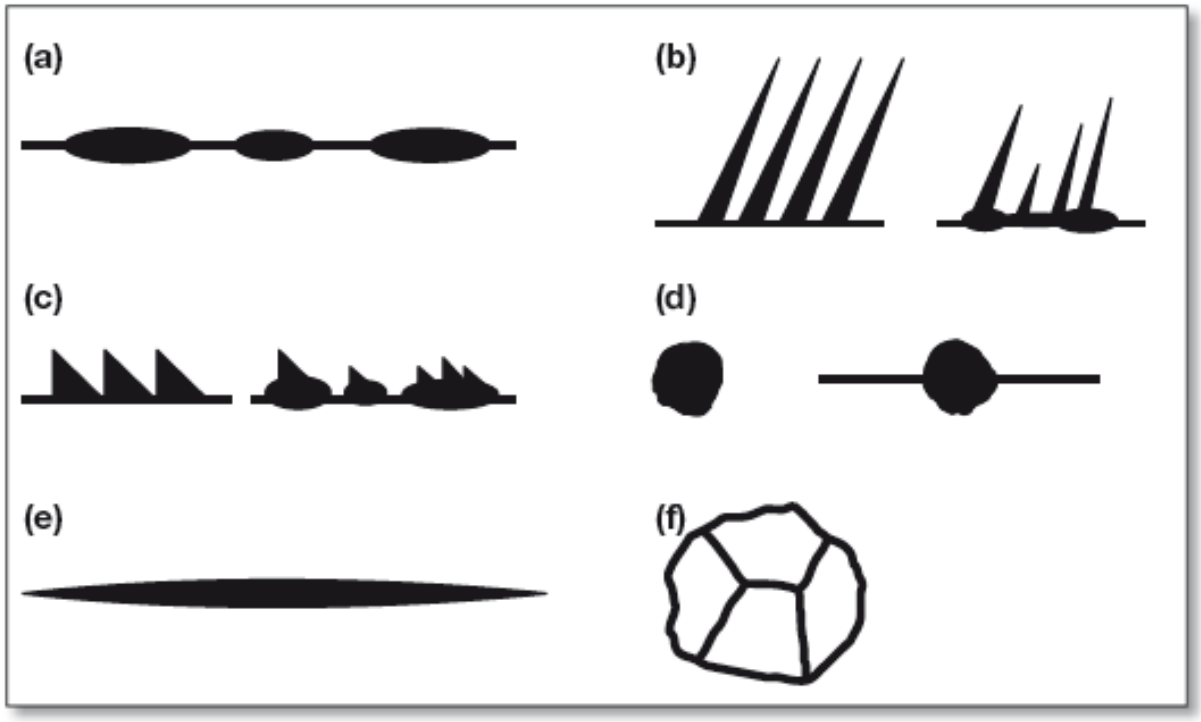
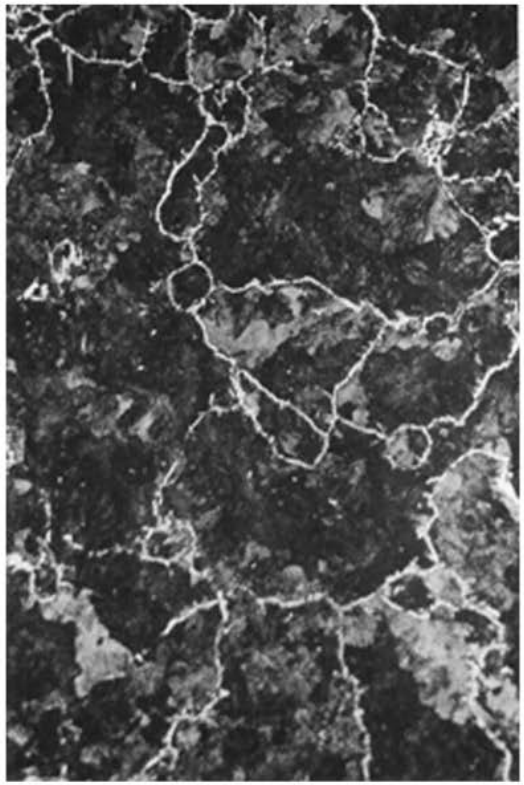



**Figura 9.63**
Esquema da classificação de Dubé, modificada por Aaronson, para as formas da ferrita em aços: (a) alotriomorfos; (b) ferrita Widmanstätten primária (*primary side plates*, "placas laterais de ferrita") e ferrita Widmanstätten secundária (*secondary side plates*, "placas laterais de ferrita"); (c) ferrita Widmanstätten em "dentes de serra"; (d) idiomorfos; (e) ferrita Widmanstätten intergranular e (f) ferrita massiva (adaptado de [63]) Ver texto para discussão.

*(Colpaert)*

# FASES E CONSTITUINTES



100X

1.000X

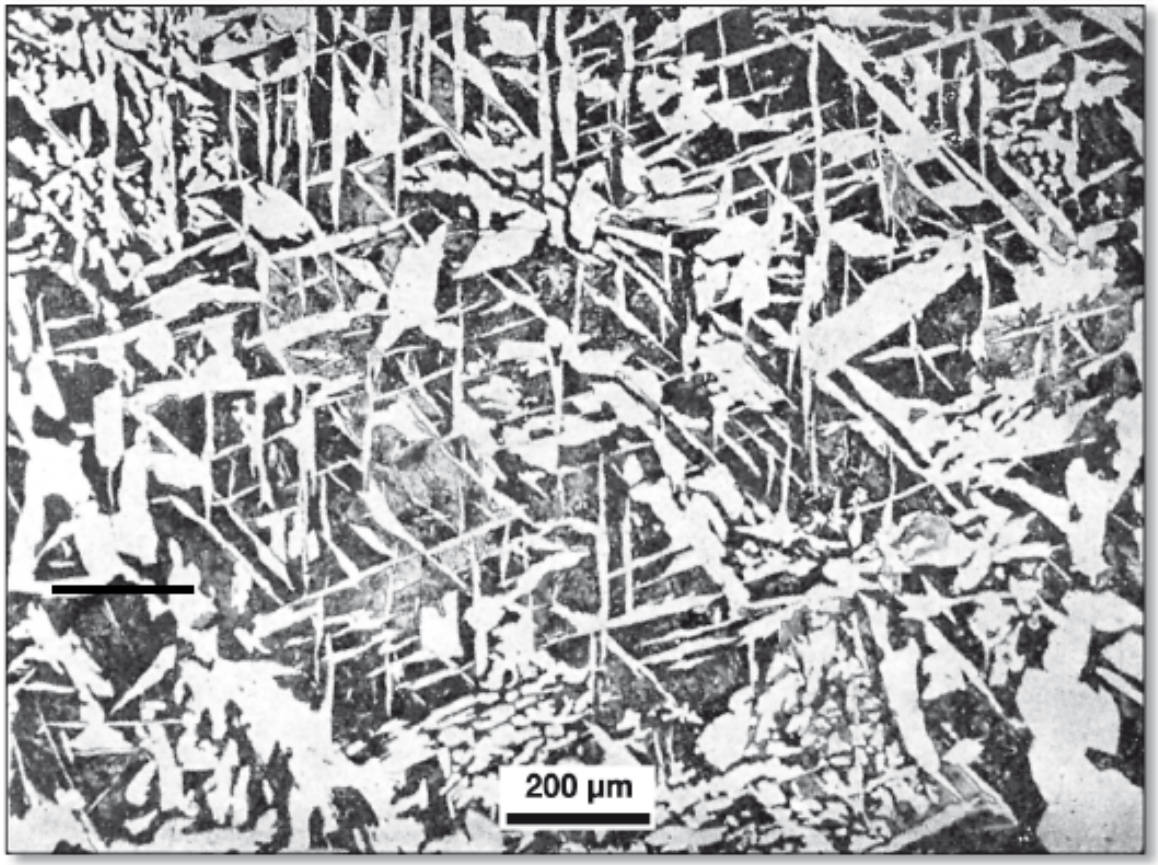
Resfriamento a 100 °C/min. Ferrita equiaxial no contorno de grão e ferrita de Widmanstätten nucleada no contorno e no interior do grão austenítico.

**Figura 2.4** Aço 0,40 C – 0,94 Mn – 0,03 Nb austenitizado a 1300 °C e resfriado com taxas diferentes. Nital [2]. (continuação)

*(Costa e Silva e Mei)*

# FASES E CONSTITUINTES

**Figura 9.71**
Aço médio carbono com Cr = 0,3%, bruto de fusão. Ferrita e perlita. Ferrita Widmanstätten. Ataque: Nital.




*(Colpaert)*

# FASES E CONSTITUINTES

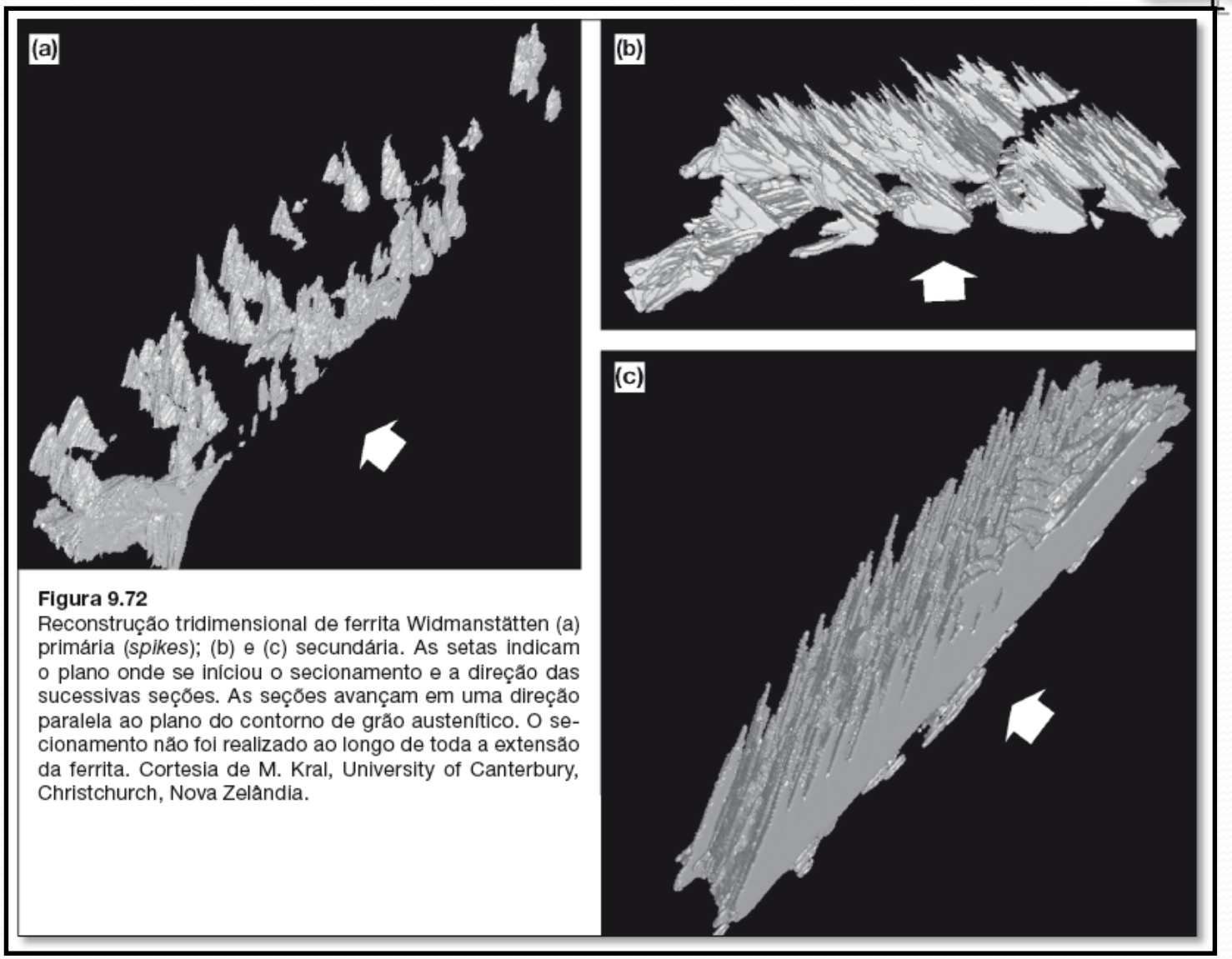



**Figura 9.72**
Reconstrução tridimensional de ferrita Widmanstätten (a) primária (*spikes*); (b) e (c) secundária. As setas indicam o plano onde se iniciou o secionamento e a direção das sucessivas seções. As seções avançam em uma direção paralela ao plano do contorno de grão austenítico. O secionamento não foi realizado ao longo de toda a extensão da ferrita. Cortesia de M. Kral, University of Canterbury, Christchurch, Nova Zelândia.

*(Colpaert)*

# FASES E CONSTITUINTES

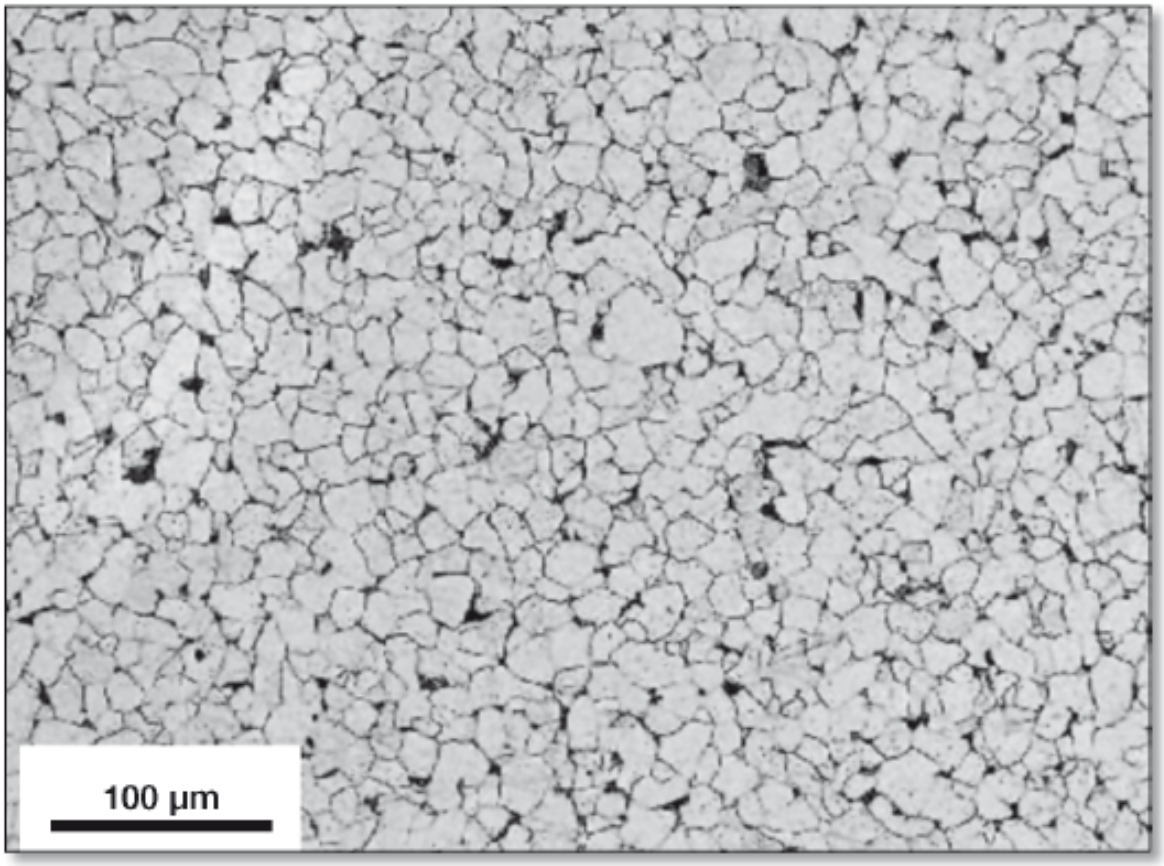
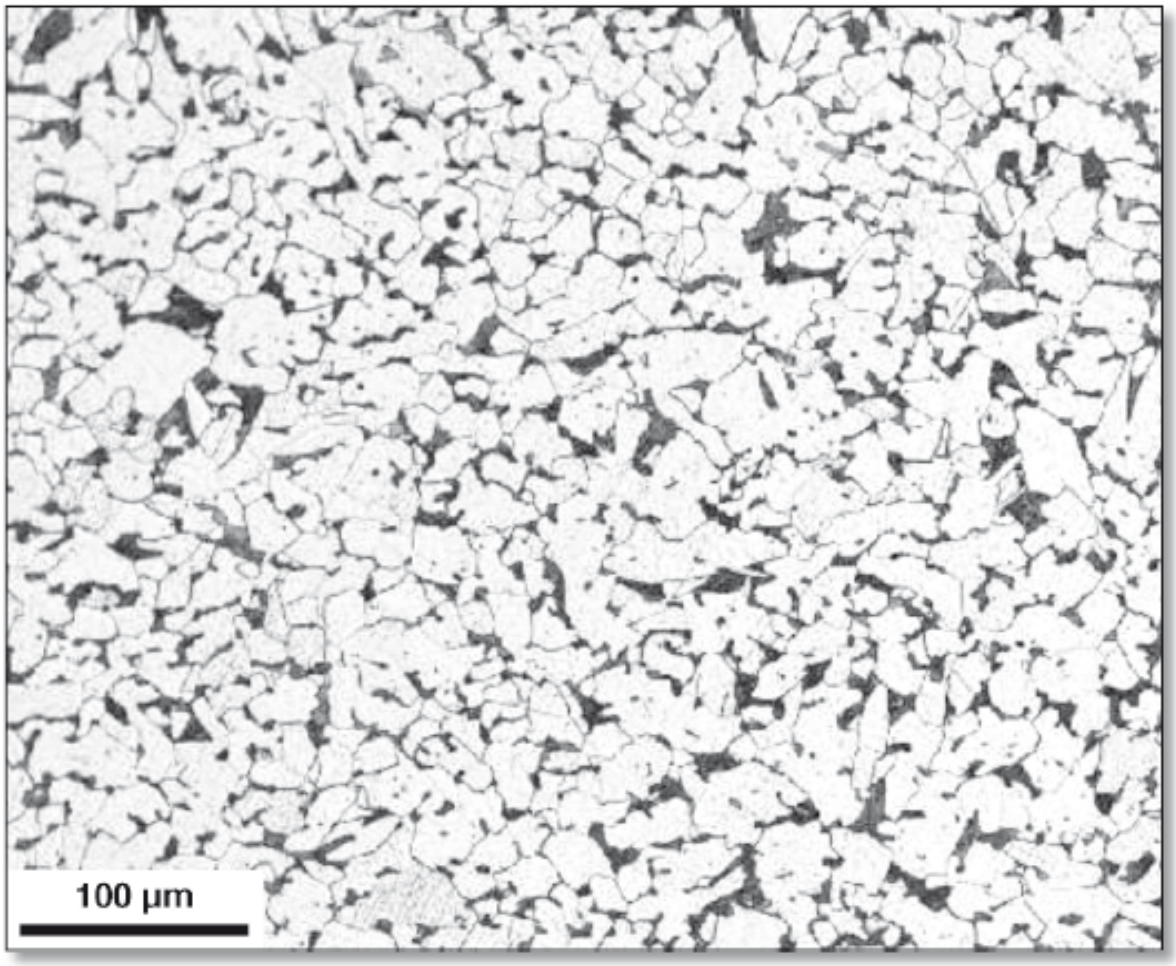



**Figura 7.23**
Seção transversal de fio-máquina de aço AISI 1005 normalizado. Ferrita e perlita (fração volumétrica ≈ 5%). Tamanho de grão ferrítico ASTM 9. Ataque: Nital 2%. Cortesia ArcelorMittal Aços Longos, Juiz de Fora, MG, Brasil.

*(Colpaert)*

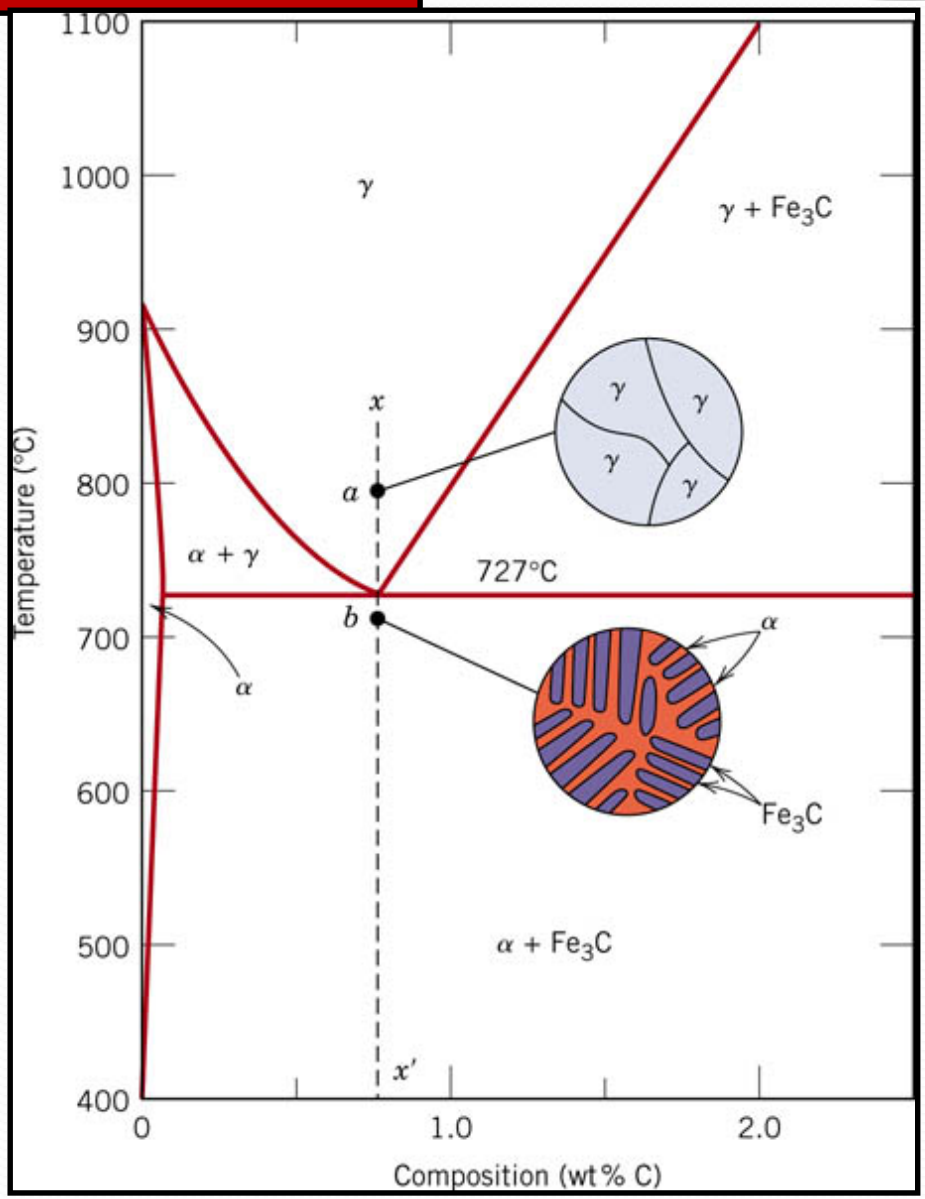
# FASES E CONSTITUINTES

**Figura 7.25**
Seção transversal de fio-máquina de aço AISI 1010 normalizado. Ferrita e perlita (fração volumétrica ≈ 10%). Tamanho de grão ferrítico ASTM 8-9. Ataque: Nital 2%. Cortesia ArcelorMittal Aços Longos, Juiz de Fora, MG, Brasil.




*(Colpaert)*

# FASES E CONSTITUINTES




*(Callister)*

# FASES E CONSTITUINTES

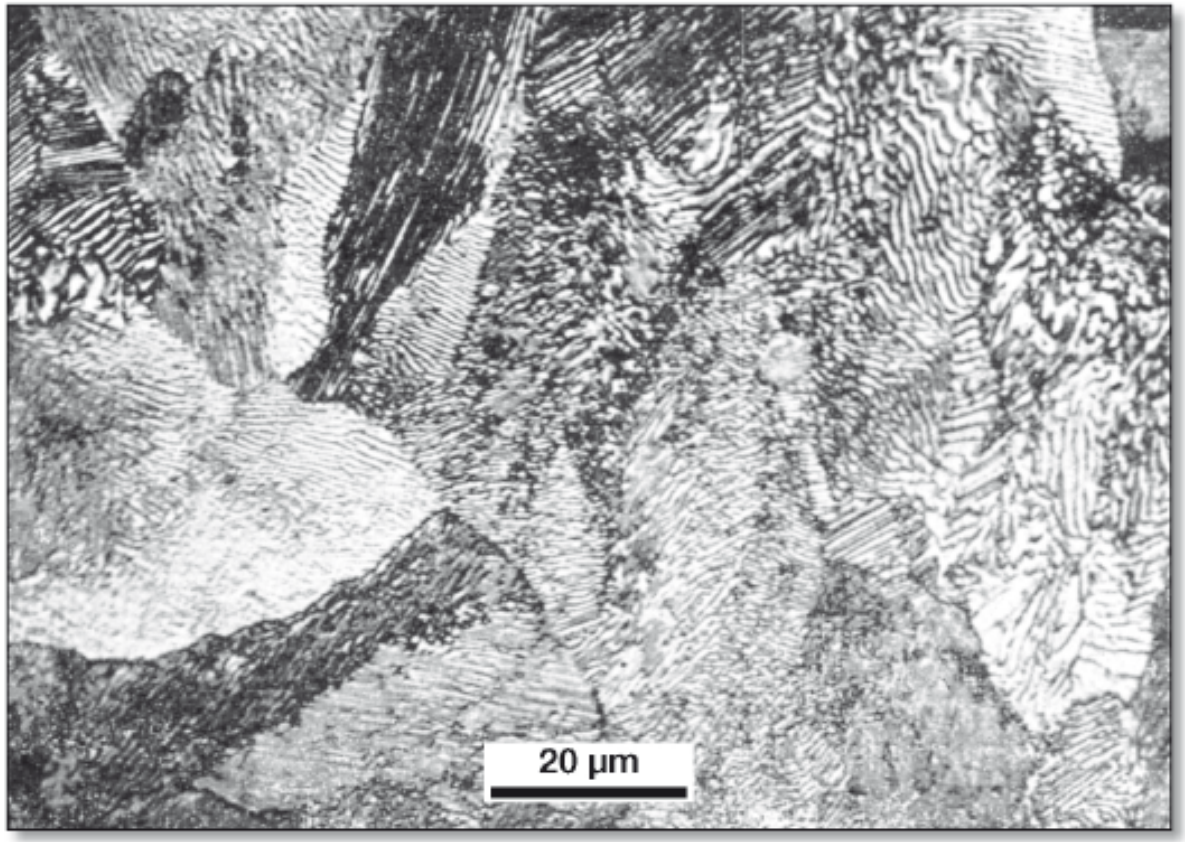



**Figura 7.18**
Aço eutectóide. Colônias de perlita. Algumas áreas que aparecem pouco definidas podem ter seu caráter lamelar mais facilmente observado girando o corpo-de-prova de 90°. Ataque: Nital.

*(Colpaert)*

# FASES E CONSTITUINTES

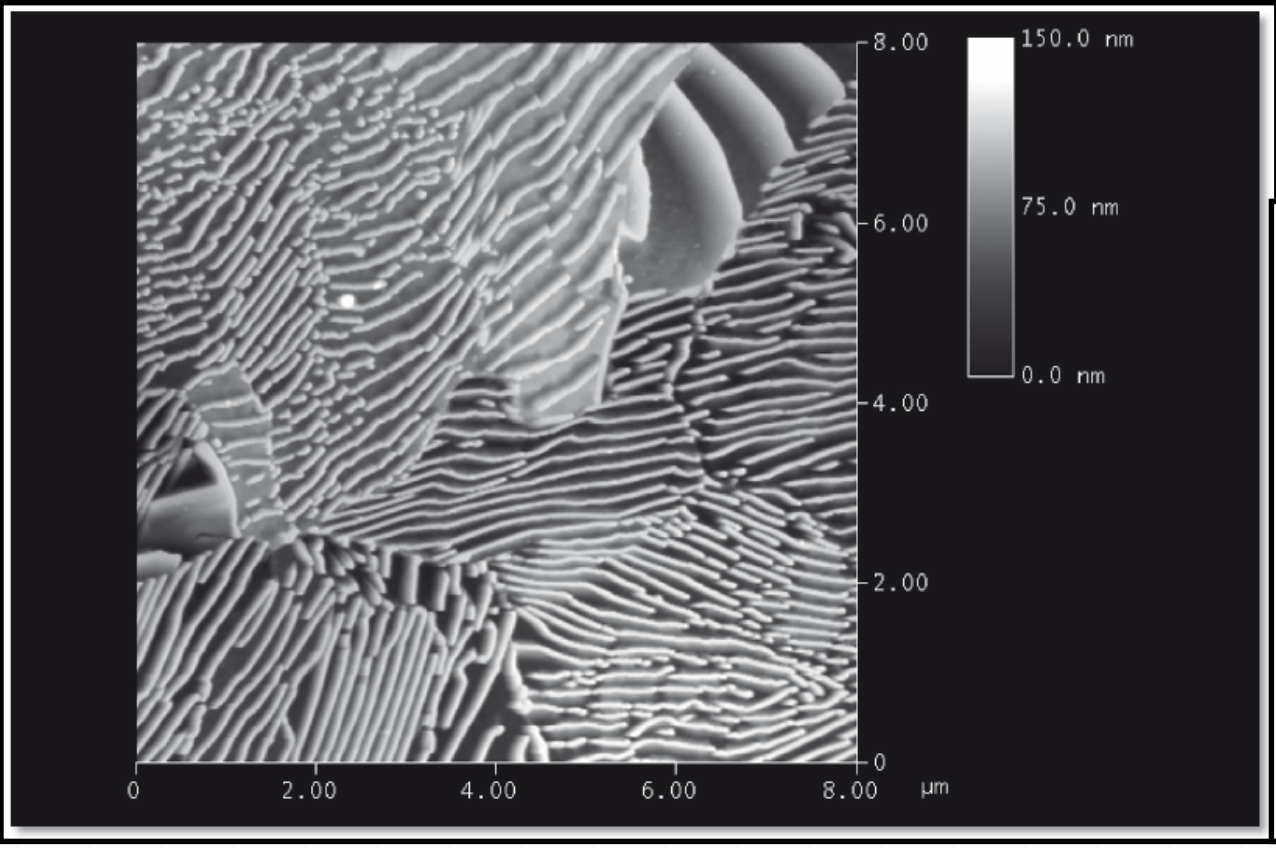
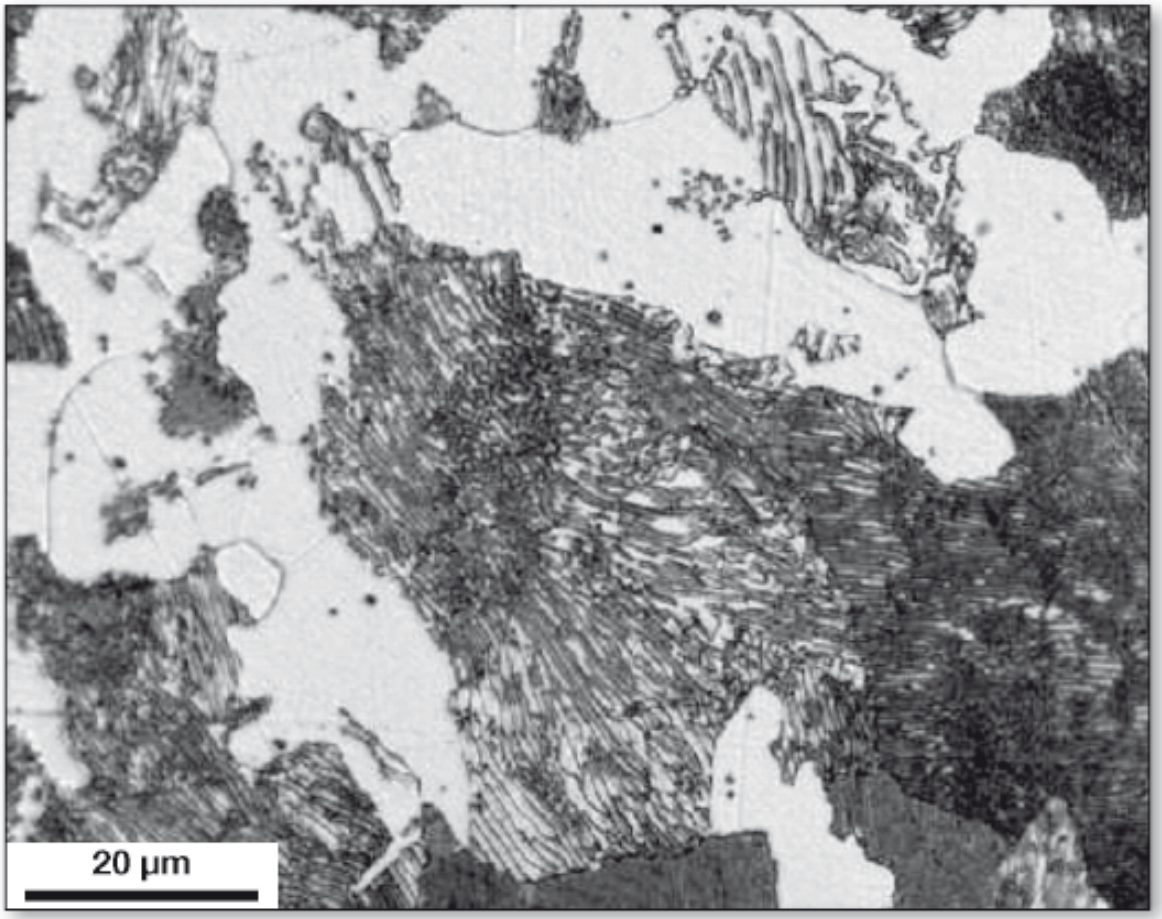



**Figura 7.14**
Perlita em aço eutectóide. A cementita apresenta-se em relevo, mais alta do que a ferrita devido ao ataque químico. Em função dos diferentes ângulos entre os planos das lamelas das diversas colônias de perlita e o plano da micrografia, o espaçamento entre lamelas observado na micrografia é bastante variável (no canto superior direito observam-se lamelas quase paralelas ao plano da micrografia, por exemplo). Imagem de Microscopia de Força Atômica. A escala à direita, acima, refere-se as dimensões verticais da amostra. Ataque: Nital 2%. Cortesia M. S. Andrade, CETEC-MG, Brasil.

*(Colpaert)*

# FASES E CONSTITUINTES

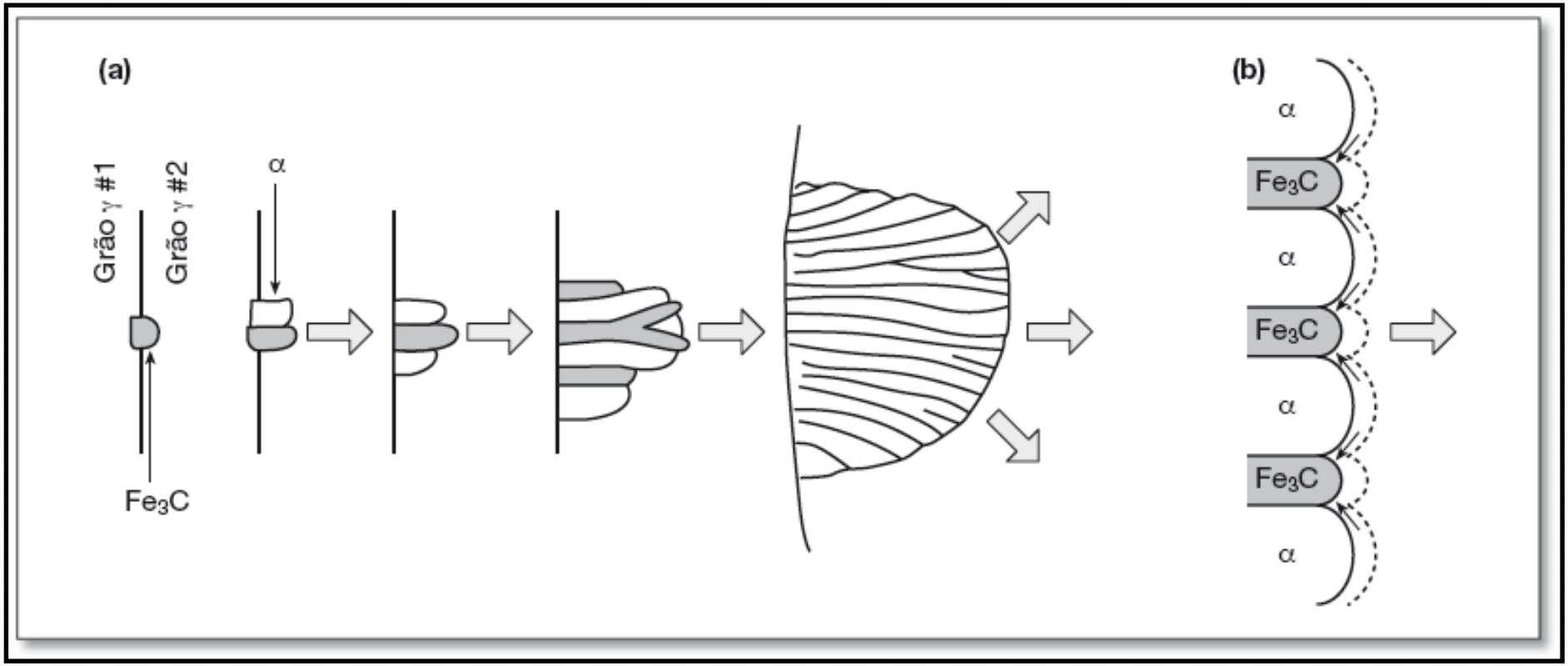
**Figura 7.28**
Seção transversal de fio-máquina de aço AISI 1045 recozido. Ferrita e perlita. Ataque: Nital 2%. Cortesia ArcelorMittal Aços Longos, Juiz de Fora, MG, Brasil.




*(Colpaert)*

# FASES E CONSTITUINTES

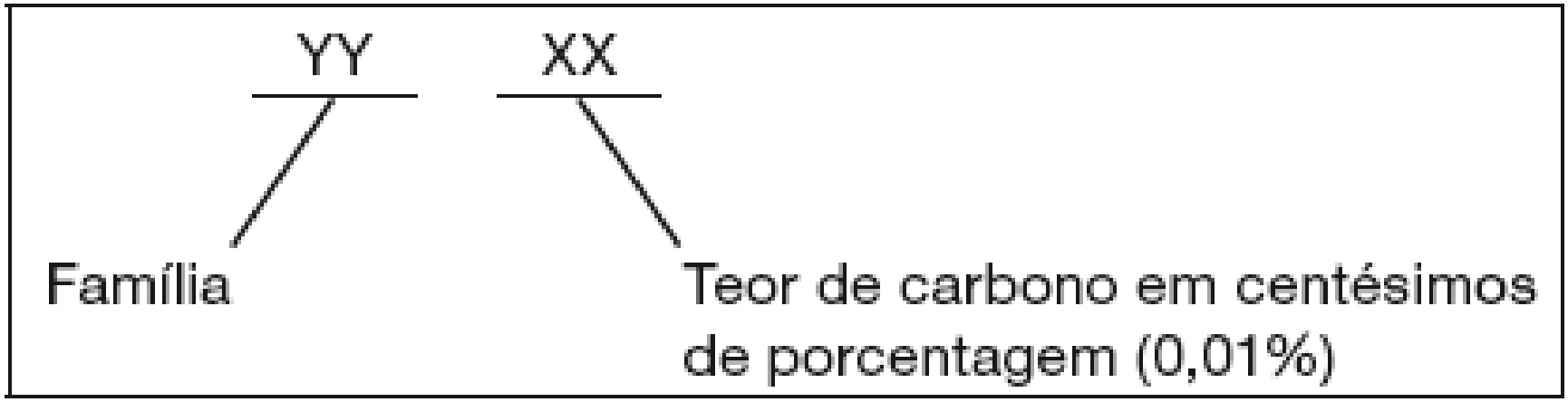
*(Colpaert)*




**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.**

# CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

# CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS




*(Colpaert)*

# CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

**COMPOSIÇÃO QUÍMICA:**
- **NORMA ABNT NM87**
- **NORMA SAE J 403 E J 404**

**COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DUREZA:**
- **NORMA SAE J 1268**

**ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES MECÂNICAS:**
- **NORMA SAE J 1397**

**NORMAS ASTM E DIN:**
**COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES MECÂNICAS**

**CÓDIGO ASME: PETROQUÍMICA-SOLDAGEM-MATERIAIS-ENSAIOS**

**Tabela 10.1**
Principais famílias de aços conforme a classificação ABNT (similar a AISI e SAE)

| | | |
|---|---|---|
| Aços carbono | 10xx | Aço carbono |
| | 11xx | Aço carbono ressulfurado (corte fácil) |
| | 12xx | Aço carbono ressulfurado e refosforado (corte fácil) |
| Aços de baixa liga (construção mecânica) | 13xx | Mn 1,75% |
| | 23xx | Ni 3,5% |
| | 25xx | Ni 5,0% |
| | 31xx | Ni 1,25%, Cr 0,65% |
| | 33xx | Ni 3,50%, Cr 1,55% |
| | 40xx | Mo 0,25% |
| | 41xx | Cr 0,50% ou 0,95%, Mo 1,12% ou 0,20% |
| | 43xx | Ni 1,80%, Cr 0,50% ou 0,80%, Mo 0,25% |
| | 46xx | Ni 1,55% ou 1,80%, Mo 0,20% ou 0,25% |
| | 47xx | Ni 1,05%, Cr 0,45%, Mo 0,20% |
| | 48xx | Ni 3,50%, Mo 0,25% |
| | 50xx | Cr 0,80% ou 0,40% |
| | 51xx | Cr 0,80% a 1,05% |
| | 5xxxx | Cr 0,50% ou 1,00% ou 1,45%, C 1,00% |
| | 61xx | Cr 0,80% ou 0,95%, V 0,10% ou 0,15% mínimo |
| | 86xx | Ni 0,55%, Cr 0,50% ou 0,65%, Mo 0,20% |
| | 87xx | Ni 0,55%, Cr 0,50%, Mo 0,25% |
| | 92xx | Mn 0,85%, Si 2,00% |
| | 93xx | Ni 3,25%, Cr 1,20%, Mo 0,12% |
| | 98xx | Ni 1,00%, Cr 0,80%, Mo 0,25% |

# CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

N-034.004.001

ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas

Sede:
Rio de Janeiro
Av. Treze de Maio, 13 - 28º andar
CEP 20003-900 - Caixa Postal 1680
Rio de Janeiro - RJ
Tel.: PABX (021) 210-3122
Fax: (021) 220-1762/220-6436
Endereço Telegráfico:
NORMATÉCNICA

Copyright © 2000,
ABNT–Associação Brasileira
de Normas Técnicas
Printed in Brazil/
Impresso no Brasil
Todos os direitos reservados

OUT 2000 | **NBR NM 87**

## Aço carbono e ligados para construção mecânica - Designação e composição química

Origem: NM 87:1996
ABNT/CB-28 - Comitê Brasileiro de Siderurgia
NBR NM 87 - Carbon steel and alloy steel for general engineering purpose - Designation and chemical composition
Descriptors: Steel. Chemical composition
Esta Norma cancela e substitui a NBR 6006:1994
Válida a partir de 30.11.2000

Palavras-chave: Aço. Composição | 19 páginas

# CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

**COMPOSIÇÃO QUÍMICA:**

- **NORMA ABNT NM87**

| Designación COPANT del acero/ *Designação COPANT do aço* | Composición química de colada (%) (1) / *Composição química de corrida (%) (1)* | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Carbono (C) | Manganeso/ *Manganês* (Mn) | Silicio (Si) | Níquel (Ni) | Cromo (Cr) | Molibdeno/ *Molibdênio* (Mo) | Vanadio/ *Vanádio* (V) |
| *1330* | 0,28-0,33 | 1,60-1,90 | 0,15-0,35 | - | - | - | - |
| *1345* | 0,43-0,48 | 1,60-1,90 | 0,15-0,35 | - | - | - | - |
| 3015 | 0,12-0,17 | 0,40-0,60 | 0,15-0,40 | 1,40-1,70 | 1,40-1,70 | - | - |
| *3115* | 0,13-0,18 | 0,40-0,50 | 0,15-0,35 | 1,10-1,40 | 0,55-0,75 | - | - |
| 3519 | 0,15-0,20 | 0,40-0,60 | 0,15-0,40 | 1,80-2,10 | 1,80-2,10 | - | - |
| 4015 | 0,12-0,20 | 0,40-0,80 | 0,10-0,35 | - | - | 0,25-0,35 | - |
| 4113 | 0,10-0,18 | 0,40-0,70 | 0,10-0,35 | - | 0,70-1,10 | 0,45-0,65 | - |
| 4117 | 0,15-0,22 | 0,60-0,90 | 0,10-0,40 | - | 0,85-1-15 | 0,10-0,40 | - |
| *4118* | 0,18-0,23 | 0,70-0,90 | 0,15-0,35 | - | 0,40-0,60 | 0,08-0,15 | - |
| 4120 | 0,17-0,22 | 0,60-0,90 | 0,15-0,40 | - | 0,30-0,50 | 0,40-0,50 | - |
| 4122 | 0,17-0,22 | 0,70-1,00 | 0,15-0,40 | - | 0,30-0,60 | 0,40-0,50 | - |
| 4125 | 0,23-0,28 | 0,70-0,90 | 0,15-0,35 | - | 0,40-0,60 | 0,20-0,30 | - |
| 4126 | 0,22-0,29 | 0,60-0,90 | 0,15-0,40 | - | 0,90-1,20 | 0,15-0,30 | - |
| 4127 | 0,23-0,29 | 0,60-0,90 | 0,15-0,40 | - | 0,40-0,60 | 0,40-0,50 | - |
| *4130* | 0,28-0,33 | 0,40-0,60 | 0,15-0,35 | - | 0,80-1,10 | 0,15-0,25 | - |
| 4133[A] | 0,29-0,35 | 0,60-0,85 | 0,15-0,35 | - | 0,90-1,20 | 0,15-0,30 | - |
| *4135* | 0,33-0,38 | 0,70-0,90 | 0,15-0,35 | - | 0,80-1,10 | 0,15,0,25 | - |
| 4136 | 0,30-0,37 | 0,60-0,90 | 0,15-0,40 | - | 0,90-1,20 | 0,15-0,30 | - |
| 4137 | 0,35-0,40 | 0,70-0,90 | 0,15-0,35 | - | 0,80-1,10 | 0,15-0,25 | - |
| *4140* | 0,38-0,43 | 0,75,1,00 | 0,15-0,35 | - | 0,80-1,10 | 0,15,0,25 | - |
| 4141 | 0,38-0,45 | 0,60-0,90 | 0,15-0,40 | - | 0,90-1,20 | 0,15-0,30 | - |
| *4142* | 0,40-0,45 | 0,75,1,00 | 0,15-0,35 | - | 0,80-1,10 | 0,15-0,25 | - |
| 4145 | 0,43-0,48 | 0,75,1,00 | 0,15-0,30 | - | 0,80-1,10 | 0,15,0,25 | - |
| *4150* | 0,48-0,53 | 0,75,1,00 | 0,15-0,35 | - | 0,80-1,10 | 0,15,0,25 | - |
| 4151 | 0,46-0,54 | 0,50-0,80 | 0,15-0,40 | - | 0,90-1,20 | 0,15-0,30 | - |
| 4161 | 0,56-0,64 | 0,75,1,00 | 0,15-0,35 | - | 0,70-0,90 | 0,25-0,35 | - |
| 4210 | 0,08-0,15 | 0,40-0,70 | 0,50 max. | - | 2,00-2,50 | 0,90-1,20 | - |
| *4320* | 0,17-0,22 | 0,45-0,65 | 0,15-0,35 | 1,65-2,00 | 0,40-0,60 | 0,20-0,30 | - |
| *4340* | 0,38-0,43 | 0,60-0,80 | 0,15-0,35 | 1,65-2,00 | 0,70-0,90 | 0,20-0,30 | - |
| 4517 | 0,15-0,20 | 0,40-0,60 | 0,15-0,40 | 1,40-1,70 | 1,50-1,80 | 0,25-0,35 | - |
| 4534 | 0,30-0,38 | 0,40-0,70 | 0,15-0,40 | 1,40-1,70 | 1,40-1,70 | 0,15-0,30 | - |
| 4620 | 0,17-0,22 | 0,45-0,65 | 0,15-0,35 | 1,65-2,00 | - | 0,20-0,30 | - |
| 4720 | 0,17-0,22 | 0,50-0,70 | 0,15-0,35 | 0,90-1,20 | 0,35-0,55 | 0,15-0,25 | - |
| 4815 | 0,13-0,18 | 0,40-0,60 | 0,15-0,35 | 3,25-3,75 | - | 0,20-0,30 | - |
| 4820 | 0,18-0,23 | 0,50-0,70 | 0,15-0,35 | 3,25-3,75 | - | 0,20-0,30 | - |
| 5016 | 0,12-0,18 | 0,40-0,60 | 0,15-0,40 | - | 0,40-0,70 | - | - |
| 5046 | 0,43-0,48 | 0,75,1,00 | 0,15-0,35 | - | 0,20-0,35 | - | - |
| 5060 | 0,56-0,64 | 0,75,1,00 | 0,15-0,35 | - | 0,40-0,60 | - | - |
| *5115* | 0,13-0,18 | 0,70-0,90 | 0,15-0,35 | - | 0,70-0,90 | - | - |
| *5116* | 0,14-0,19 | 1,00-1,30 | 0,15-0,35 | - | 0,80-1,10 | - | - |
| *5120* | 0,17-0,22 | 0,70-0,90 | 0,15-0,35 | - | 0,70-0,90 | - | - |
| *5121*[B] | 0,17-0,22 | 1,10-1,40 | 0,15-0,35 | - | 1,00-1,30 | - | - |
| *5123*[C] | 0,20-0,25 | 0,60-0,80 | 0,12 max | - | 0,80-1,00 | - | - |
| *5125*[C] | 0,23-0,28 | 0,60-0,80 | 0,12 max | - | 0,80-1,00 | - | - |
| *5130* | 0,28-0,33 | 0,70-0,90 | 0,15-0,35 | - | 0,80-1,10 | - | - |
| *5132* | 0,30-0,35 | 0,60-0,80 | 0,15-0,35 | - | 0,75-1,00 | - | - |

# CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

## COMO INTERPRETAR A NOMENCLATURA DE AÇOS NA NORMA DIN

### AÇOS CARBONO

Podem ser classificados de duas formas: **pelo limite de resistência à tração** ou **pela composição química**.

Pelo **limite de resistência à tração**, utiliza-se o símbolo St (de stahl, que significa aço em alemão), seguido do limite de resistência à tração mínimo.

Ex: **St 42 – aço com limite de resistência à tração mínimo de 42 kgf/mm².**

# CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

Pela **composição química**, emprega-se a letra C seguida do teor de carbono multiplicado por 100.

Ex: **C 45 - aço com teor médio de carbono de 0,45%.** Equivalente ao **SAE/ABNT 1045**

# CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

## AÇOS LIGADOS

No caso de **aços baixa liga**, estes são representados de acordo com o seguinte exemplo:

**Aço DIN 42 Cr Mo 4**, da norma DIN EN 10083-3 ( equivalente ao **SAE4140**) :

- **42** é o teor de **carbono** multiplicado por 100 (ou seja **0,42%**);
- **Cr e Mo** são símbolos dos elementos de liga;
- **4** é o multiplicador do teor do elemento de liga em maior quantidade .

# CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

## 5 - AÇOS GERDAU E EQUIVALÊNCIAS COM NORMAS

### 5.1 - AÇOS CONSTRUÇÃO MECÂNICA

5.1.1 - AÇOS CARBONO NÃO RESSULFURADOS

| QUAL. GERDAU | ABNT/SAE AISI/ASTM | DIN | UNI | JIS | BS | AFNOR |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1010 | 1010 | (C10/C10E/Cq10) | (C10) | (S 10C) | (045A10) | C12 |
| 1015 | 1015 | (C15/C15E/C15R/Cq15) | (C15-C16) | (S 15C) | (080A15) | - |
| 1018 | 1016/1018/1019 | - | - | - | 080A17 | (C20) |
| 1020 | 1020 | (C20/C20E/C20R/Cq22) | (C20) | (S 20C) | (050A20) | (C20) |
| 1022 | 1022 | (C22/C22E/Cq22) | - | (S 22C) | - | - |
| 1030 | 1030 | (C30/C30E/C30R) | (C30/C31) | (S 30C) | 080A30 | (XC32) |
| 1035 | 1035 | (C35/C35E/C35R/ Cq35/Cf35) | (C35/C36) | (S 35C) | 080A35 | (C35) |
| 1040 | 1038/1040 | (C40/C40E/C40R) | (C40/C41) | (S 40C) | 080A40 | (C40) |
| 1541 | 1541 | --- | - | (SMn2H/ SMn 3H) | 080A40 (150M36) | (XC42) |
| 1045 | 1045 | (C45/C45E/C45R/ Cq45/Cf45) | (C45/C46) | (S 45C) | 080A47 | (C45) |
| 1050 | 1050 | (C50/C50E/C50R) | (C50/C51/ | (S 50C) | (080A52) | XC50 |
| 1060 | 1060 | (C60/C60E/C60R) | C53) | (S 58C) | - | - |
| 1084 | 1080/1084 | (C85/85Mn3) | (C60/C61) | - | 080A83 | (X80) |
| NORMAS | - | - | - | G 4051 | 970 part1 | 33-101 |

# CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

## 5.1.3 - AÇOS LIGADOS PARA BENEFICIAMENTO

| QUAL. GERDAU | ABNT/SAE AISI/ASTM | DIN | UNI | JIS | BS | AFNOR |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1330 | 1330 | (30Mn5) | - | (SMn 2H) | (120M36) | - |
| 4037 | 4037 | - | - | - | (605A37) | - |
| 41 Cr 4 | 5140 | 41Cr4 | 41Cr4 | SCr 4H | (530H40) | 42C4 |
| 4130 | 4130 | (30CrMo4) | (30CrMo4) | SCM 3H | (708A30) | (30CD4) |
| 4140 | 4140 | (42CrMo4) | (42CrMo4) | (SCM 4H) | (708M40) | (42CD4) |
| 4142 | 4142 | 41CrMo4 | 41CrMo4 | (SCM 4H) | (708A42) | (42CD4) |
| 4150 | 4150 | (50CrMo4) | - | (SCM 5H) | (708A47) | - |
| 42CrMo4 | (4140) | 42CrMo4 | 42CrMo4 | (SCM 24H) | 708M40 | 42CD4 |
| 4340 | 4340 | (40CrNiMo6) | - | (SNCM 21H) | (817M40) | (35NCD6) |

# NOMENCLATURA QUANTO AO TEOR DE CARBONO

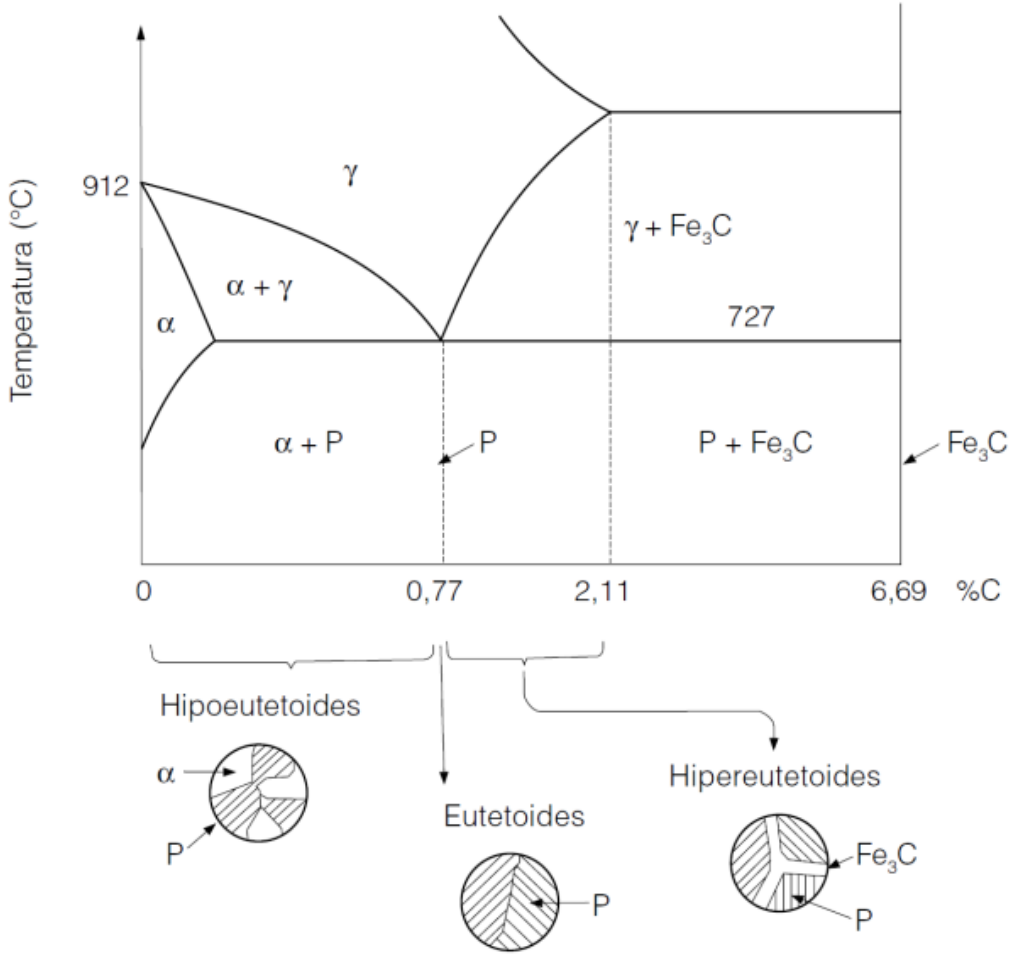
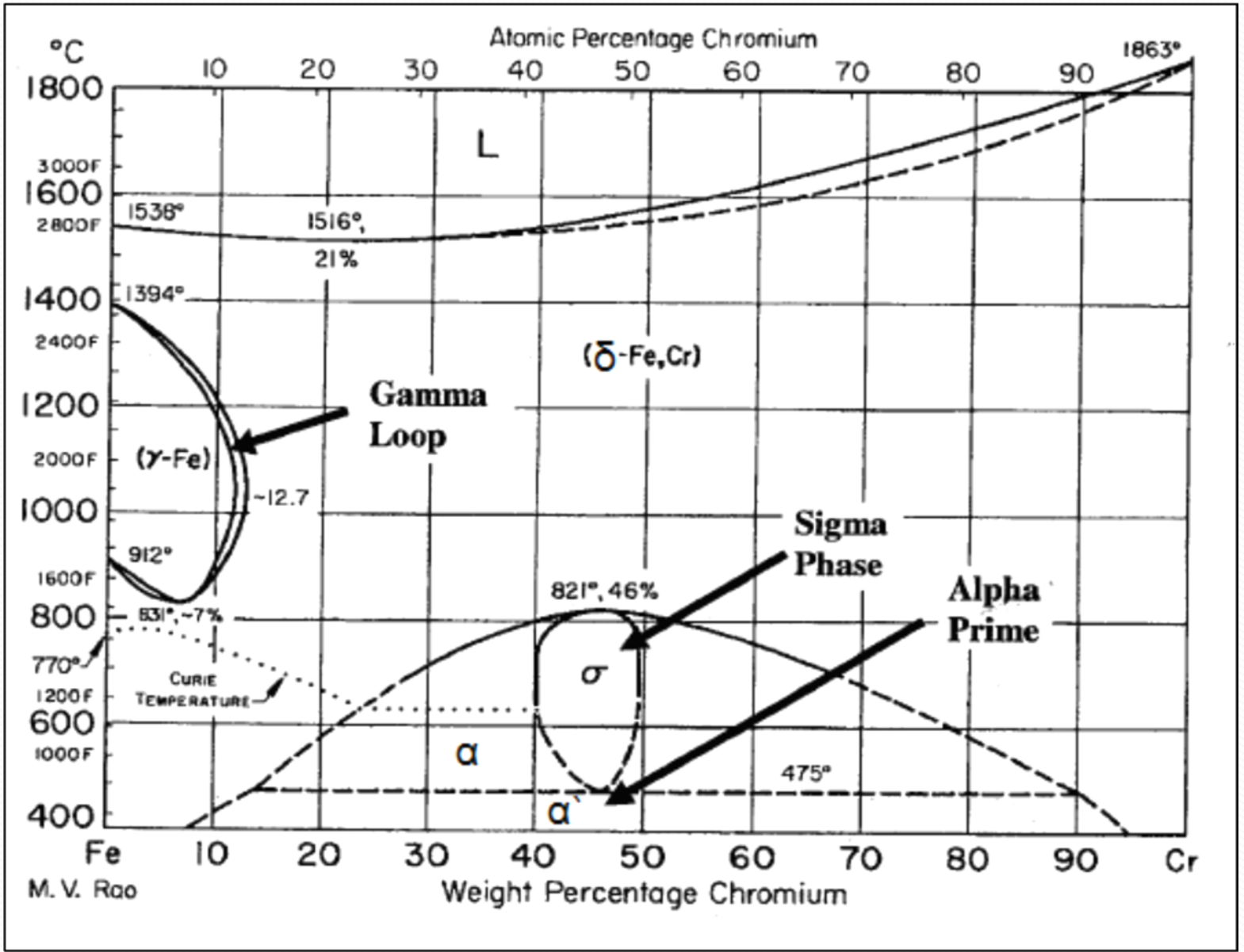


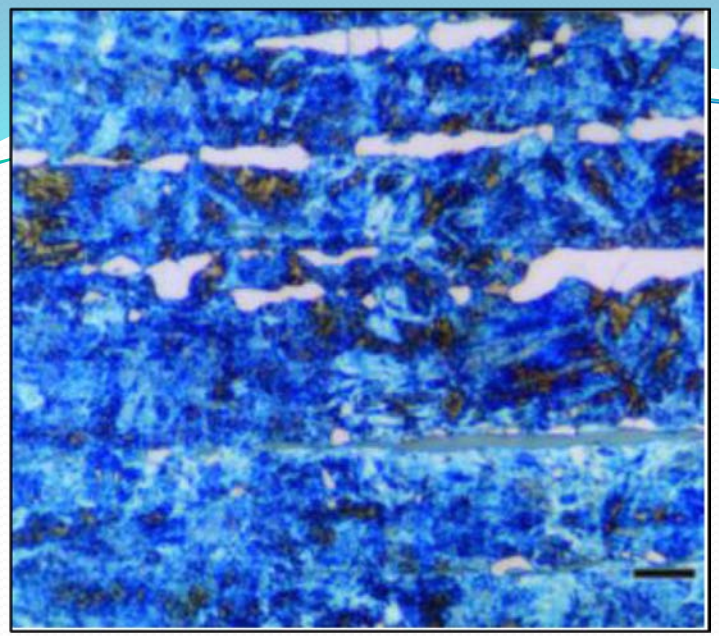

Figura 1.14 Diagrama de "fases" Fe-Perlita.

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

# AÇOS INOXIDÁVEIS

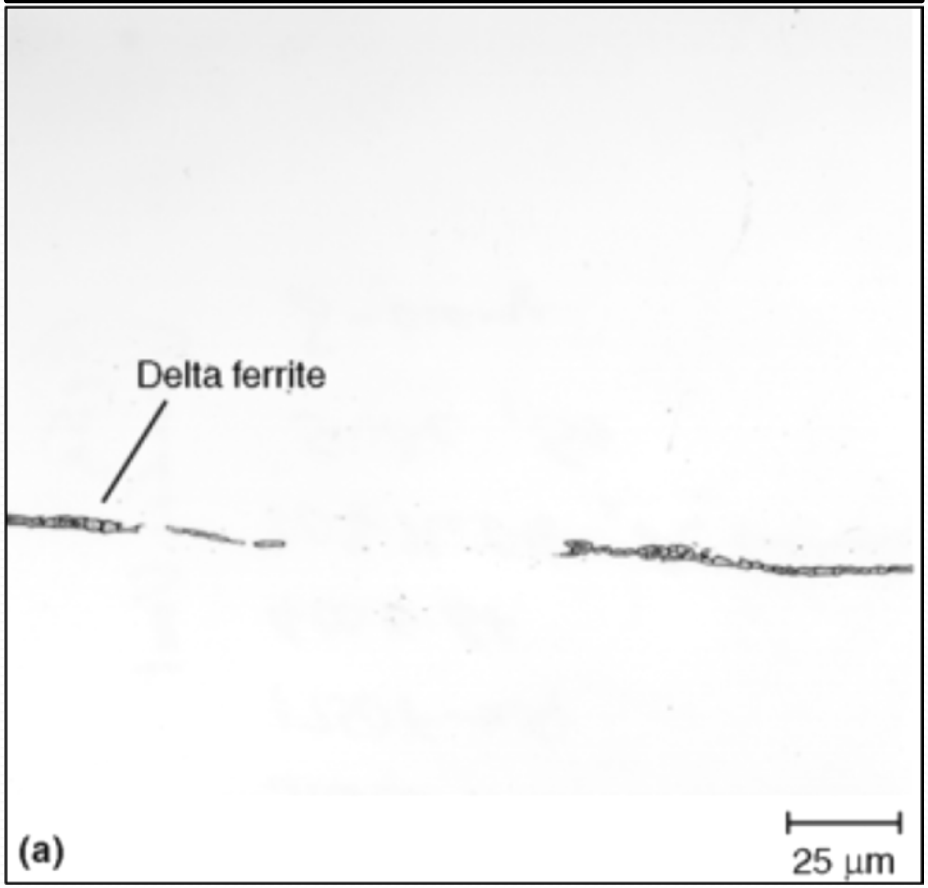
( ADAPTADO: COLPAERT)





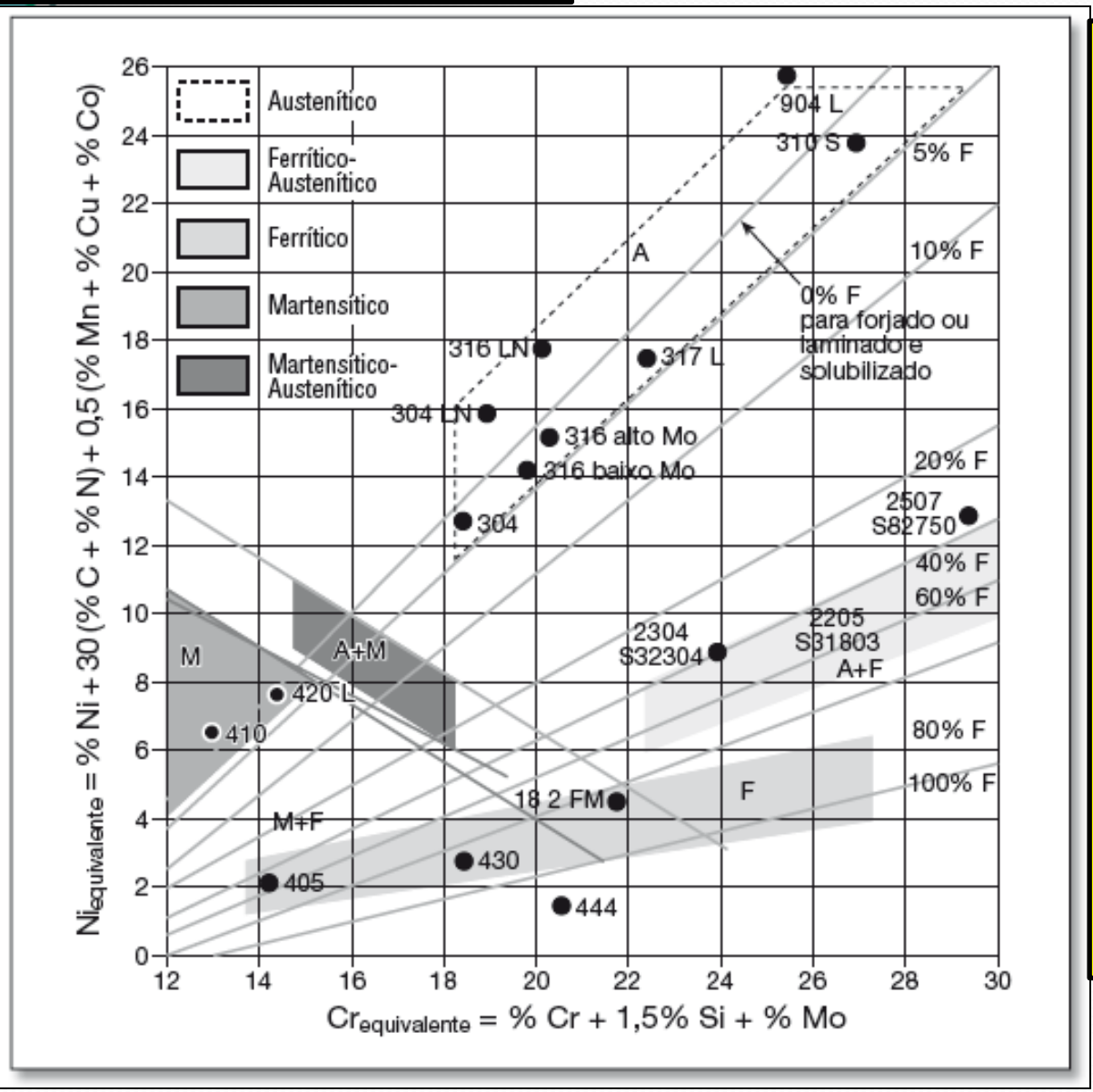
**Ferrita delta –graõs brancos, em aço 416 (Martensítico)- revelados por ataque com reagente de Beraha.**

**Ferrita delta – em aço 316L(austenítico)- revelados por ataque com solução aquosa de NaOH 20%.**



# AÇOS INOXIDÁVEIS

( ADAPTADO: COLPAERT)




**ÁÇOS INOXIDÁVEIS:**
**ALTO Cr>12%**
**CARBONO ABAIXO DE 0,10%.**

**AUSTENÍTICOS: SÉRI 300 – Cr (16- 30%) E Ni (8-35%) EX: 316, 304.**

**MARTENSÍTICOS:**
**SÉRIE 400- Cr(11-18%) EX: 410, 420.**

**DUPLEX: Cr(18-27%), Ni(4-7%) E Mo(1-4%). EX: 2205.**

# MARTENSÍTICOS

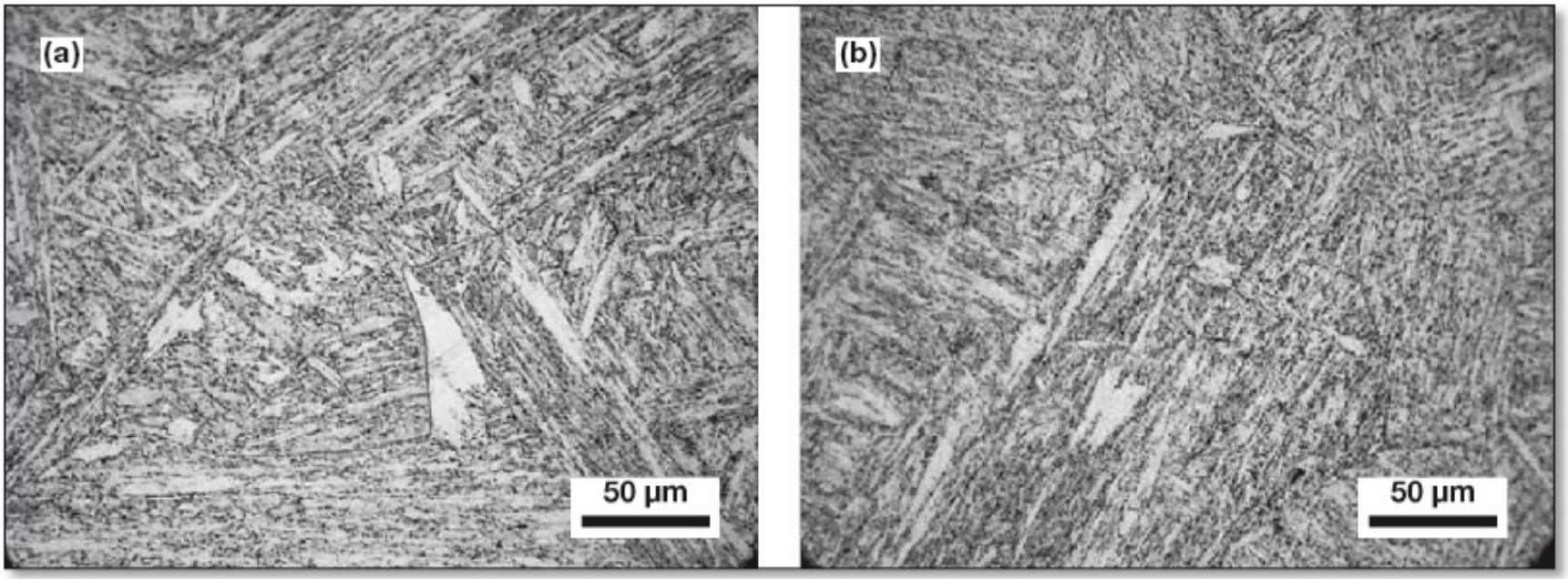



**Figura 16.2(a)**
Aço inoxidável martensítico AISI 410 temperado e revenido. (a) e (b) Martensita revenida. Ataque: Kalling. Cortesia A. Zeemann, Tecmetal, Rio de Janeiro, Brasil.

( ADAPTADO: COLPAERT)

# AUSTENÍTICOS

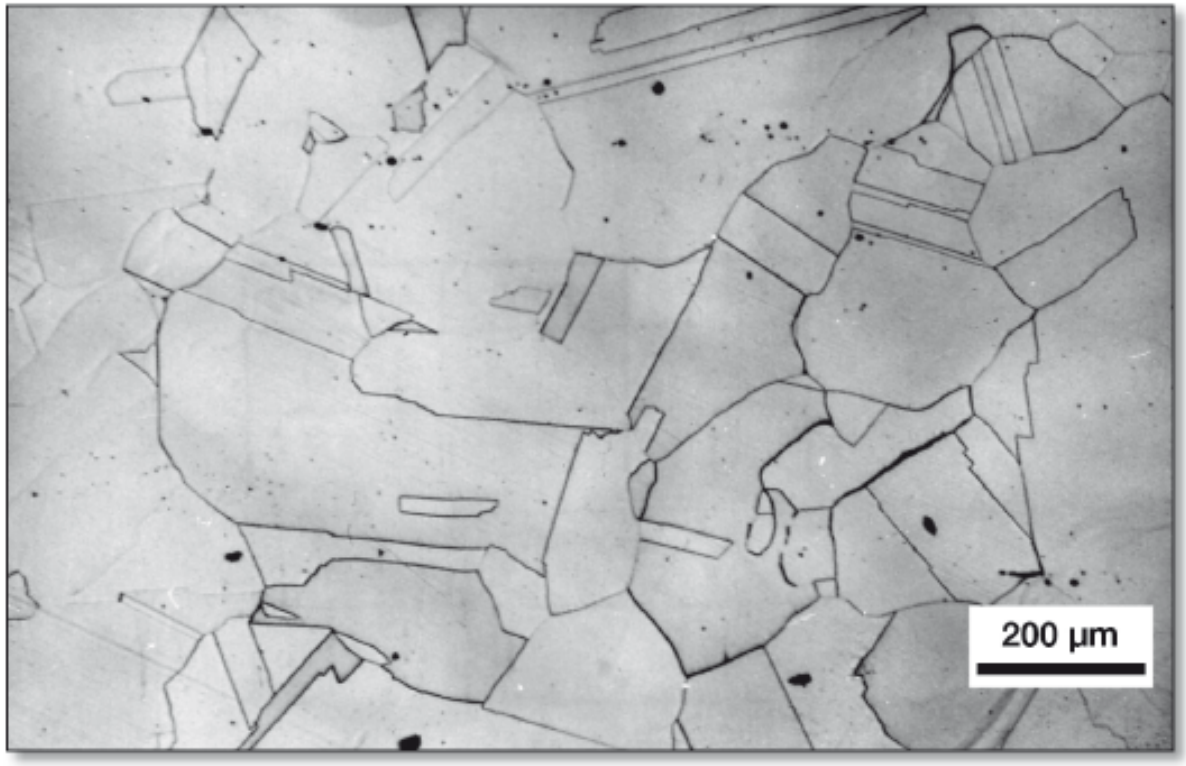
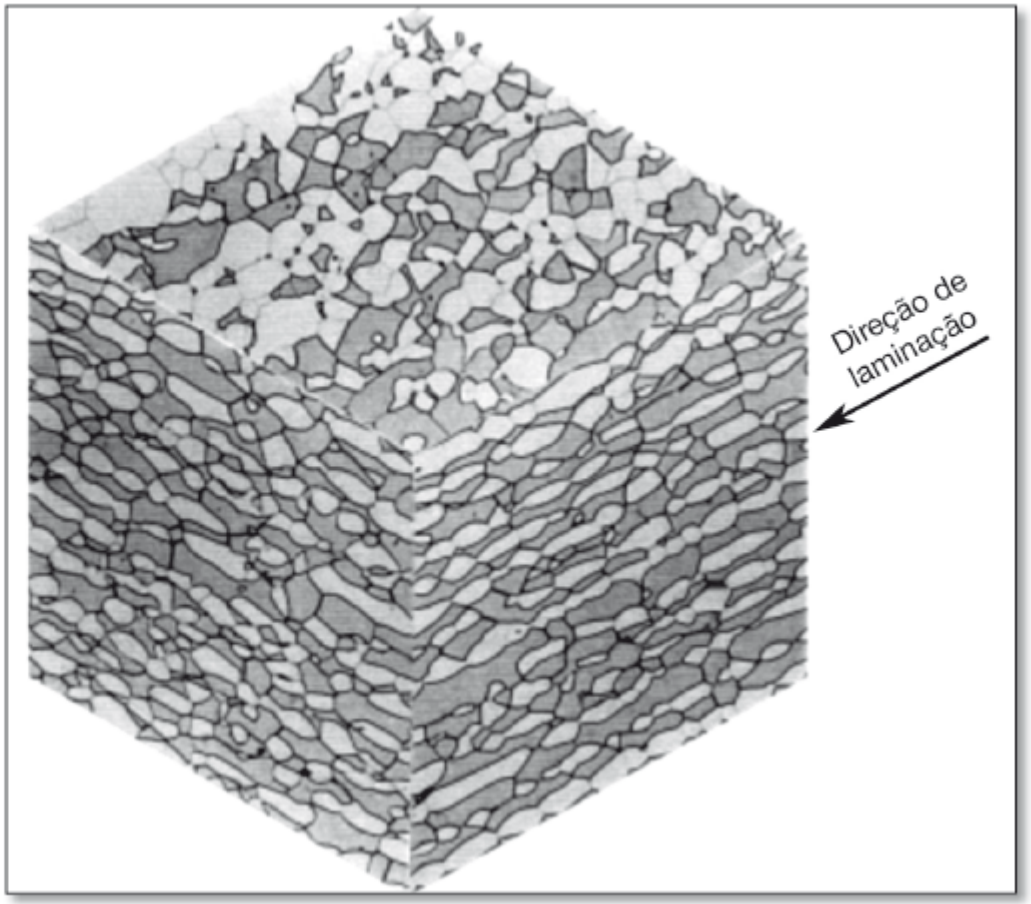



**Figura 16.12**
Aço austenítico W.Nr. 1.4439 forjado e solubilizado. Austenita, tamanho de grão austenítico ASTM 2-4.

( ADAPTADO: COLPAERT)

# DUPLEX

**Figura 16.28**
Microestrutura de chapa do aço inoxidável dúplex UNS S31803 laminada e solubilizada a 1050 °C por 30 minutos. Ferrita (escura) e ilhas de austenita (clara). A conformação se dá no campo bifásico. Ataque eletrolítico com solução 30% (vol) $HNO_3$. Cortesia A Ramirez, LNLS, Campinas, SP, Brasil [23].

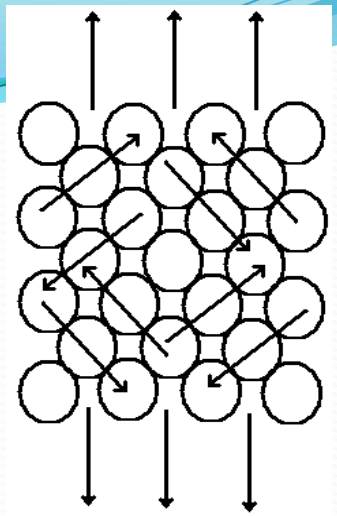



( ADAPTADO: COLPAERT)

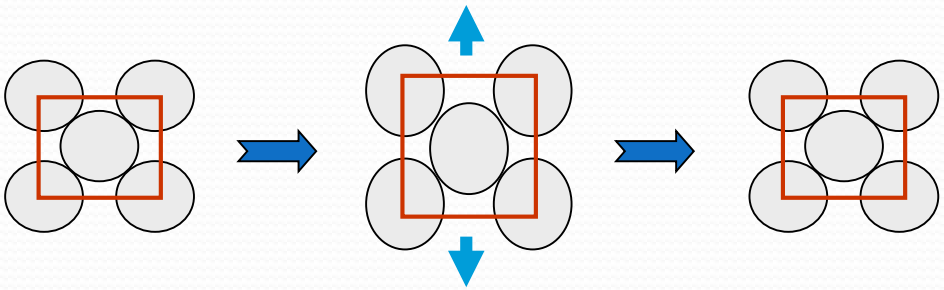
Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de Lorena

Departamento de Engenharia de Materiais



# *Ferros Fundidos*



# FERROS FUNDIDOS

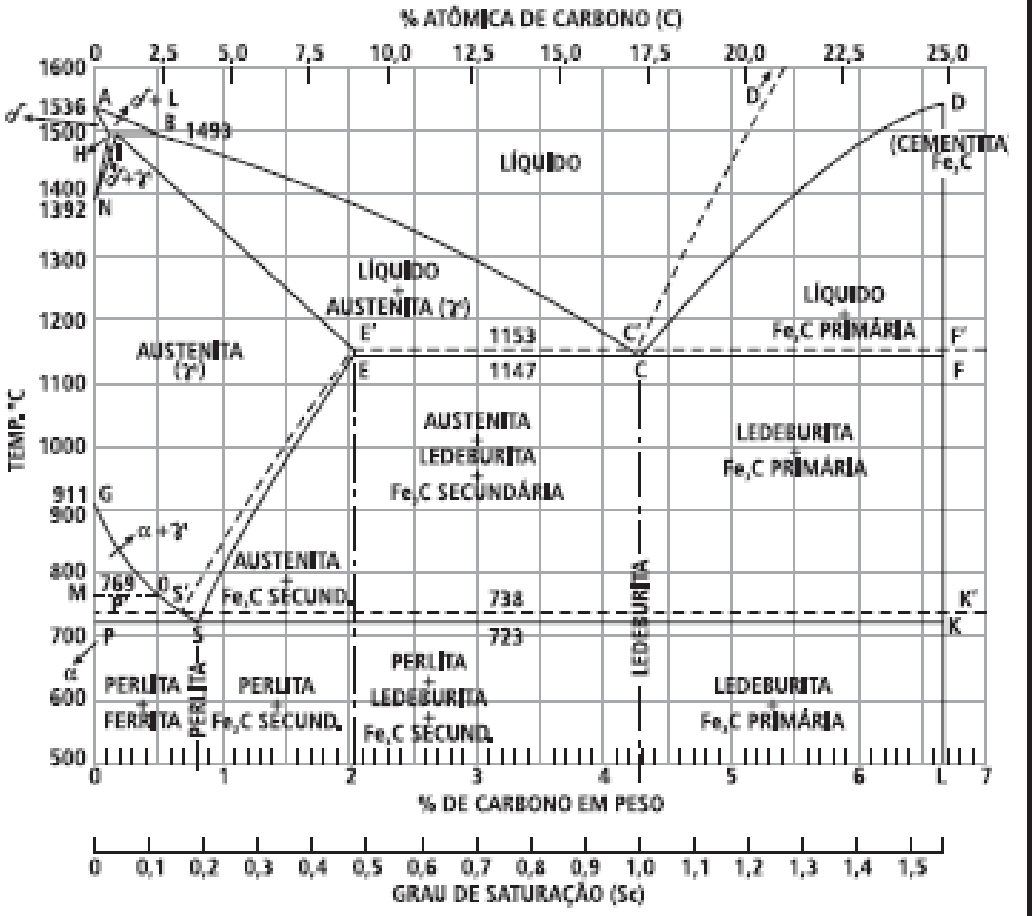



**FIGURA 3.1** – Diagrama de equilíbrio Ferro-Carbono. (Pieske et al., 1976).

# Ferros fundidos

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

- composição torna-os excelentes para fundição

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

# Tipos de ferros fundidos

- O mais importante é o ferro fundido cinzento
- Outros tipos incluem **FF ductil**, **FF branco**, **FF maleável** e vários outros tipos de FF.
- FF ducteis e maleáveis apresentam composição química similar aos FF cinzento e branco, respectivamente, mas resultam de processamento diferenciado.

# Ferros Fundidos - Introdução

Utilizados em geral quando se deseja:

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

# Ferros Fundidos

## Vantagens

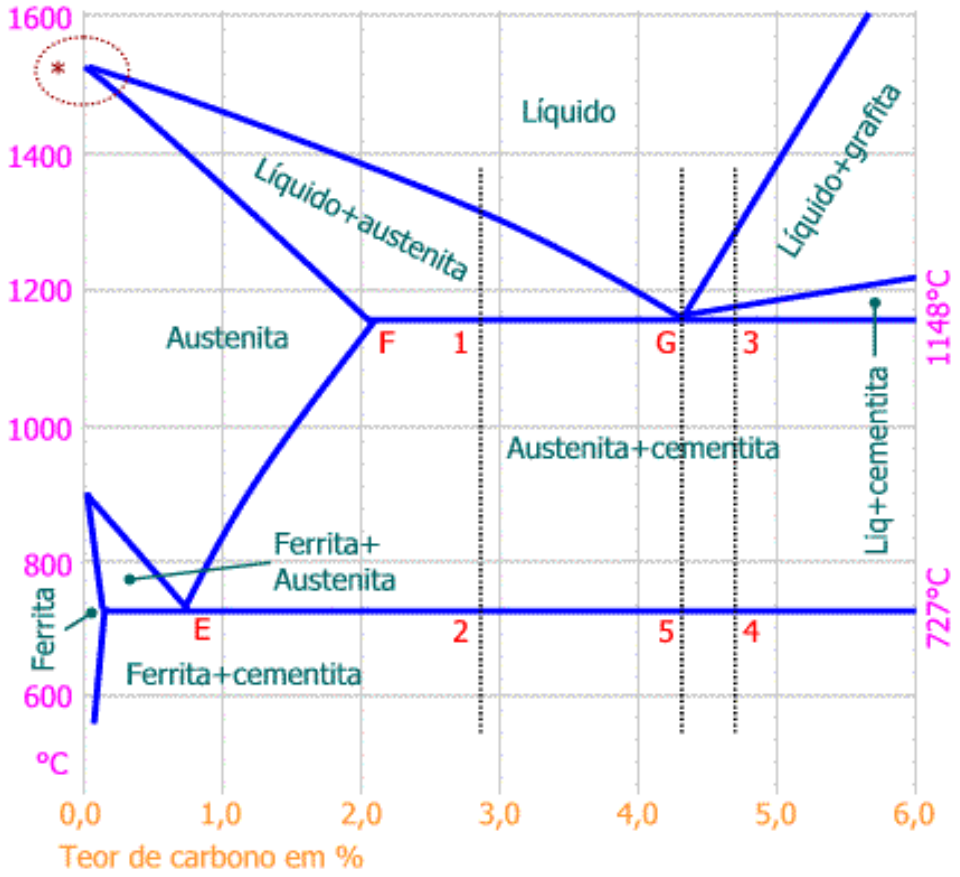
- Baixo ponto de fusão
- Elevada dureza e resistência ao desgaste
- Boa resistência à corrosão
- Baixo custo

## Desvantagens

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

# Ferros Fundidos - Definição

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




De forma similar aos aços, ferros fundidos podem ser hipoeutéticos, eutéticos ou hipereutéticos, com o valor eutético definido pelo ponto de equilíbrio entre a austenita e a cementita (aprox. 4,3%, linha G-5 no diagrama).

# Ferros Fundidos - Diagrama Fe-C

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

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

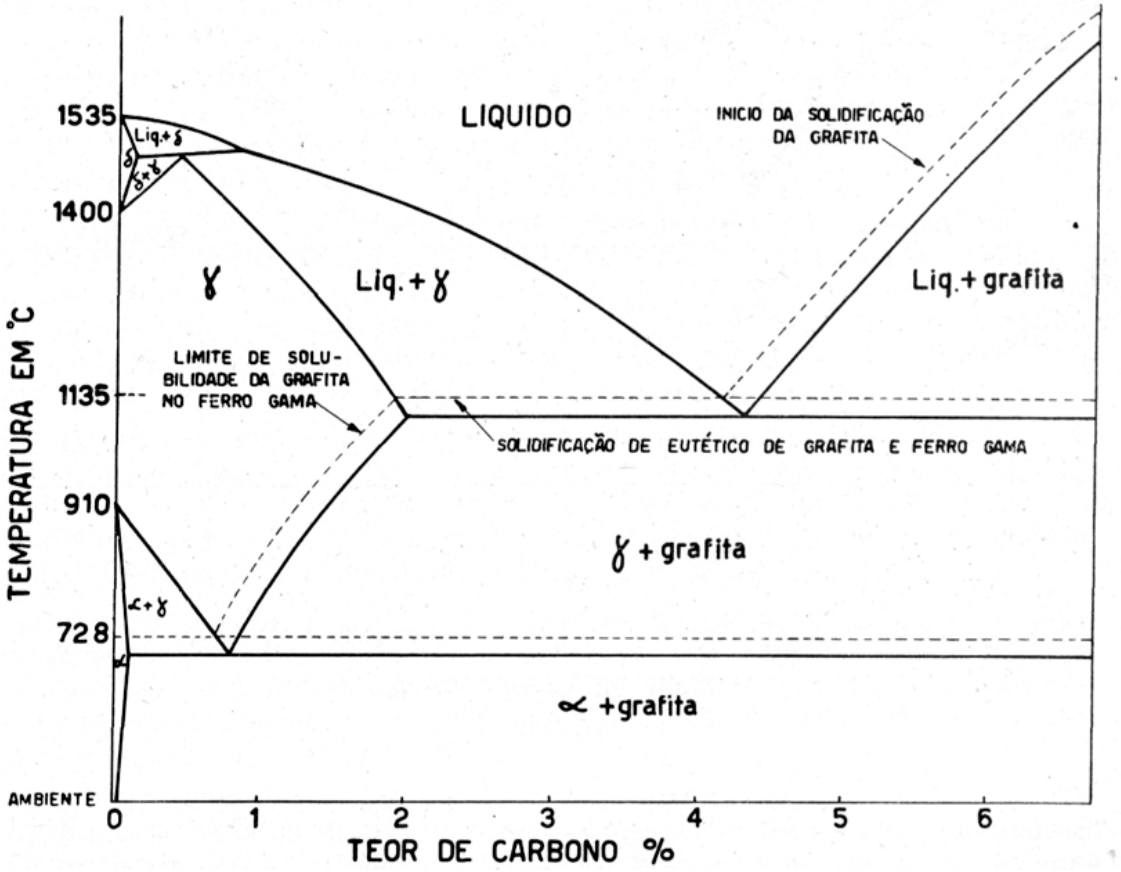



Fig. 521 — Diagrama de equilíbrio ferro-carbono simplificado mostrando em pontilhado o diagrama estável ferro-grafita.

# Ferros Fundidos - Classificação

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

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

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

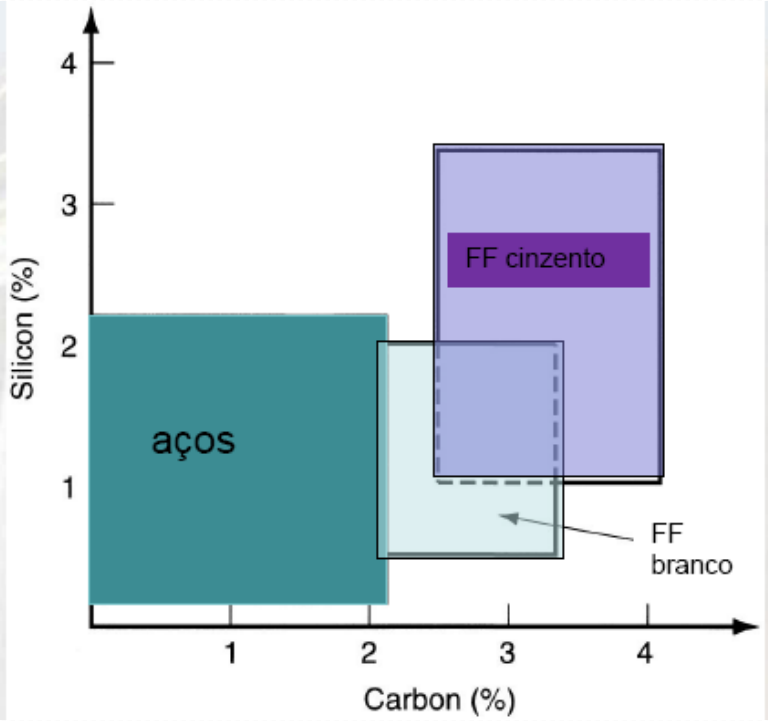
- Branco
- Cinzento
- Maleável
- Dúctil (nodular)

# Ferros Fundidos - Classificação

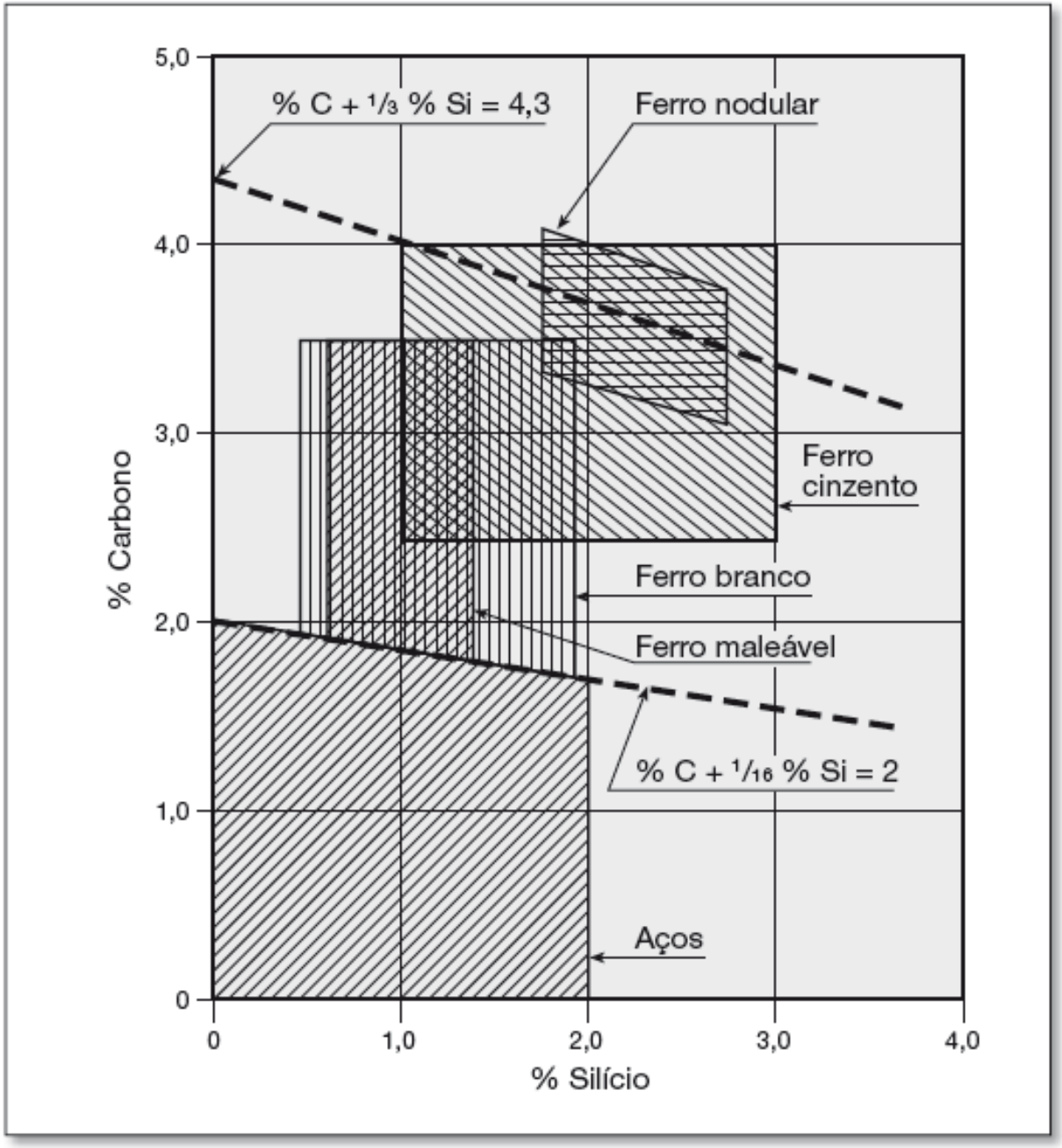
| | C | Si | Mn | S | P |
|---|---|---|---|---|---|
| Cinzento | 2,5-4,0 | 1,0-3,0 | 0,25-1,0 | 0,02-0,25 | 0,05-1,0 |
| Branco | 1,8-3,6 | 0,5-1,9 | 0,25-0,80 | 0,06-0,20 | 0,06-0,18 |
| Maleável | 2,0-2,6 | 1,1-1,6 | 0,20-1,0 | 0,04-0,18 | 0,18 mãx. |
| Dúctil | 3,0-4,0 | 1,8-2,8 | 0,10-1,0 | 0,03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

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

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



# FERROS FUNDIDOS




(ADAPTADO: COLPAERT)

# Ferro Fundido Branco

## MICROESTRUTURA

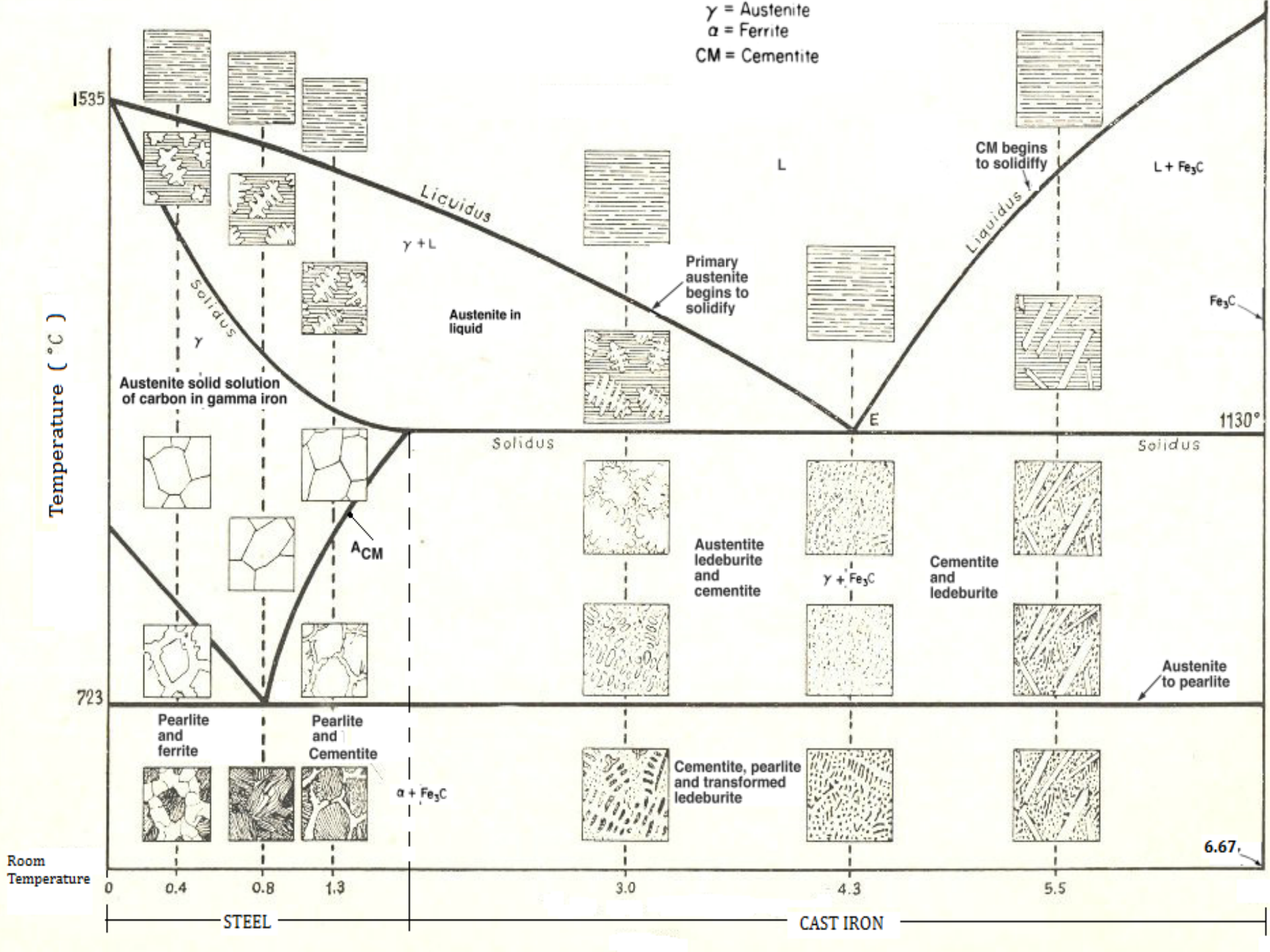
- 2,0≤%C≤3,5; 0,5≤%Si≤2,0; 0,5%Mn (anti-grafitizante)
- Elevada velocidade de arrefecimento => Carb. solidifica sob a forma de cementite
- A elevada dureza e fragilidade da cementite caracterizam este FF
- Em peças de maior tamanho pode obter-se FF branco à superfície e FF cinzento no núcleo

## APLICAÇÕES

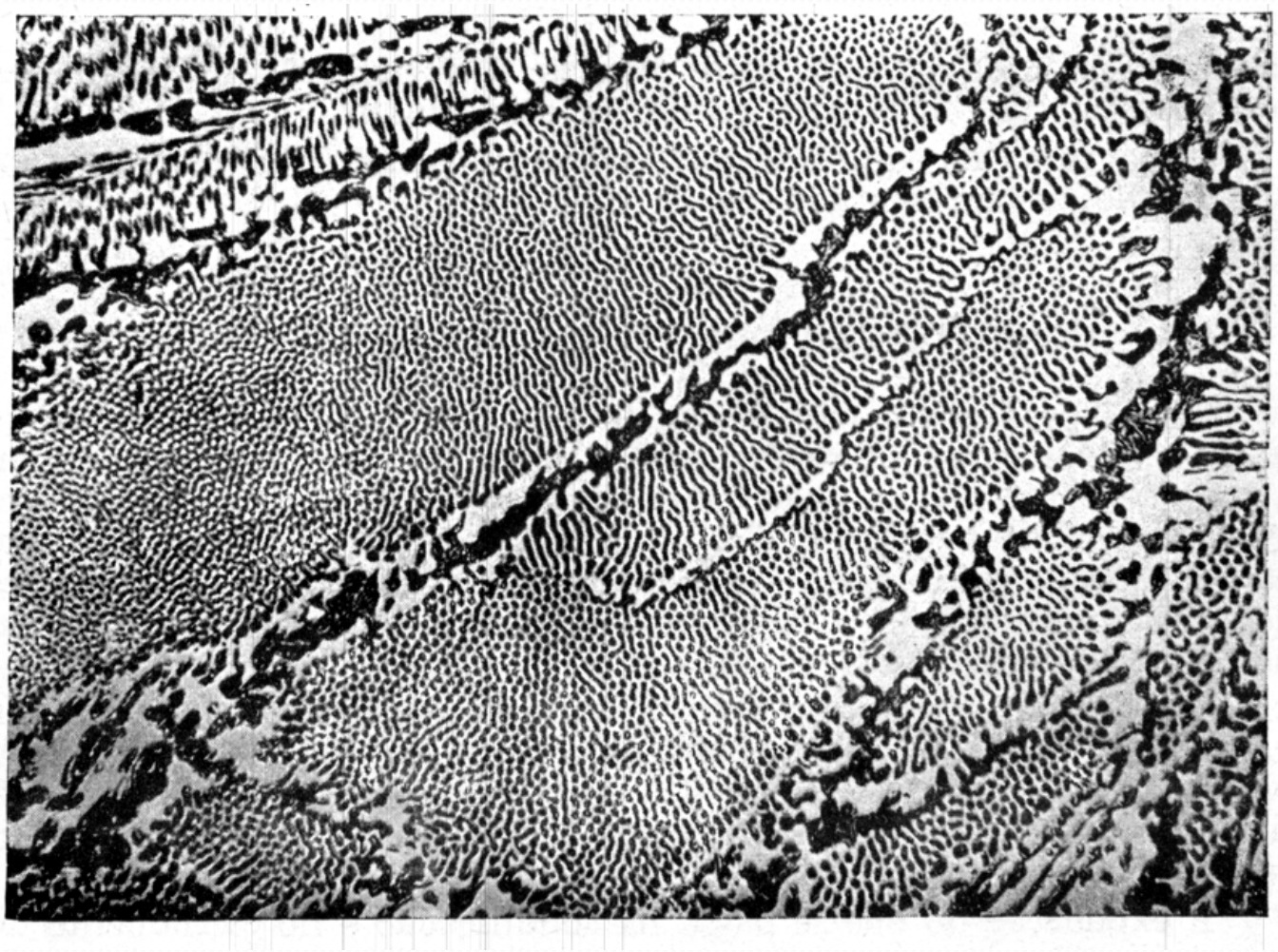
- Principal aplicação é a produção de ferro fundido maleável
- Peças sujeitas a elevada compressão e desgaste
- Elevada taxa de arrefecimento limita o tamanho das peças (esp<100mm)

## PROPRIEDADES

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


γ = Austenite
α = Ferrite
CM = Cementite
1535
Licuidus
γ + L
Solidus
γ
Austenite solid solution of carbon in gamma iron
Austenite in liquid
Primary austenite begins to solidify
L
CM begins to solidiffy
Liquidus
L + Fe3C
Fe3C
E
1130°
Solidus
Solidus
ACM
Austentite ledeburite and cementite
γ + Fe3C
Cementite and ledeburite
723
Austenite to pearlite
Pearlite and ferrite
Pearlite and Cementite
α + Fe3C
Cementite, pearlite and transformed ledeburite
6.67
Temperature ( °C )
Room Temperature
0
0.4
0.8
1.3
3.0
4.3
5.5
STEEL
CAST IRON

# Ferro Fundido Branco eutético



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

# Ferro Fundido Branco hipoeutético

- Considerando agora um ferro fundido branco hipoeutético, por exemplo com 3,0% de C
- Durante seu resfriamento a liga começa a se solidificar formando cristais de austenita. Continuando o resfriamento e atingindo 1130º C, tem-se austenita com 2,0% de C e um líquido com composição eutética
- Abaixo de 1130º C, esse líquido transforma-se no eutético ledeburita
- Abaixo de 727ºC a austenita isolada se transforma em perlita e à temperatura ambiente a microestrutura será : ***cristais de perlita envolvidos por ledeburita***

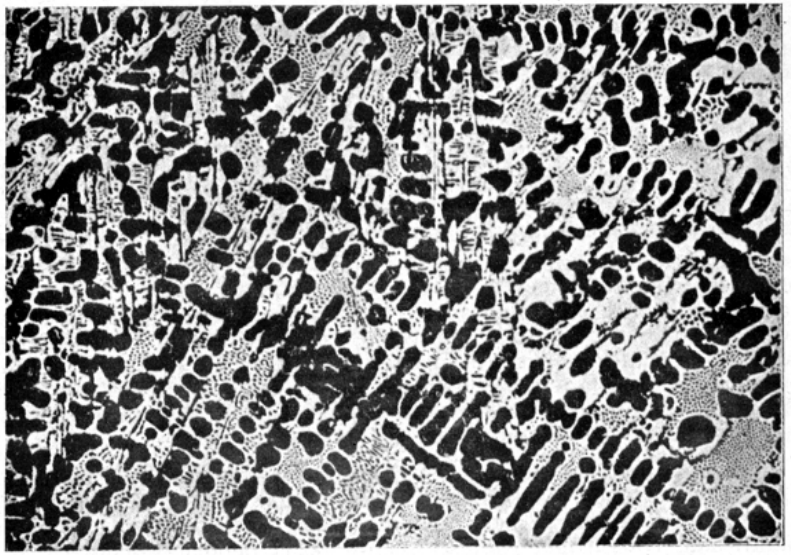


Fig. 523 — Ferro fundido branco hipoeutético. Dendritas de perlita, áreas pontilhadas de ledeburita, áreas brancas de cementita. Ataque: nítrico. 100 x.

# Ferro Fundido Branco hipereutético

- Considerando uma liga hipereutética, por exemplo, 5,5% de C
- Durante seu resfriamento a liga começa a se solidificar formando cristais de cementita. Continuando o resfriamento até 1130º C tem-se cristais alongados de cementita e líquido de composição eutética
- Abaixo de 1130º C esse líquido transforma-se em ledeburita, mas não ocorre nenhuma tranformação com a cementita
- Assim a microestrutura será formada por : ***cristais de cementita sobre um fundo de ledeburita***

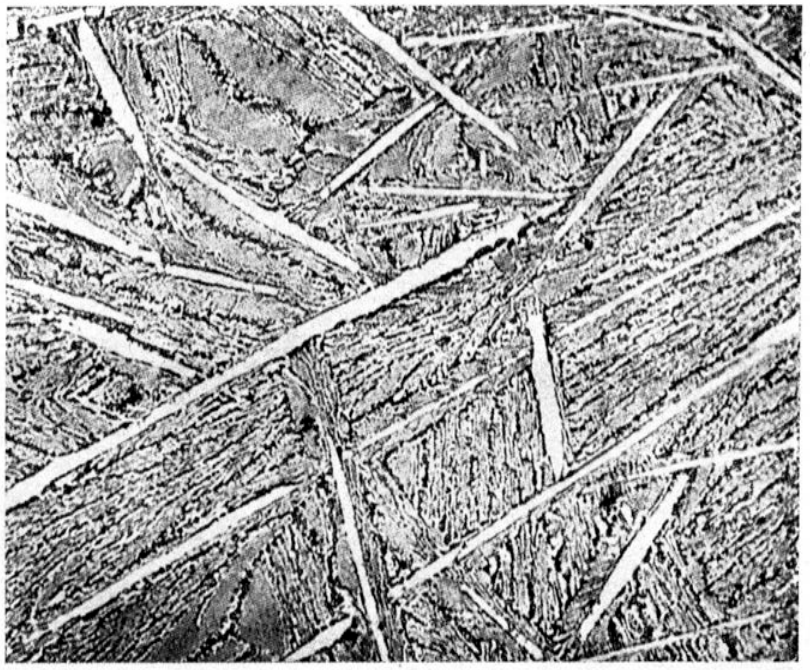


Fig. 528 — Ferro fundido branco hipereutético. Longos cristais de cementita sôbre um fundo de ledeburita. Ataque: pícrico. 150 x.

## MICROESTRUTURA

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

## PROPRIEDADES

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

## APLICAÇÕES

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

*Audi V8 direct-injection diesel engine.*

# Ferro fundido cinzentc

- Nos ferros fundidos cinzentos, o teor de silício está acima de 1%, o que leva a algumas alterações no diagrama Fe-C
- Uma das alterações é o deslocamento do eutético para a esquerda (uma diminuição da porcentagem de carbono do eutético) na proporção de 0,3% de C para cada 1% de silício
- O estudo da liga Fe-C-Si deveria ser apoiado em um diagrama ternário, mas como é muito complexo, utiliza-se o diagrama binário com carbono equivalente

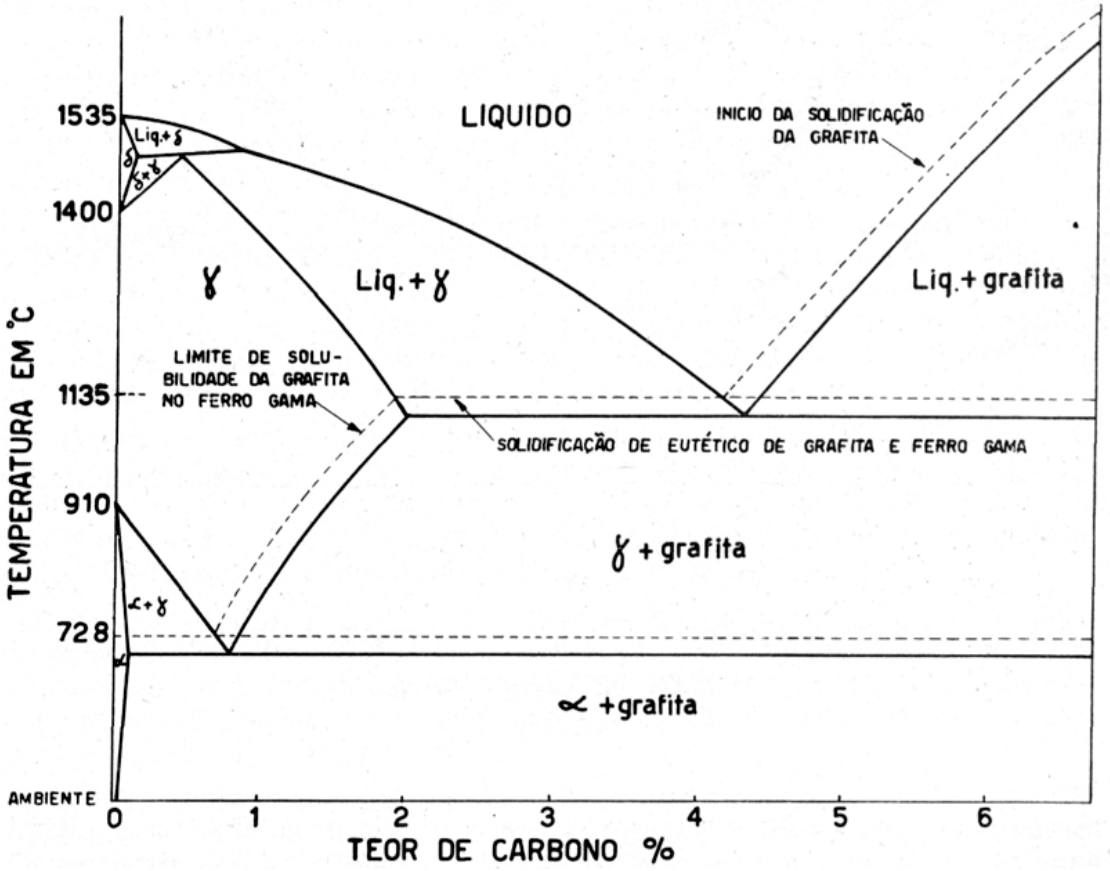
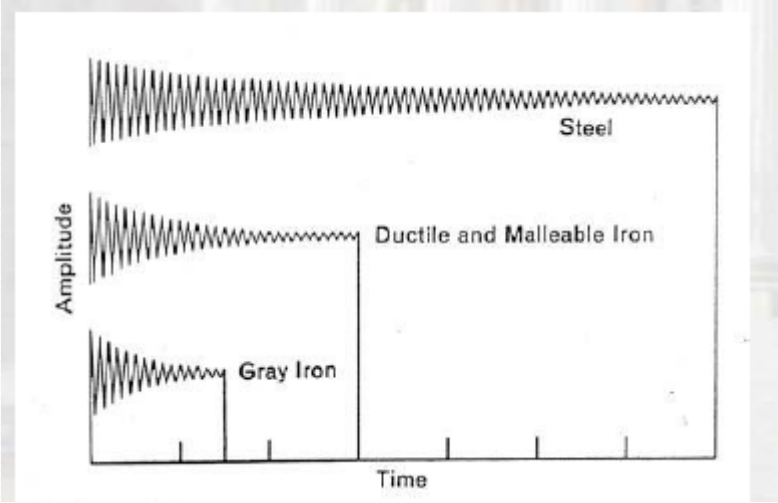



Fig. 521 — Diagrama de equilíbrio ferro-carbono simplificado mostrando em pontilhado o diagrama estável ferro-grafita.

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

## FF cinzento

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



# Ferro fundido cinzento h

• A solidificação de um ferro fundido cinzento hipoeutético inicia-se com a nucleação de dendritas de austenita

• Conforme a temperatura decresce , o crescimento das dendritas de austenita continua, havendo um enriquecimento progressivo de carbono no líquido remanescente. Quando o sistema atinge a temperatura do eutético estável seu carbono equivalente é igual ao do eutético e ocorre uma separação entre austenita e grafita. Cada agregado de austenita e grafita é chamado célula ou grão eutético.

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

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

# Ferro fundido cinzento eutético (fosforo)- steadita

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

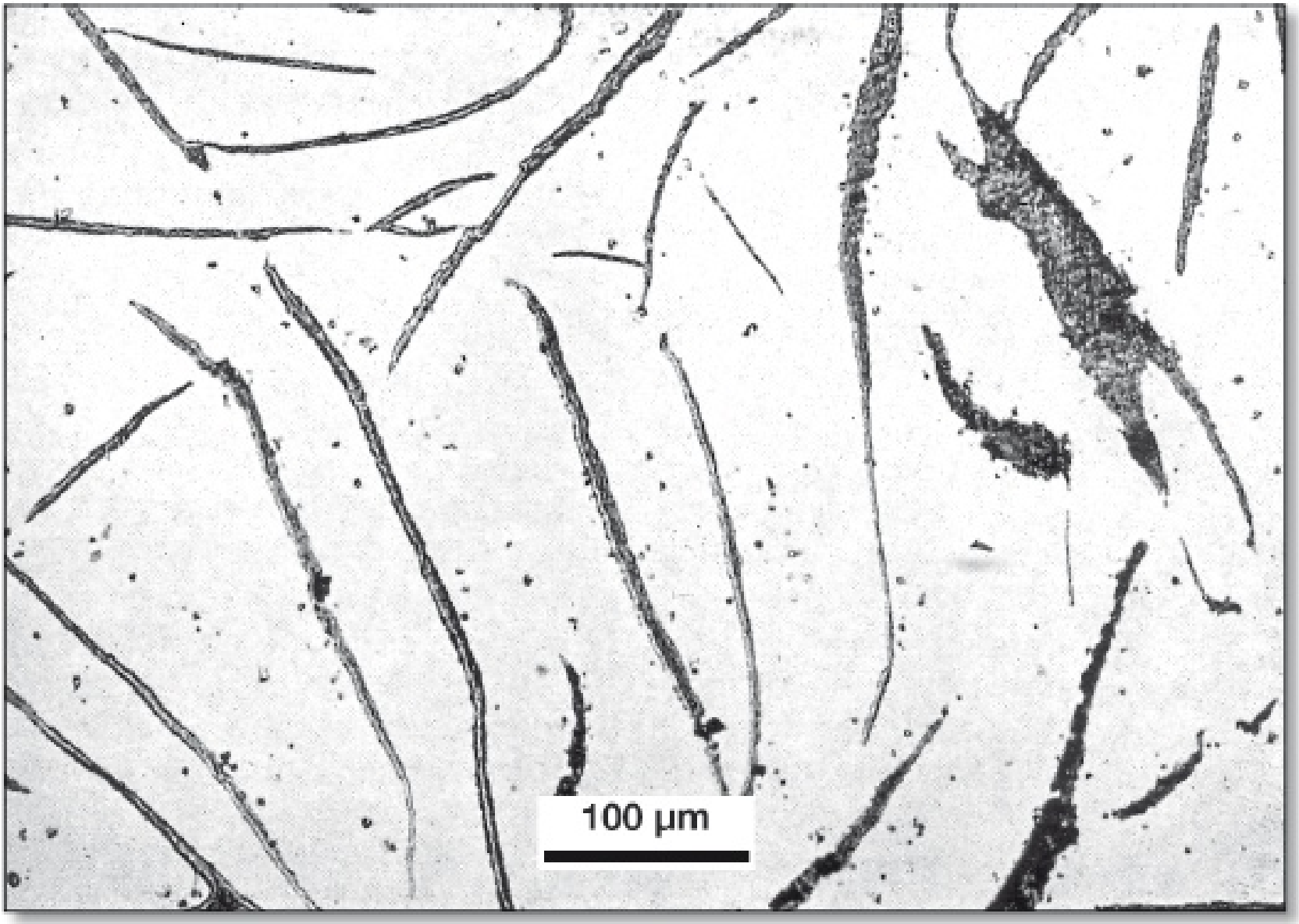
•Durante a solidificação, o fósforo e outras impurezas são segregadas para o líquido que se solidifica no contorno das células eutéticas

# Ferro fundido cinzento hipereutético

• Nos ferros fundidos cinzentos hipereutéticos a primeira fase a precipitar é a grafita hipereutética na forma de lamelas longas, retas e ramificadas.

•O processo de solidificação que se segue é semelhante ao dos hipoeutéticos com formação de células eutéticas.

•A grafita hipereutética pode ser facilmente distinguida com a grafita da transformação eutética por possuir lamelas mais grossas e retilíneas




( ADAPTADO: COLPAERT)

# FERROS FUNDIDOS

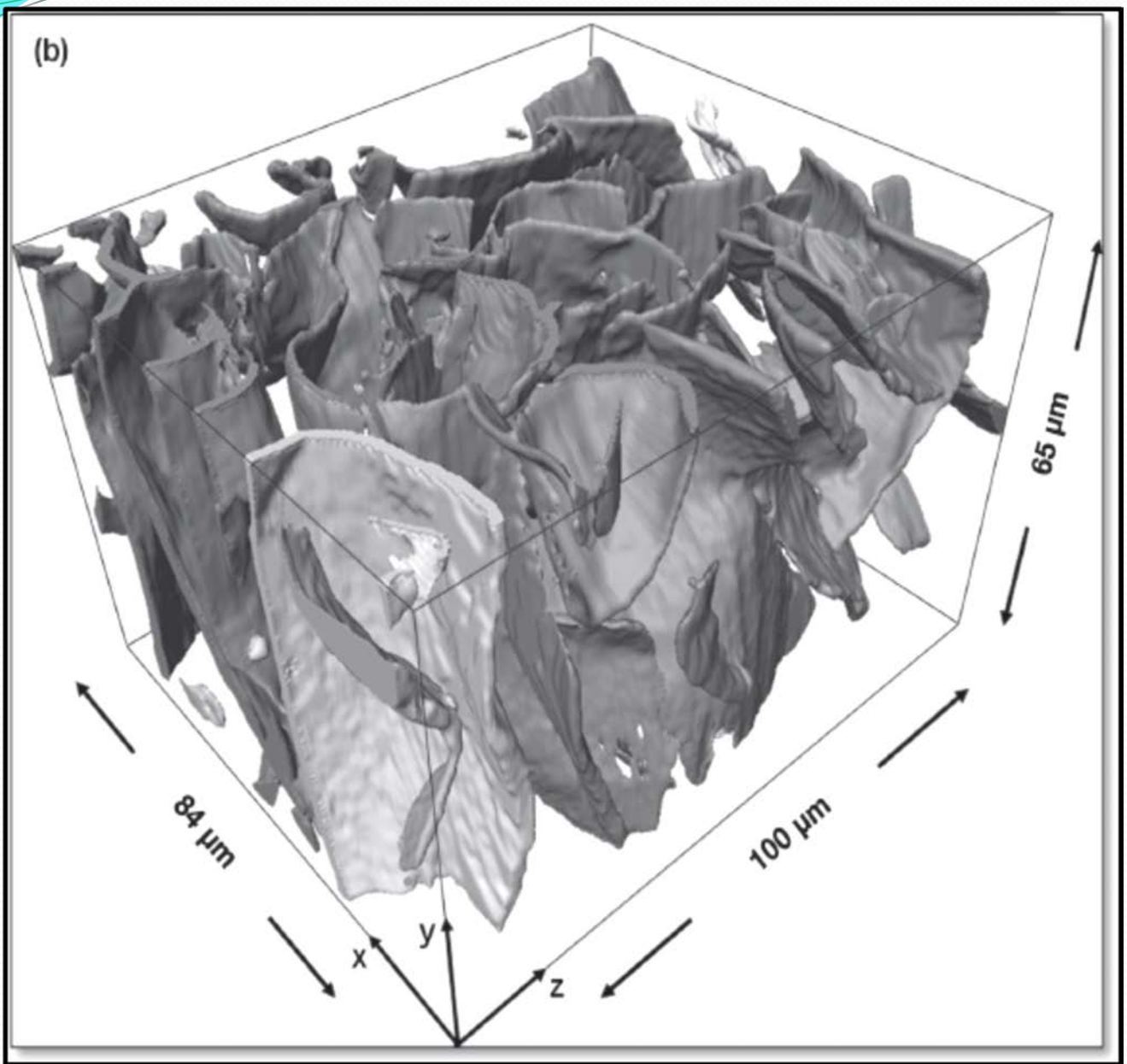



**Figura 17.23(b)**
Reconstrução tridimensional de grafita lamelar em ferro fundido cinzento. Cortes produzidos por FIB e imagens obtidas por MEV. Cortesia A. Velichko e F. Mücklich, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Alemanha.

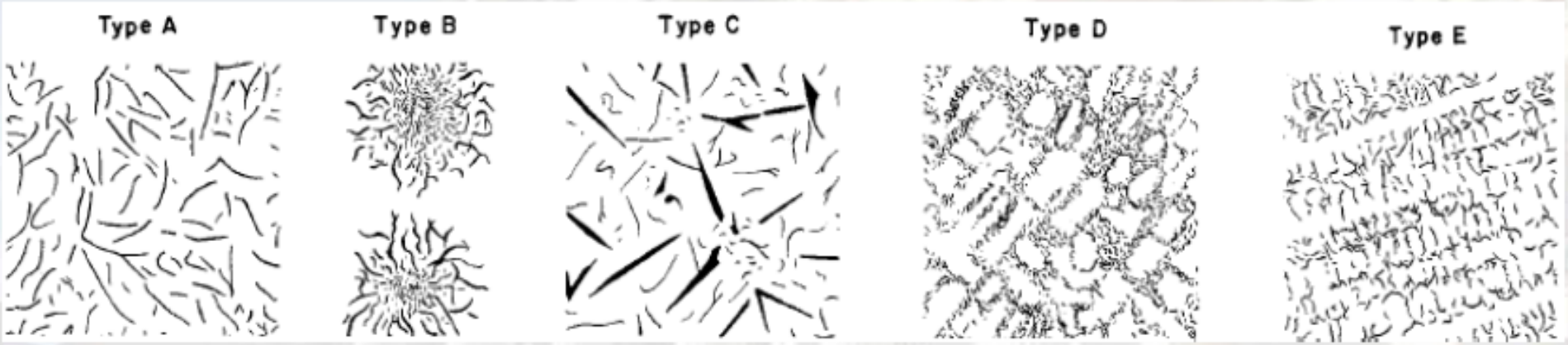
# Aspectos da grafita

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

• Composição química: os elementos de liga podem influenciar tanto a velocidade de nucleação como a de crescimento.De modo geral, quando a velocidade de crescimento é reduzida, ocorre uma redução da ramificação do esqueleto da grafita, conduzindo a um engrossamento da grafita da célula eutética

• Velocidade de esfriamento: velocidades altas produzem veios finos com distribuição dendrítica; velocidades médias produzem distribuição e tamanho normais e velocidades lentas, veios grossos de grafita

# Tipos de grafita nos ferros fundidos cinzentos




## Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos:

| ASTM A 48 class | Resistência à tração | | Resisistência 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 |

**OS FoFos CINZENTOS PODEM SER CLASSIFICADOS PELO TIPO DE GRAFITA OU PELAS PROPRIEDADES MECÂNICAS.**

# la grafita

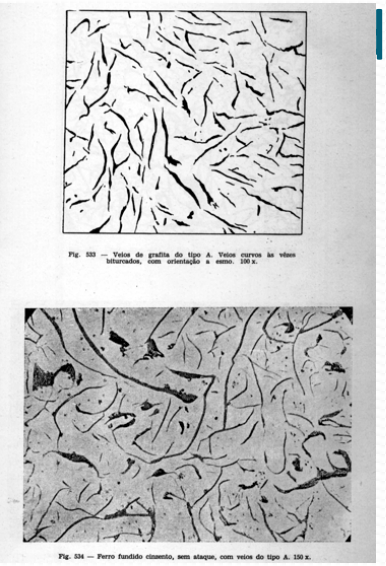


Fig. 533 — Veios de grafita do tipo A. Veios curvos ás vezes bifurcados, com orientação á esmo. 100 x.

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

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

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

Fig. 537 — Veios de grafita do tipo C. Veios grandes e quasi retos e, entre êles, veios pequenos comuns. 100 x.

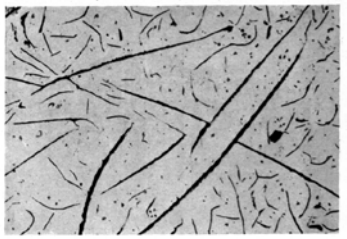


Fig. 538 — Ferro fundido cinzento, sem ataque, com veios tipo C. 150 x.

- Aspecto da grafita Tipo A

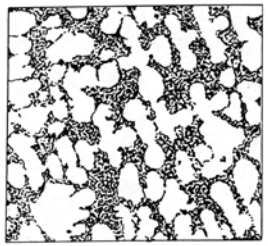


Fig. 539 — Veios de grafita do tipo D. Veios pequenos e curtos agrupados preenchendo o espaço interdendrítico como eutético. 100 x.

- Aspecto da grafita Tipo B

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

- Aspecto da grafita Tipo C

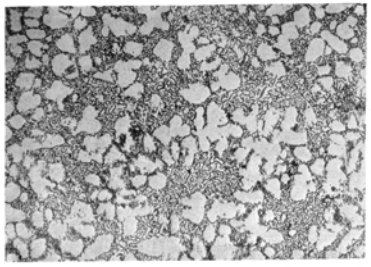


Fig. 540 — Ferro fundido cinzento, sem ataque, com grafita do tipo D. 150 x.

- Aspecto da grafita Tipo D

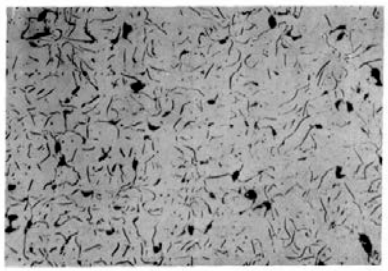
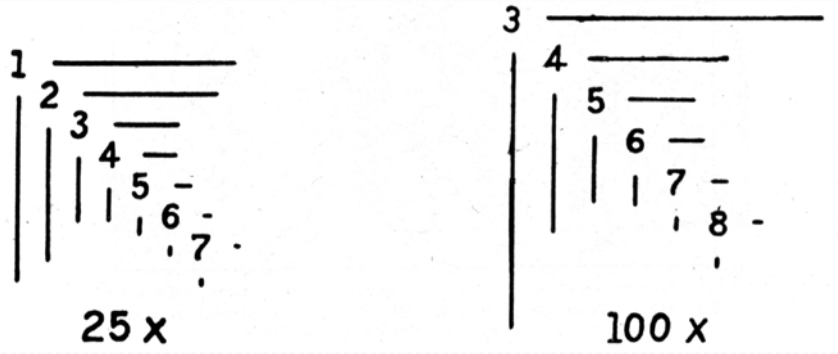


Fig. 542 — Ferro fundido cinzento com grafita do tipo E. 100 x.

- Aspecto da grafita Tipo E

# Tamanhos da grafita



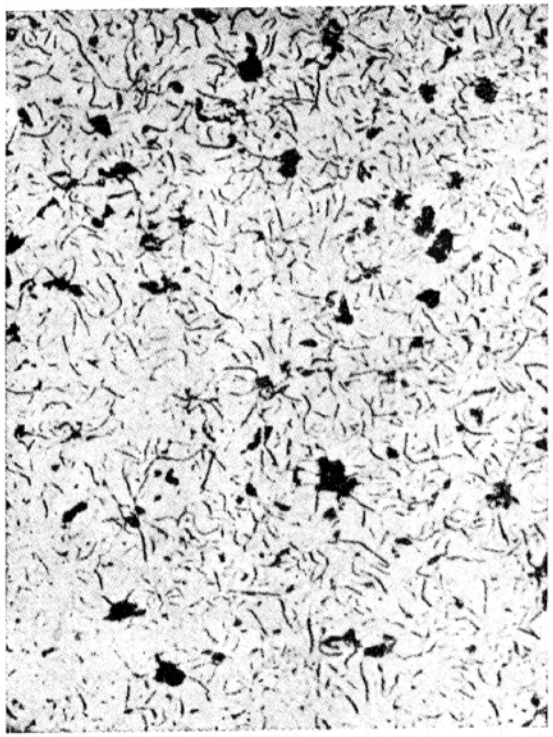



Fig. 548 — Ferro fundido cinzento sem ataque. Exemplo de veios de tamanho n.º 6. 100 x.

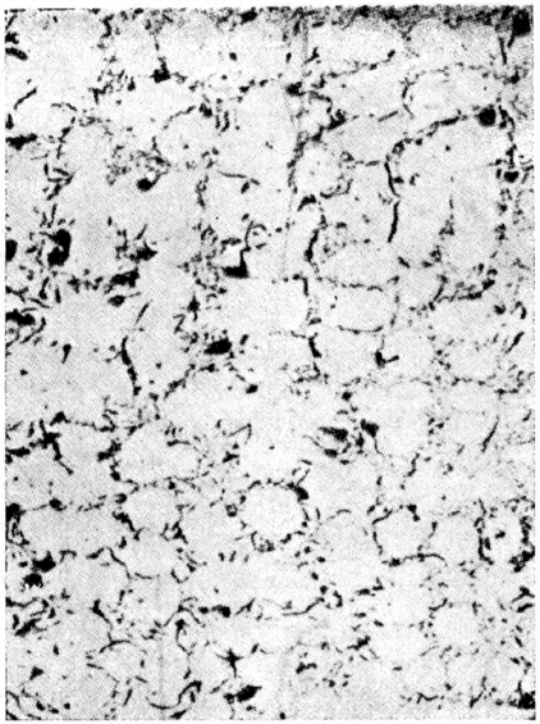


Fig. 549 — Ferro fundido cinzento sem ataque. Exemplo de veios de tamanho n.º 8. 100 x.

# Ferros Fundidos Nodulares

## MICROESTRUTURA

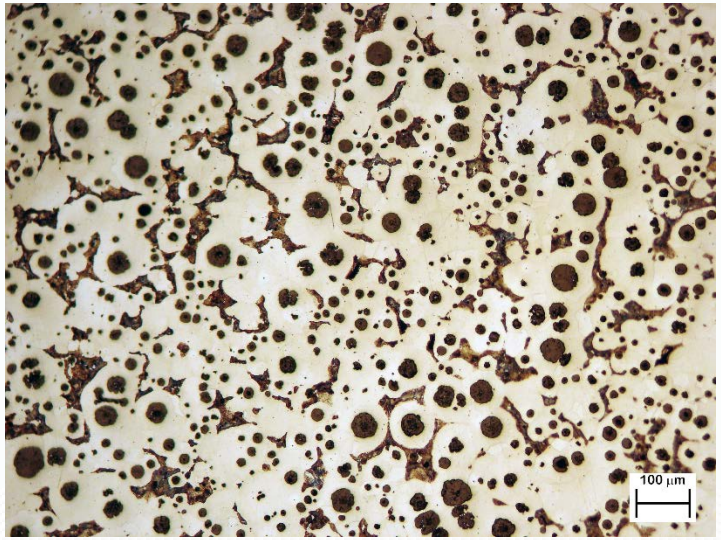
- 3,5≤%C≤4,0; 1,8≤%Si≤3,0
- Pequenas adições de Mg
- Em vez de flocos formam-se nódulos
- A matriz é ferrítica (veloc. baixa) ou perlítica (veloc. moderada)
- Grafite em nódulos origina maior resistência, ductilidade e tenacidade

## PROPRIEDADES

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

## APLICAÇÕES

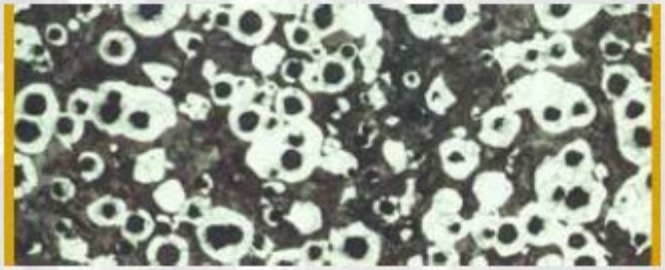
- Engrenagens
- Cambotas
- Juntas universais
- Válvulas
- Componentes sujeitos a desgaste



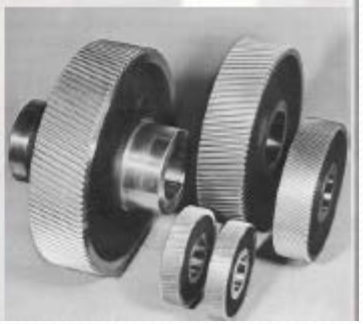
## FF ductil/nodular

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

- Microestruturas:
  - GN + ferrita
  - GN + perlita
  - GN + ferrita/perlit
  - GN + austenita/ferrita (ADI)



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

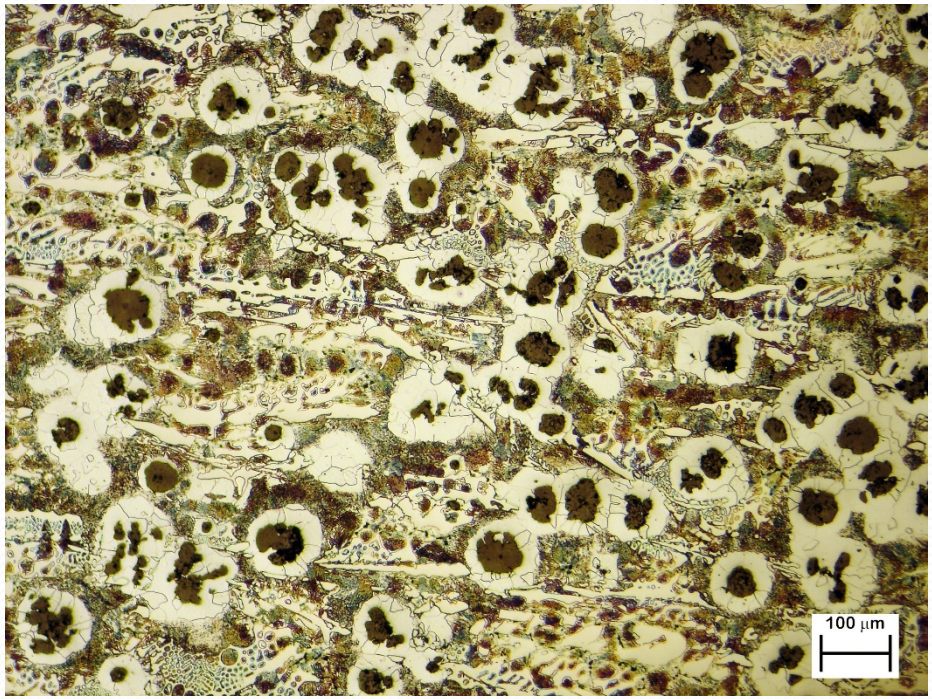


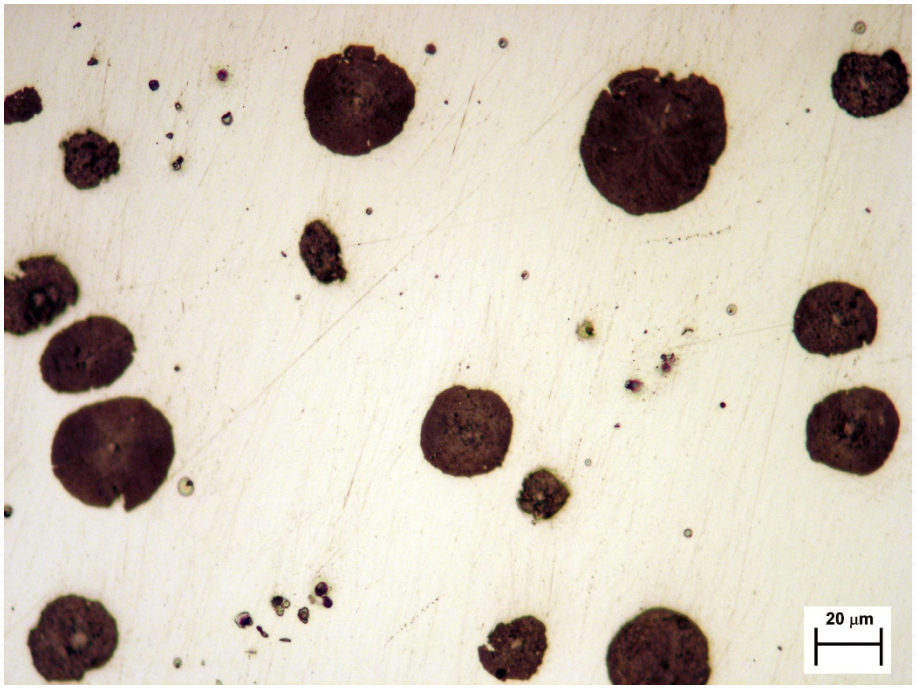
# Ferros Fundidos Nodulares

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

A microestrutura do ferro fundido nodular é obtida através da adição de uma pequena quantidade de magnésio, cério, bário, ítrio e as terras raras antes da fundição

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

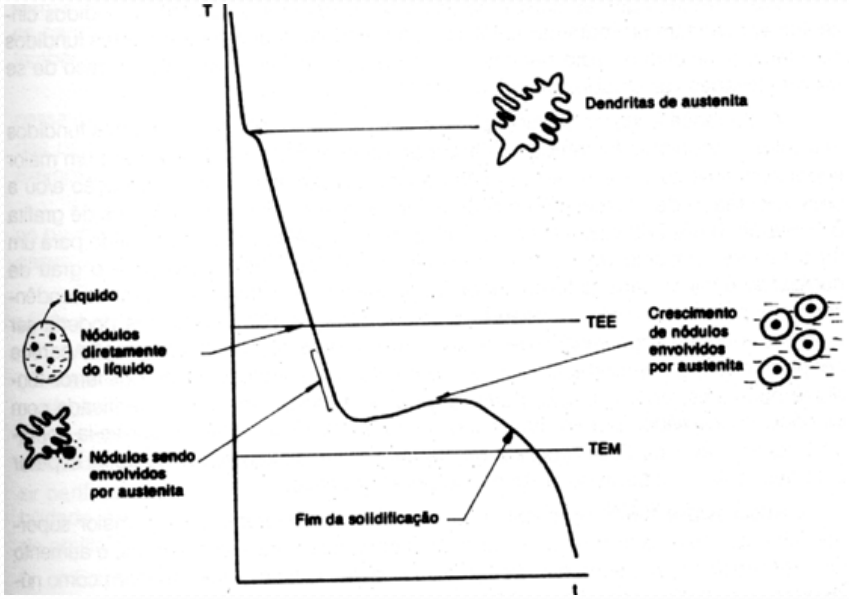


# Ferros Fundidos Nodulares – Sequência de solidificação

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

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

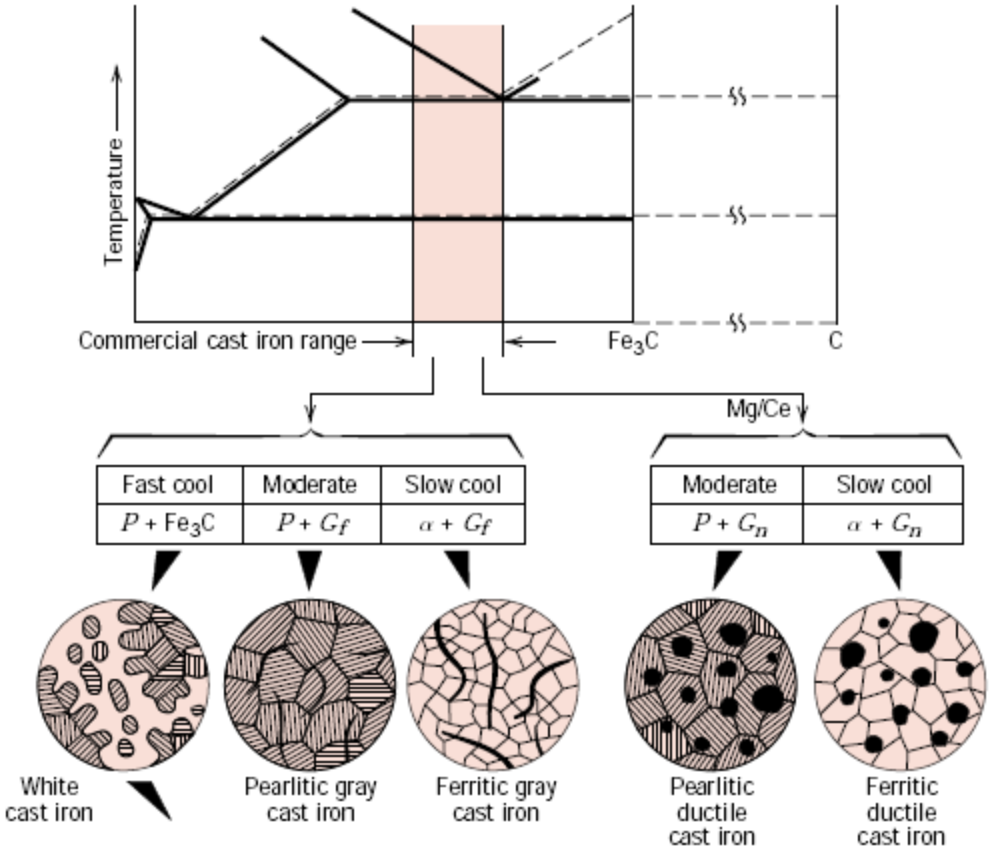


# Ferros Fundidos Nodulares e Cinzentos- matrizes

•A variação de composição química e do tratamento térmico dos ferros fundidos cinzentos e nodulares alteram a matriz que circunda as partículas de grafita em lamelas ou nódulos respectivamente

•A formação de uma matriz de ferrita é facilitada quanto menor for a velocidade de esfriamento da peça, maior a quantidade de grafita, maior a ramificação do esqueleto da grafita lamelar ou mais elevado número de nódulos e maior a quantidade de silício

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



# FoFo DÚTIL OU NODULAR:

- **ADIÇÃO DE Mg (Magnésio) OU Ce (Cério) NO FOFO CINZENTO;**
- **GRAFITA EM NÓDULOS;**
- **MATRIZ PERLITICA–MELHOR DUTILIDADE;**

( ADAPTADO: COLPAERT)

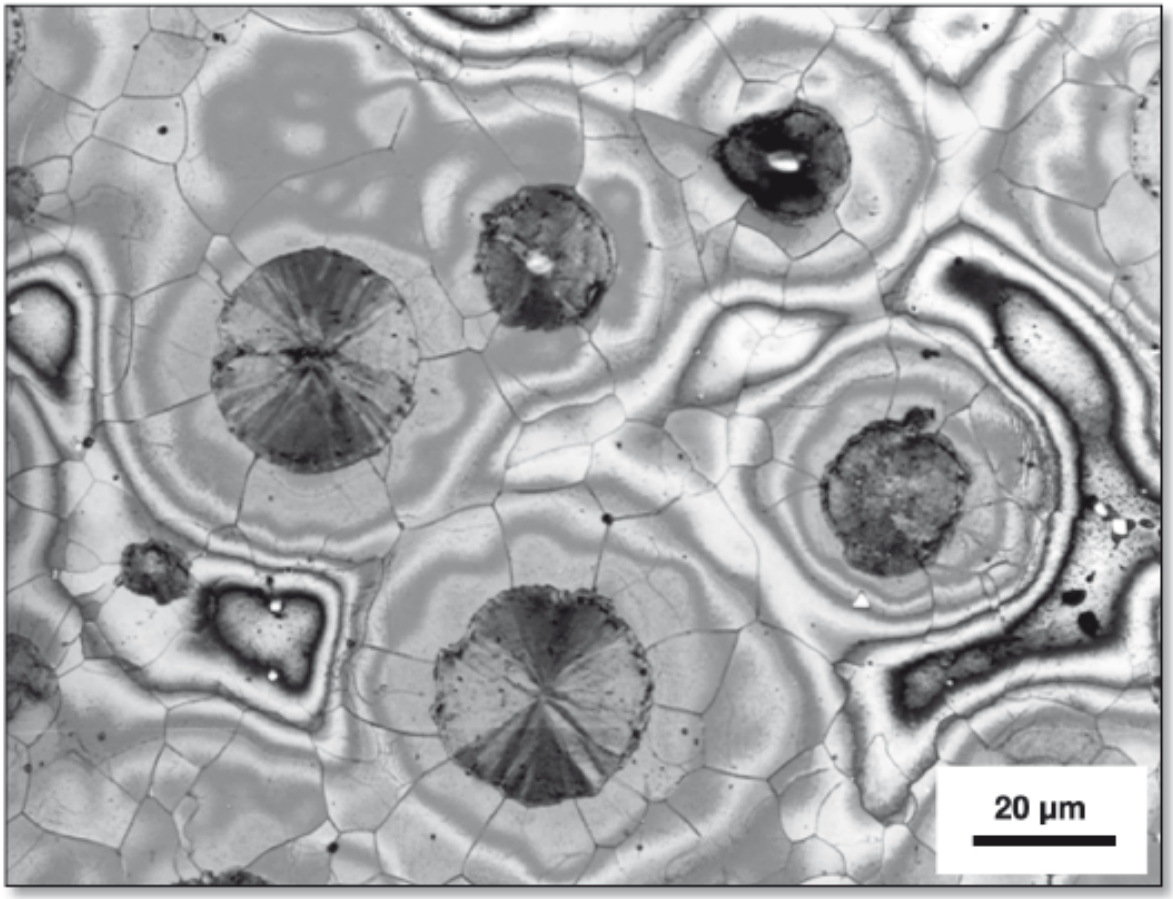
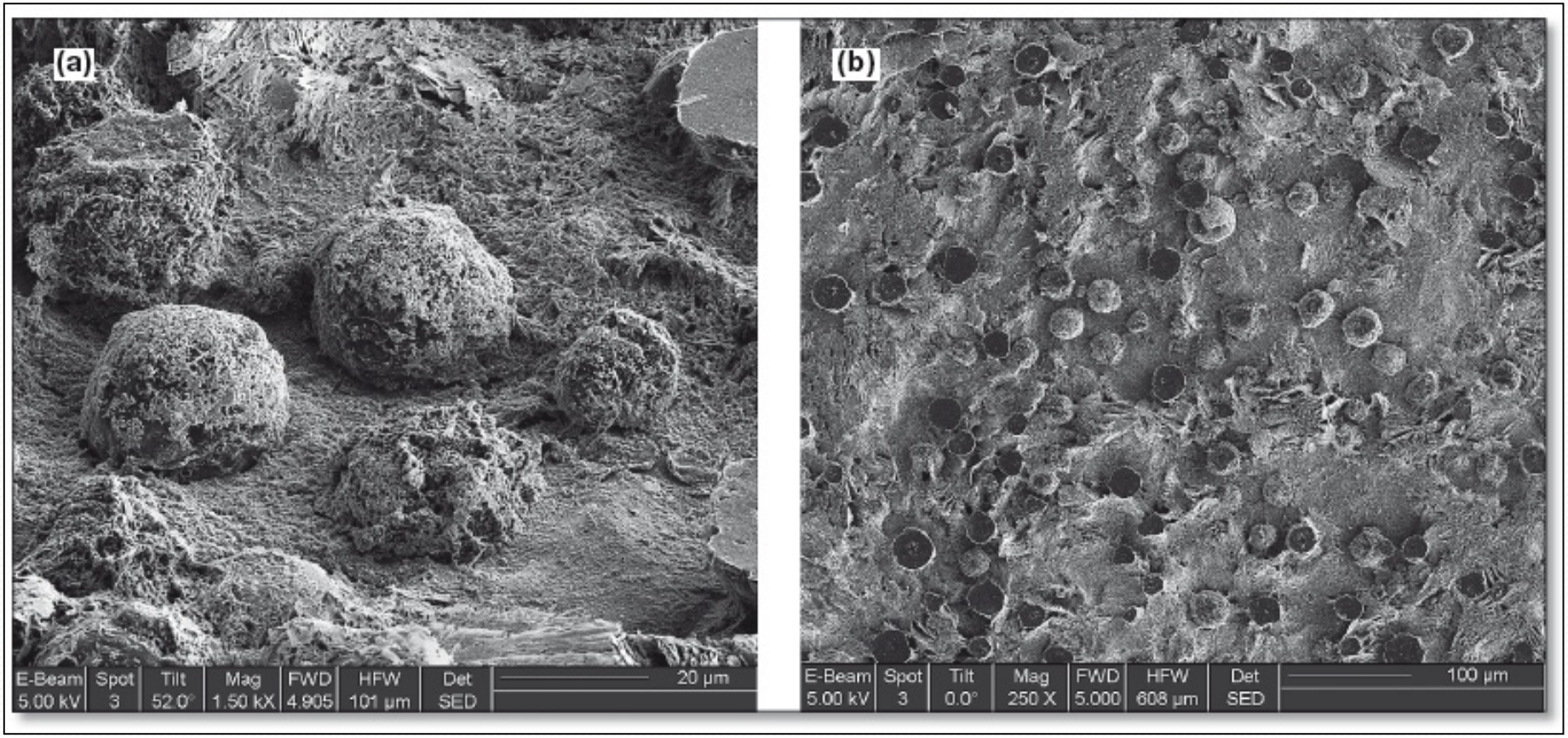



**Figura 17.82**
Ferro fundido nodular, recozido (Fe-3.9%, C-2.9%, Si-0.32%, Mn-0.06%, P-0.037%, Mg-1.5%, Ni-0.57% Cu). O ataque[12] revela a segregação de silício, cujo teor vai se reduzindo a medida que a distância do nódulo aumenta. Cortesia de J. Radzikowska, Foundry Research Institute-Krakow, Polônia.

# FoFo DÚTIL OU NODULAR




( ADAPTADO: COLPAERT)

# FoFo DÚTIL OU NODULAR

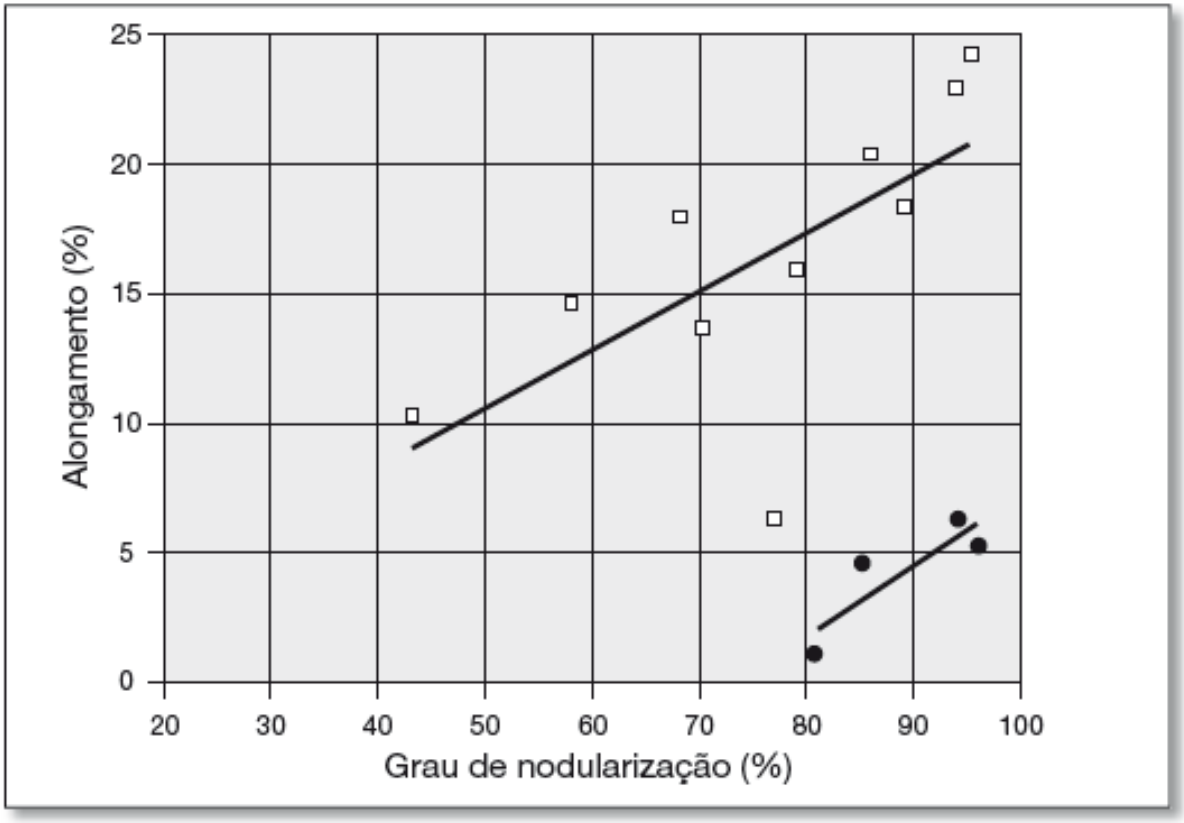



**Figura 17.77**
Efeito do grau de nodularização (medido por metalografia quantitativa) sobre o alongamento medido no ensaio de tração para dois tipos de ferro fundido nodular. Adaptado de [38].

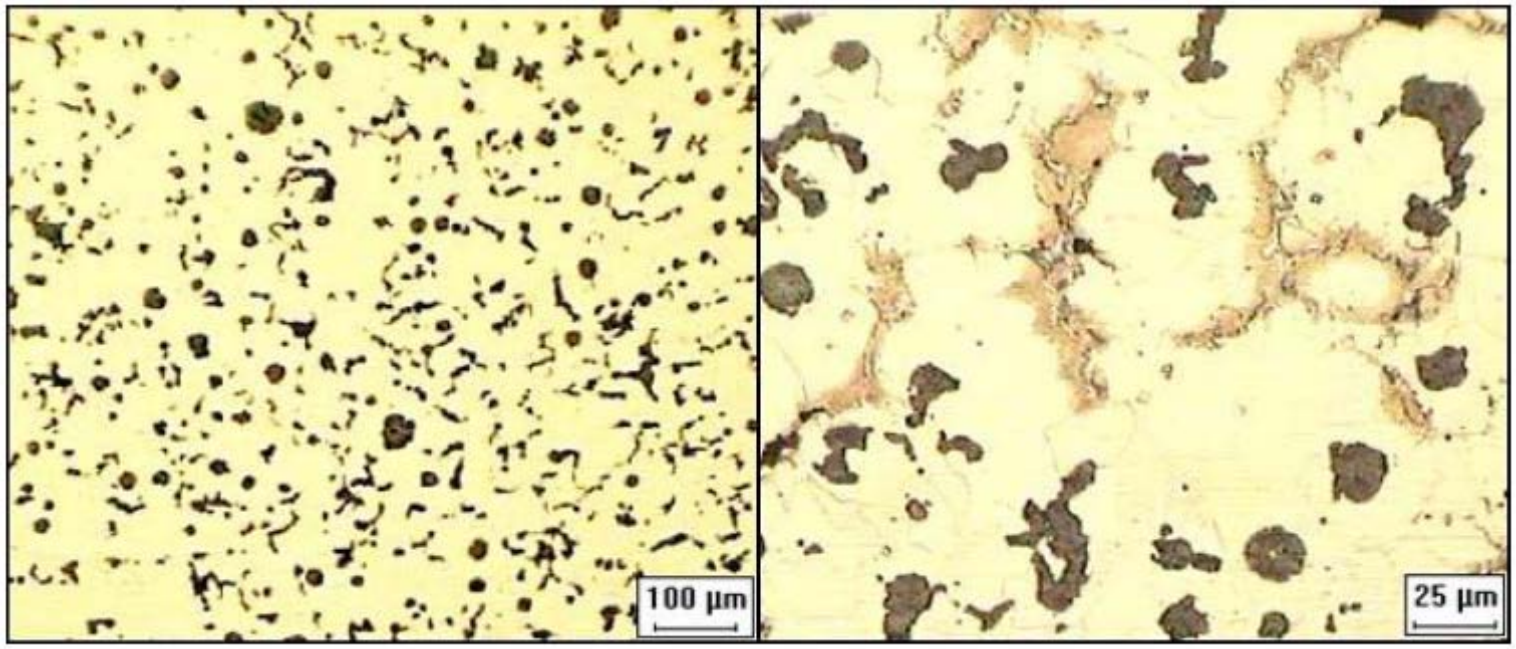
( ADAPTADO: COLPAERT)

# Ferros Fundidos Vermiculares

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

✓Demora no preenchimento do molde: se após a estabilização de Fe-Si houver um tempo muito grande de espera para o preenchimento do molde, a segregação de elementos que promovem a agregação esférica da grafita começa a se dissolver

✓Quantidade insuficiente de inoculante: neste caso a quantidade de inoculante não permite que se promova a agregação esférica da grafita



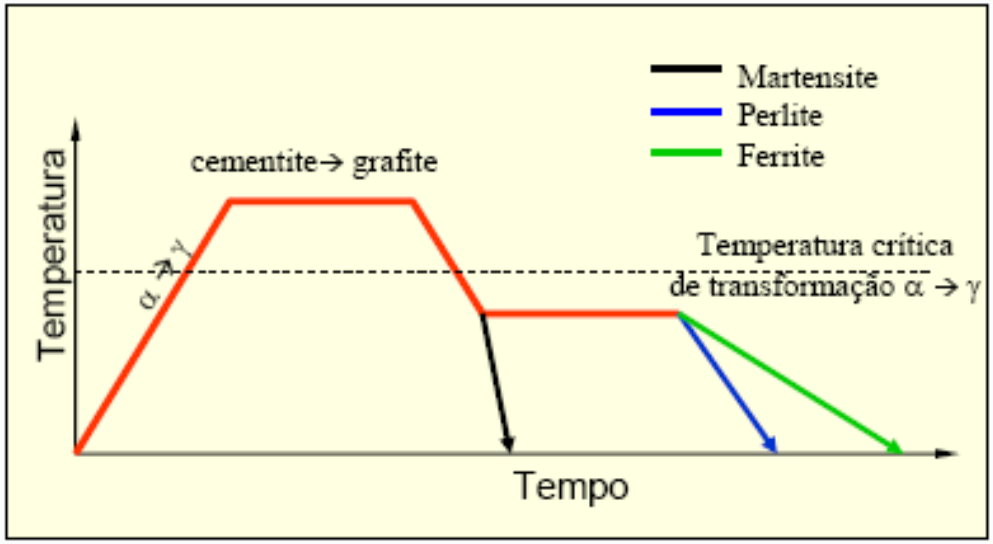
# Ferros Fundidos Maleáveis

## MICROESTRUTURA

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

## PROPRIEDADES

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



# Ferros Fundidos Maleáveis

Os ferros fundidos maleáveis são obtidos a partir do ferro fundido branco, quando submetidos a um tratamento térmico de grafitização (aprox. 940ºC), quando os carbonetos de ferro ($Fe_3C$) transformam-se em grafita (nódulos de carbono revenido).

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

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

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

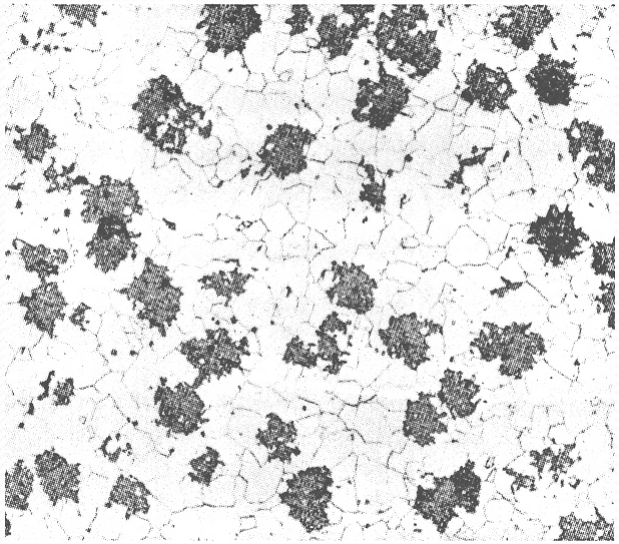
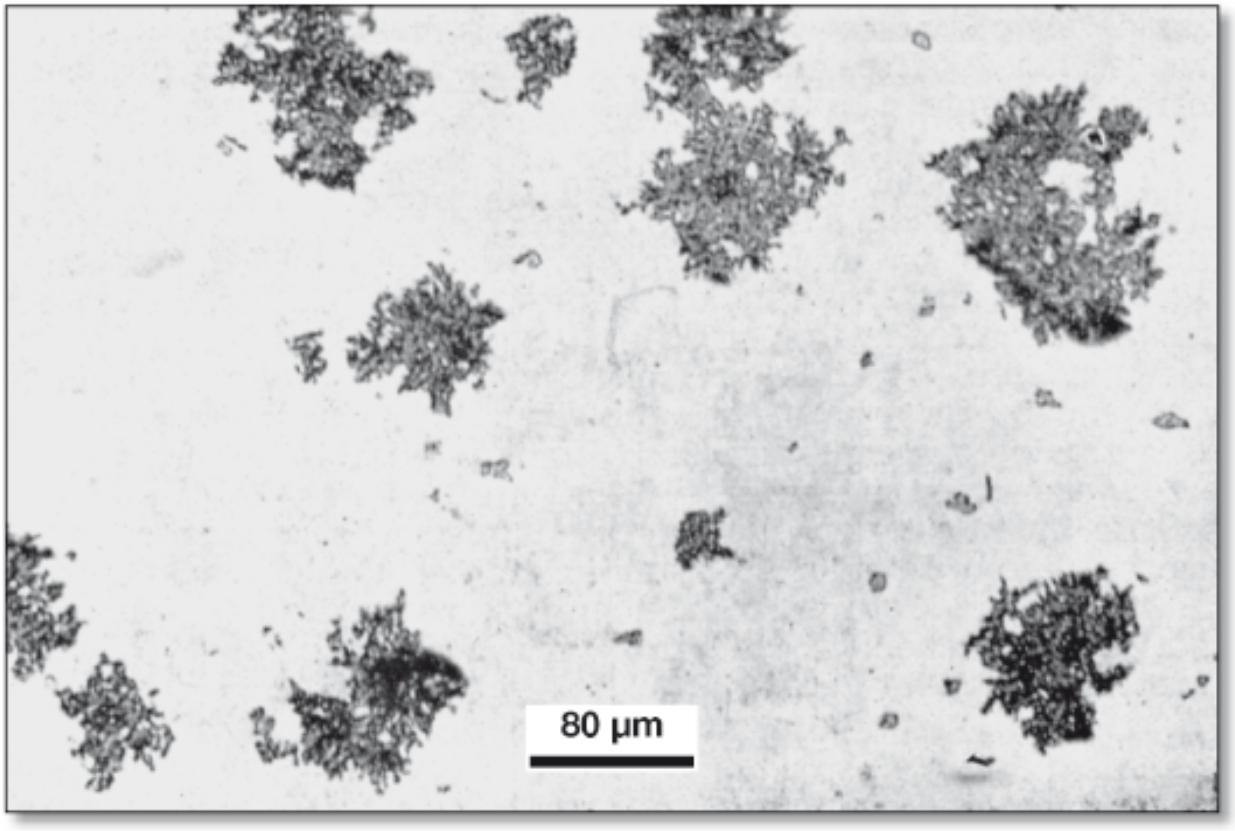


**Figura 17.102**
Ferro fundido maleável de núcleo preto. Nódulos de grafita. Sem ataque.



## FERROS FUNDIDOS

- Ferro fundido **cinzento**
  - perlítico
  - ferrítico

- Ferro fundido **nodular**
  - perlítico
  - ferrítico
- Ferro fundido **branco**
- Ferro fundido **maleável**
  - perlítico
  - ferrítico

## Ferro fundido Branco x Ferro fundido cinzento

- Possui o carbono não dissolvido precipitado na forma de carbonetos.
- Microestruturas:
  - Ledeburita + perlita + cementita
  - Ledeburita
  - Ledeburita + cementita
- Elevadas dureza e resistência ao desgaste, que podem ser melhoradas pela adição de elementos como Cr e Mo.
- Muito baixas tenacidade e ductilidade.

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

- Material "fácil de se fundir"
- Boa usinabilidade
- Baixa ductilidade e tenacidade, devido ao efeito de entalhe da grafita em veios
- Resistência à tração entre 28kgf/mm$^2$ e 42 kgf/mm$^2$. Resistência à compressão 3X maior.
- Boa capacidade de amortecimento.

# FERROS FUNDIDOS

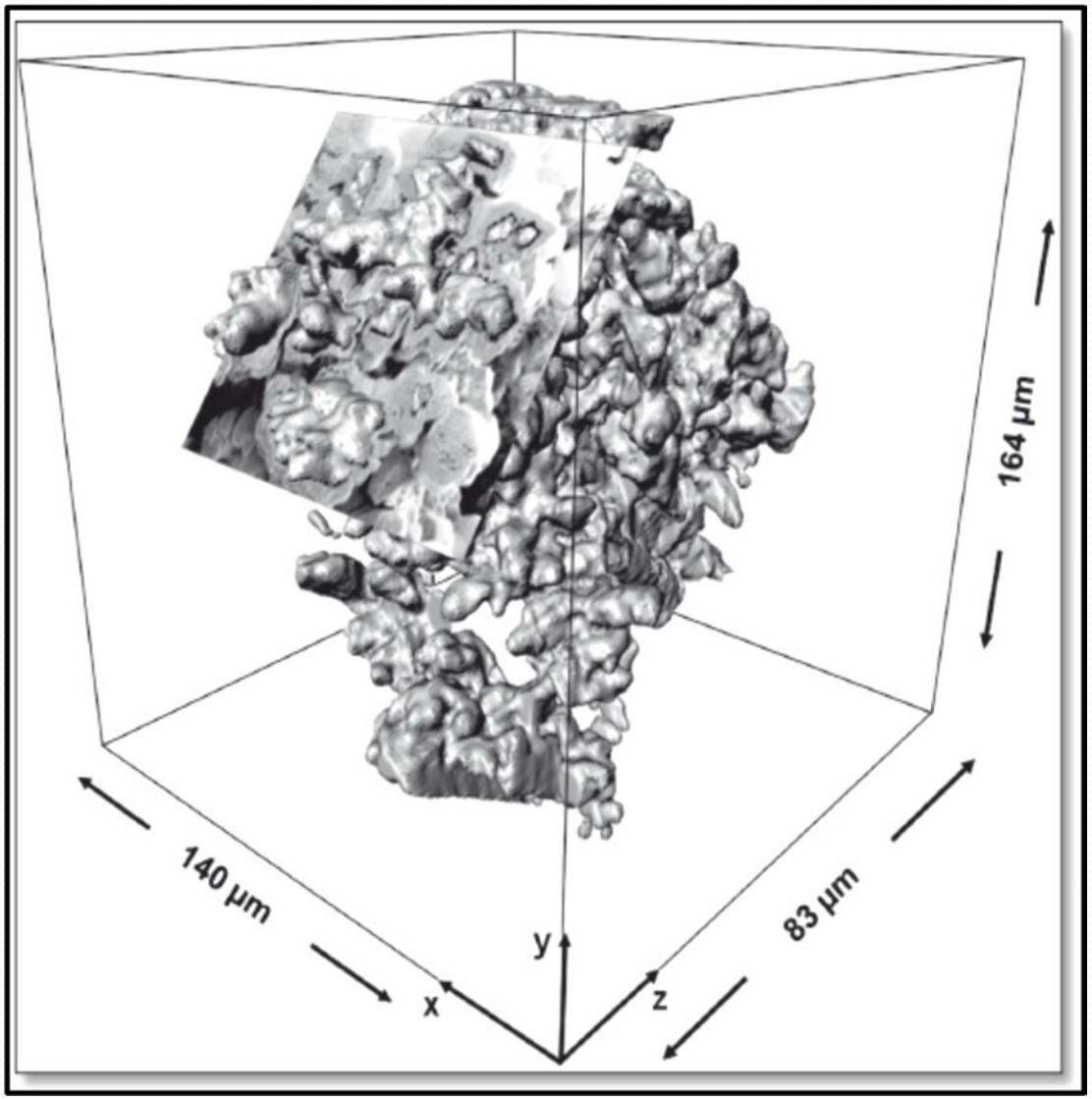



**Figura 17.101**
Reconstrução tridimensional de nódulo de grafita em ferro fundido maleável. Cortes produzidos por FIB e imagens obtidas por MEV. Observa-se que, dependendo do plano do corte, é possível produzir seções não conectadas, no plano de corte, a partir de uma única partícula de grafita. Cortesia A. Velichko e F. Mücklich, Universität des Saarlandes, Saarbrucken, Alemanha.

# FoFo MALEÁVEL

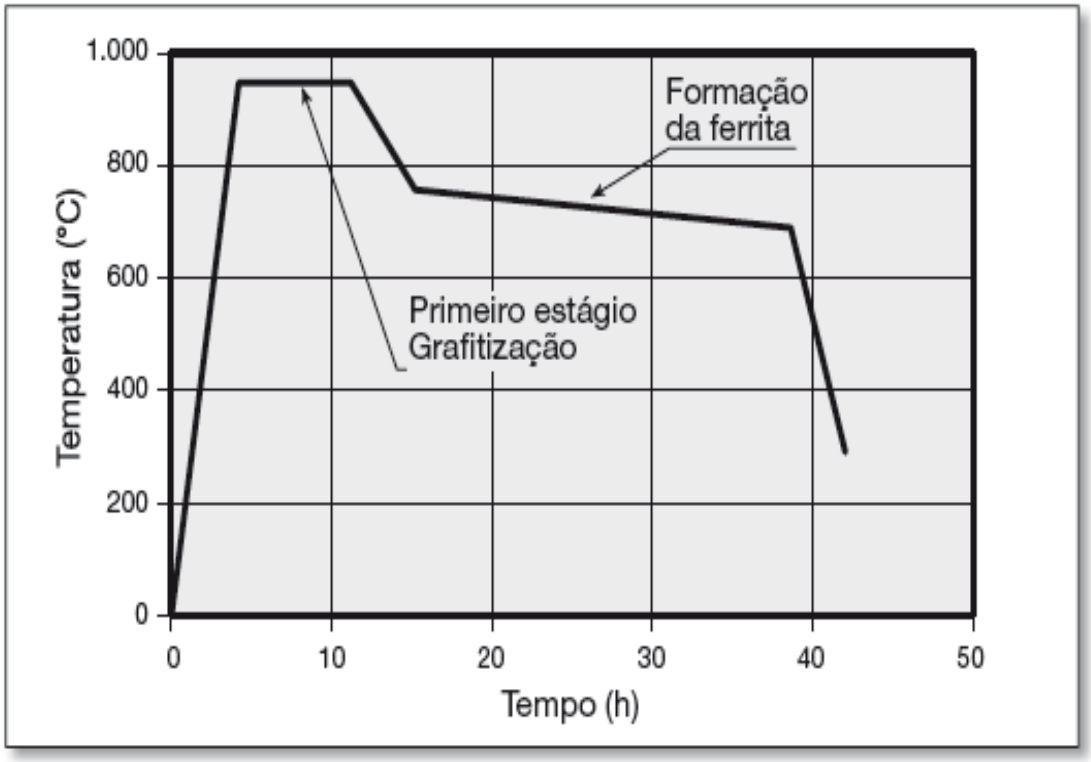


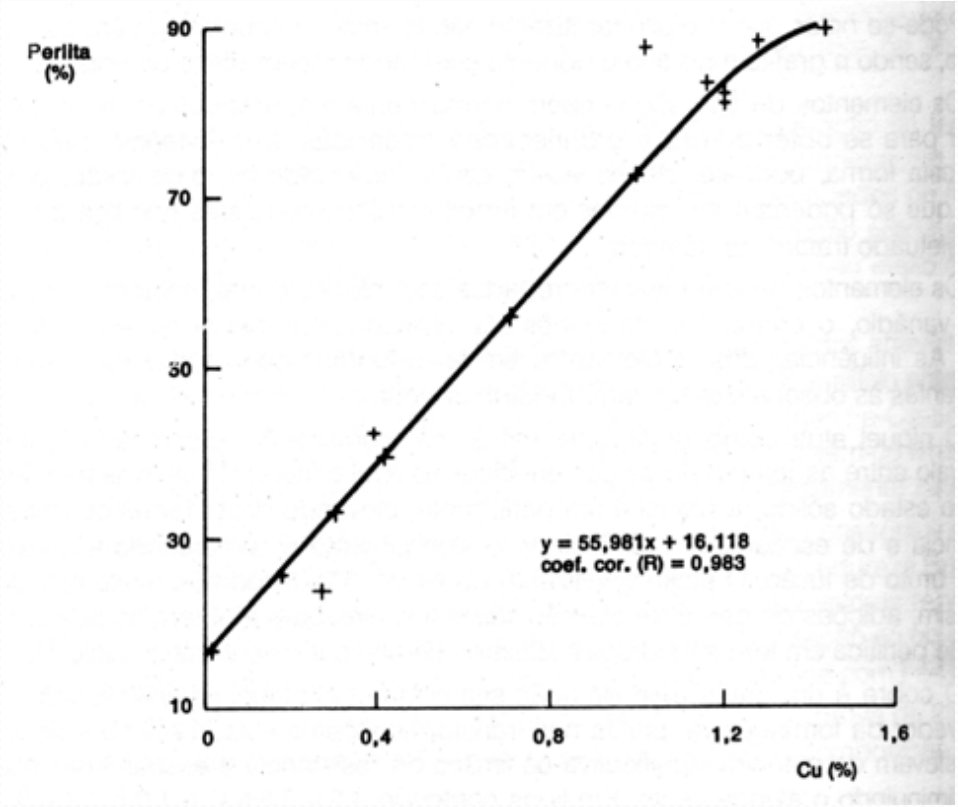

**Figura 17.103**
Ciclo de tratamento térmico típico para a obtenção de ferro fundido maleável preto ferrítico. O primeiro estágio em que a cementita é transformada em grafita pode levar cerca de 8 h. O resfriamento, no campo austenítico, deve levar à precipitação adicional de grafita, evitando a supersaturação 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.

# Ferros Fundidos - Influência de Elementos de Liga

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

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

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



# Ferros Fundidos - Influência de Elementos de Liga

| Elemento de liga | Porcentagem do elemento | Composição química base | | | L.R.* kgf/mm² | Δ L.R.** kgf/mm² | Dureza Brinell | Δ D*** | Referência bibliográfica |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | % C | % Si | % CE | | | | | |
| Cobre | – | 3,30 | 2,30 | 4,07 | 24,0 | – | 199 | – | 215 |
| | 1 | 3,30 | 2,30 | 4,07 | 27,1 | 3,1 | 224 | 25 | 215 |
| | – | 3,34 | 2,00 | 4,00 | 27,0 | – | 190 | – | 216 |
| | 1 | 3,34 | 2,00 | 4,00 | 30,0 | 3,0 | 210 | 20 | 216 |
| | 2 | 3,34 | 2,00 | 4,00 | 33,0 | 6,0 | 230 | 40 | 216 |
| | – | 2,61 | 2,00 | 3,28 | 37,0 | – | 225 | – | 216 |
| | 1 | 2,61 | 2,00 | 3,28 | 41,0 | 4,0 | 245 | 20 | 216 |
| | 2 | 2,61 | 2,00 | 3,28 | 43,0 | 6,0 | 265 | 40 | 216 |
| | 0,20 | 3,43 | 2,30 | 4,20 | 23,6 | – | 197 | – | 217 |
| | 0,90 | 3,41 | 2,04 | 4,09 | 27,3 | 3,7 | 220 | 23 | 217 |
| | – | 2,90 a 3,43 | 1,20 a 2,00 | 3,30 a 4,10 | – | – | – | – | 218 |
| | 1 | 2,90 a 3,43 | 1,20 a 2,00 | 3,30 a 4,10 | – | 2,3 | – | 20 | 218 |
| | 2 | 2,90 a 3,43 | 1,20 a 2,00 | 3,30 a 4,00 | – | 3,1 | – | 35 | 218 |
| Molibdênio | 0,25 | 3,00 a 3,50 | 1,50 a 2,50 | 3,50 a 4,30 | 29,4 | 2,1 | – | – | 224 |
| | 0,50 | 3,00 a 3,50 | 1,50 a 2,50 | 3,50 a 4,30 | 32,9 | 5,6 | – | – | 224 |
| | 0,75 | 3,00 a 3,50 | 1,50 a 2,50 | 3,50 a 4,30 | 33,6 | 6,3 | – | – | 224 |
| | – | 3,30 | 2,15 | 4,06 | 26,5 | – | 197 | – | 225 |
| | 0,30 | 3,30 | 2,15 | 4,06 | 29,0 | 2,5 | 197 | – | 225 |
| | 0,50 | 3,30 | 2,15 | 4,06 | 32,5 | 6,0 | 218 | 21 | 225 |
| Tungstênio | – | 3,30 | 2,15 | 4,06 | 25,6 | – | 190 | – | 225 |
| | 0,18 | 3,30 | 2,15 | 4,06 | 28,4 | 2,8 | 195 | 5 | 225 |
| | 0,45 | 3,30 | 2,15 | 4,06 | 29,9 | 4,3 | 197 | 7 | 225 |
| Estanho | – | 3,30 | 2,08 | 3,99 | 17,9 | – | 170 | – | 220 |
| | 0,10 | 3,30 | 2,08 | 3,99 | 23,1 | 5,2 | 221 | 51 | 220 |
| | – | 3,07 | 2,45 | 4,52 | 15,4 | – | 145 | – | 220 |
| | 0,25 | 3,07 | 2,45 | 4,52 | 16,5 | 1,1 | 206 | 61 | 220 |
| | – | 3,20 a 3,30 | 2,00 a 2,20 | 3,87 a 4,03 | 19,8 | – | 185 | – | 221 |
| | 0,10 | 3,20 a 3,30 | 2,00 a 2,20 | 3,87 a 4,03 | 23,1 | 3,3 | 210 | 25 | 221 |
| | 0,20 | 3,20 a 3,30 | 2,00 a 2,20 | 3,87 a 4,03 | 26,2 | 6,4 | 230 | 45 | 221 |

# APLICAÇÕES DO FoFo

(VÁLVULA-SULZER)

(VÁLVULA GLOBO-KSB)

# APLICAÇÕES DO FoFo

**BARRAMENTO DE TORNO E BLOCO DE MOTOR**

FIM