

INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA

Profa Dra Lauralice
Canale
Materiais Metálicos

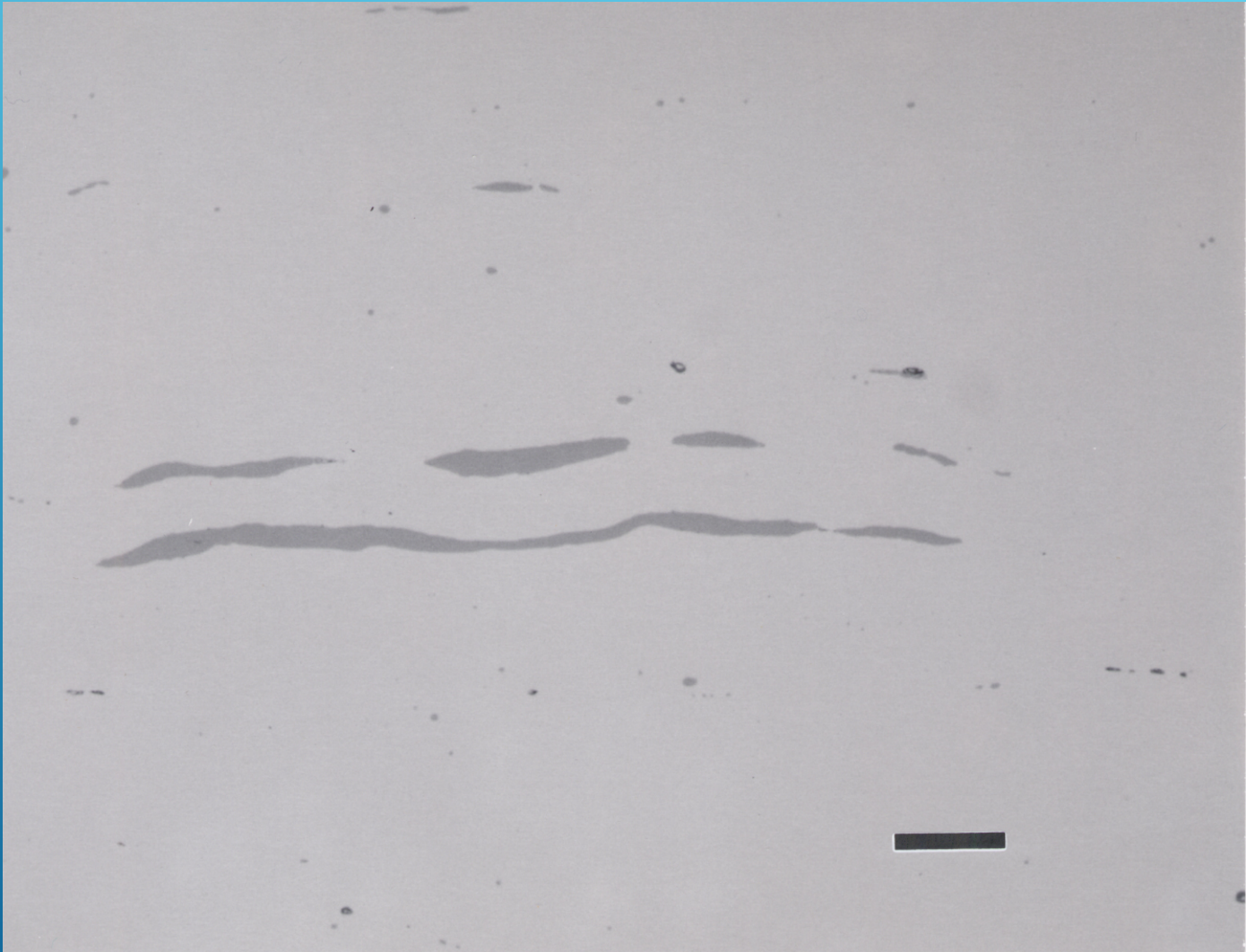
Carbono (C)

- ▶ É um elemento de liga essencial. Aumenta o endurecimento por solução sólida, a resistência e a temperabilidade.
- ▶ Dissolve-se no Fe para formar ferrita (baixíssima porcentagem) e austenita.
- ▶ Combina-se com o Fe para formar um carboneto: cementita (Fe_3C). Esse carboneto é um componente da perlita.

INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA

Manganese (Mn)

- É outro elemento de liga essencial em muitos aços.
- Aumenta a resistência e dureza por solução sólida tão bem quanto a temperabilidade.
- Fraco formador de carboneto, mas com maior potencial do que o Fe.
- Auxilia na redução da fragilidade causada pelo S, pois forma o **sulfeto de Manganês** (MnS).
- Faixa: 0.3 to 2%.



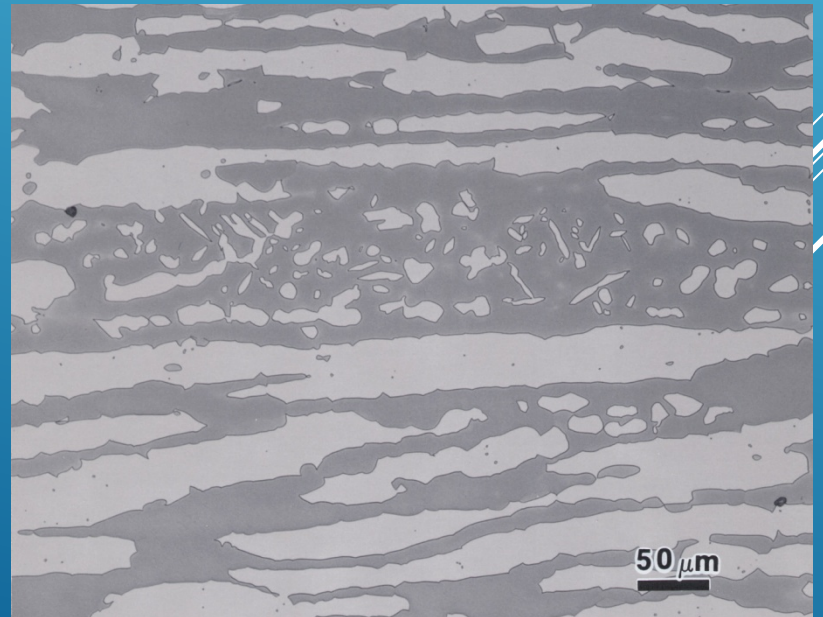
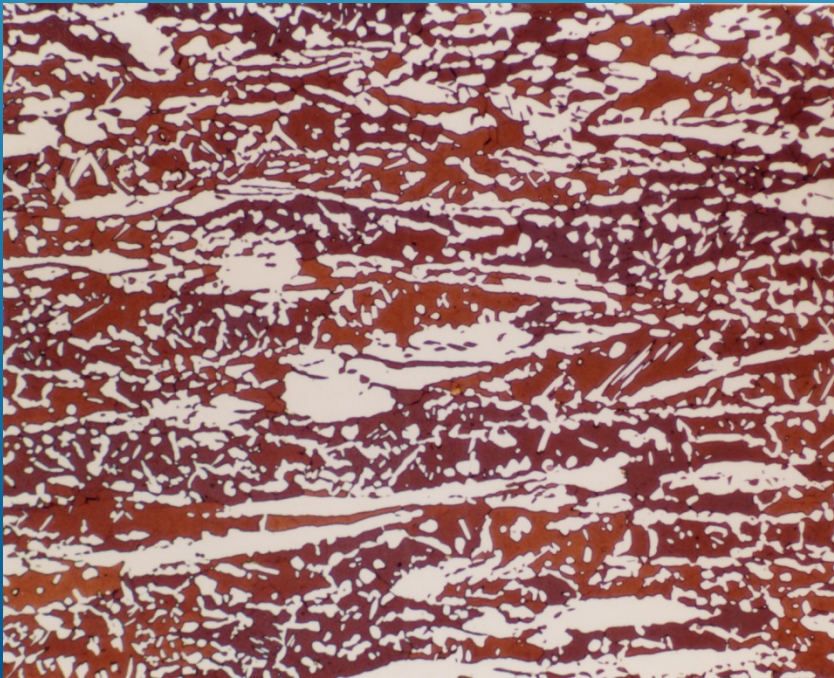
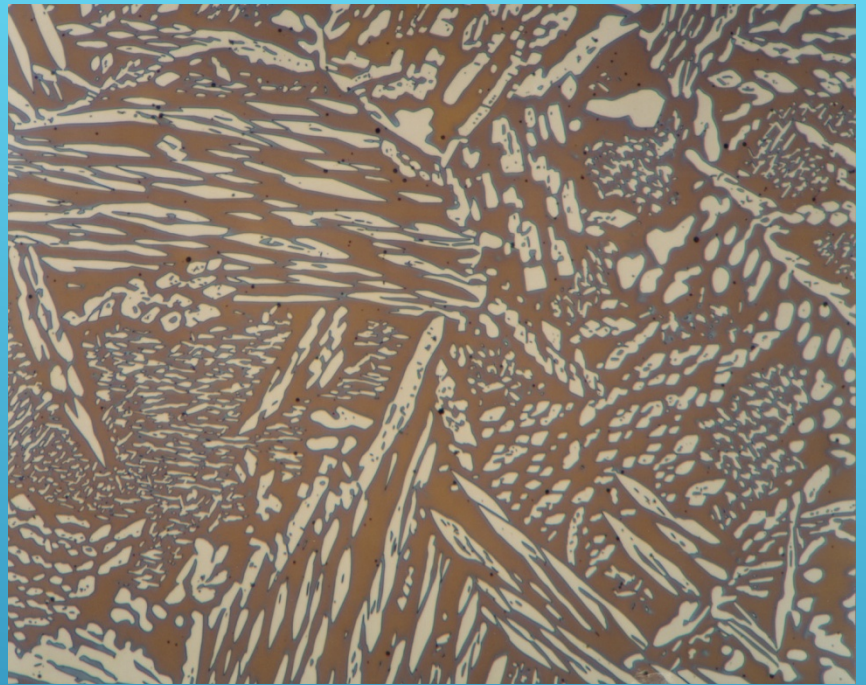
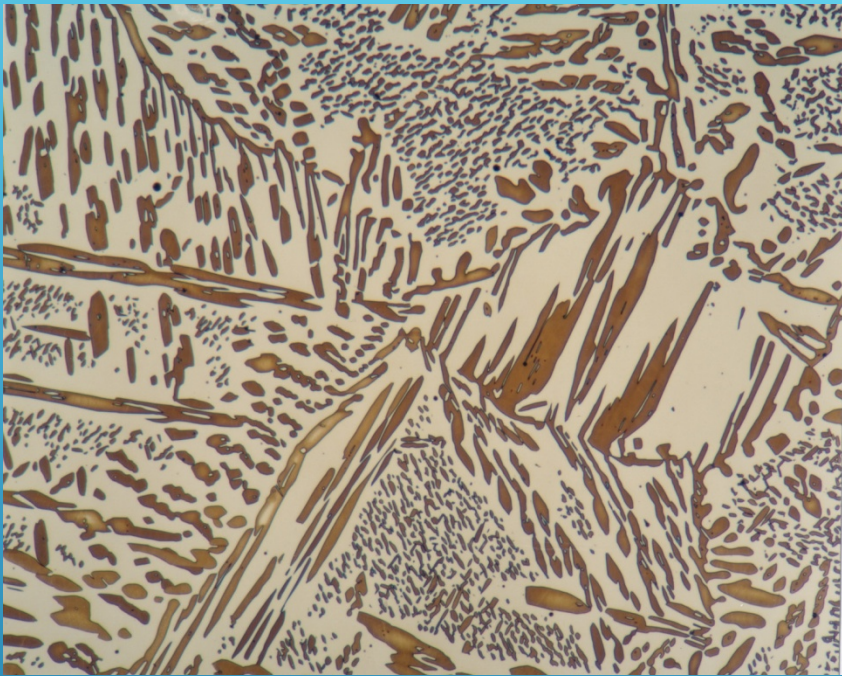
Silício (Si)

- Também é essencial. Aumenta o endurecimento e resistência por solução sólida e a temperabilidade.
 - É adicionado ao aço líquido para remover o oxigênio (desoxidante). Como resultado é formado o dióxido de silício.
 - Não forma carbonetos em aços.
 - Melhora a resistência a oxidação.
 - Faixas: 0.2 to 2.5%.
- 



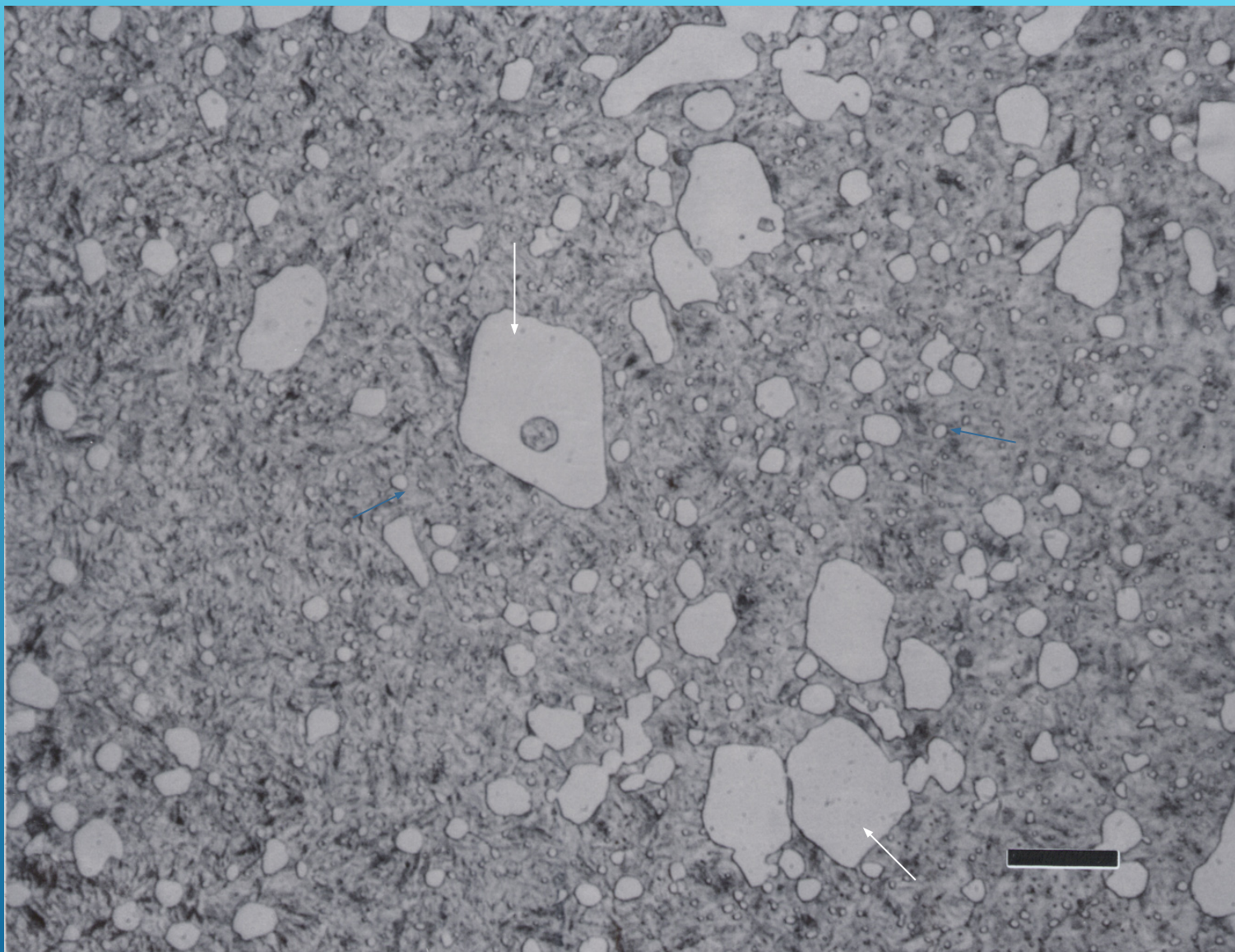
Níquel (Ni)

- ▶ É adicionado para aumentar a resistência e endurecimento por solução sólida.
 - ▶ Melhora a tenacidade especialmente a baixas temperaturas.
 - ▶ Não forma carbonetos.
 - ▶ Faixa: 0.3 to 5%.
 - ▶ Essencial nos aços inox austeníticos.
- 
- A series of white diagonal lines of varying lengths and thicknesses, located in the bottom right corner of the slide, creating a modern, abstract graphic element.



Cromo (Cr)

- ▶ É essencial como elemento de liga para muitos aços de baixa liga e para todos os aços inoxidáveis (>11%).
- ▶ Aumenta levemente a resistência e dureza por solução sólida. Aumenta a temperabilidade.
- ▶ Aumenta a resistência a corrosão e oxidação a alta temperatura.
- ▶ Formador de carboneto (maior que o Mn), melhora a resistência ao desgaste e resistência a alta temperatura.
- ▶ Faixas: < 0.3 to 4%.



Cr₂₃C₆

Cr₇C₃

Molibdênio(Mo)

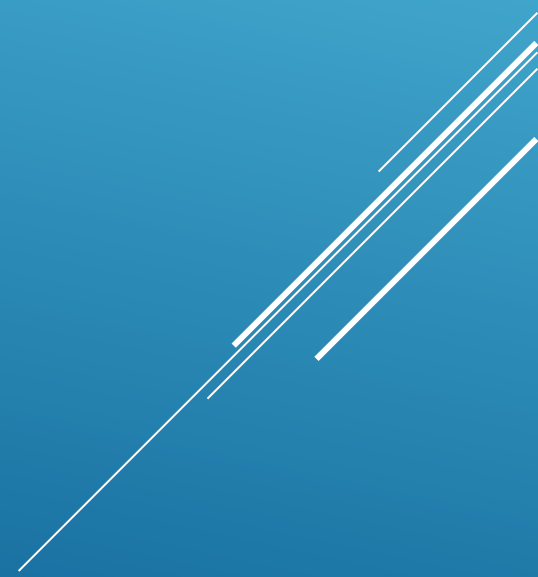
- ▶ Promove aumento da resistência e dureza por solução sólida e a temperabilidade.
 - ▶ É forte formador de carboneto (maior que o Cr).
 - ▶ Aumenta as propriedades de alta temperatura e melhora a fragilidade do revenido.
 - ▶ Aumenta a resistência a corrosão em aços inóx.
 - ▶ Faixa: 0.1 a 0.5%.
- 

Cobre (Cu)

- ▶ É usualmente considerado uma impureza ou elemento indesejado em muitos aços.
 - ▶ Insolúvel no Fe à temperatura ambiente .
 - ▶ Não forma carboneto.
- 
- A series of several thin, white, parallel diagonal lines located in the bottom right corner of the slide, extending from the middle towards the bottom right edge.

Tungstênio (W)

- ▶ É um forte formador de carboneto promovendo partículas de resistência à abrasão.
- ▶ Também aumenta resistência e dureza por solução sólida a temperabilidade.



Vanádio (V)

- Um importante elemento em aços microligados.
 - Aumenta a resistência e dureza dos aços pelo refinamento do grão. Aumenta a temperabilidade.
 - Forte formador de nitretos, também forma carboneto.
 - Minimiza perda de resistência durante o revenido.
 - Faixa: 0.1 to 0.3%.
- 

- ▶ **Nióbio (Nb)**
 - ▶ **Um importante elemento em aços microligados.**
 - ▶ **Aumenta a resistência e dureza dos aços pelo refinamento do grão. Aumenta a temperabilidade.**
 - ▶ **Forte formador de nitretos, também forma carboneto.**
- 
- A series of white diagonal lines of varying lengths and thicknesses, located in the bottom right corner of the slide, creating a modern, abstract graphic element.

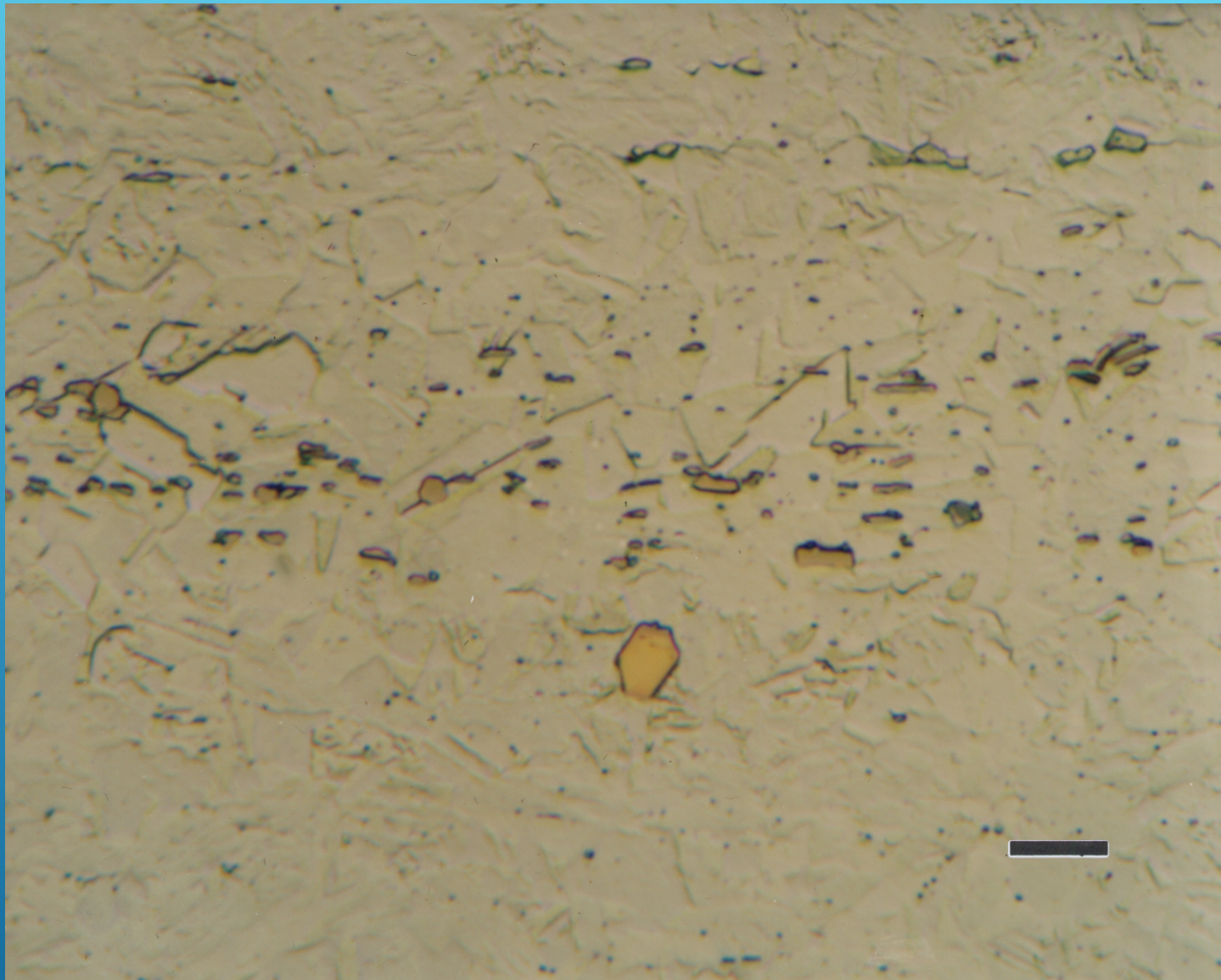
Alumínio (Al)

- ▶ É um importante elemento em aços nitretados.
- ▶ Aumenta a dureza e resistência pelo controle de tamanho de grão (refinador de grãos).
- ▶ É um desoxidante muito comum.
- ▶ Forma inclusões de alumínio (óxido de alumínio)
- ▶ Forte formador de nitreto. Não forma carboneto.
- ▶ Faixa: < 2%



Titânio (Ti)

- ▶ É um importante elemento em aços microligados.
 - ▶ Aumenta a resistência e dureza pelo refinamento de grão.
 - ▶ Forte formador de carboneto e **nitreto**.
- 

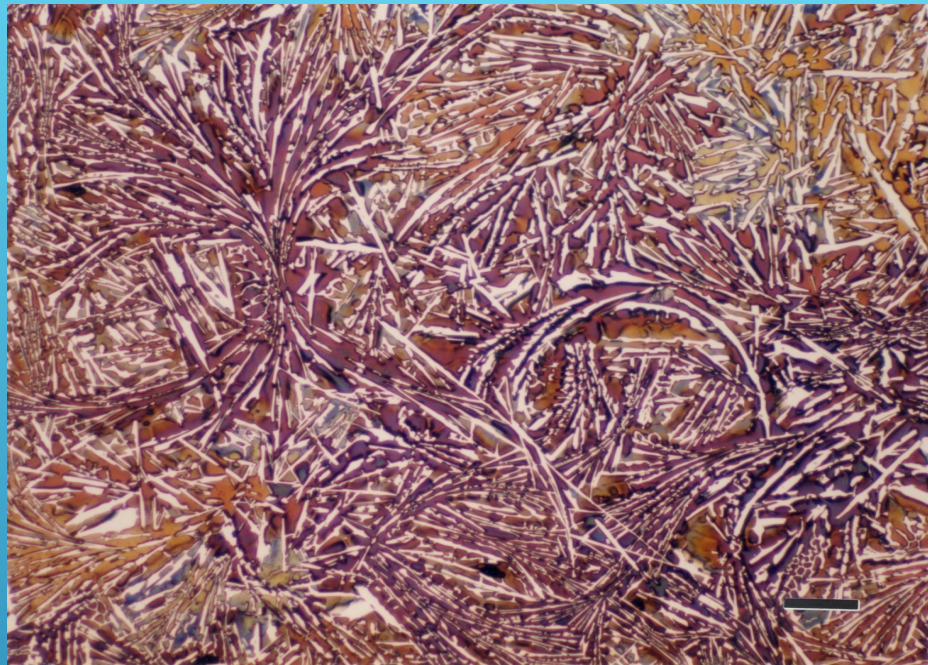


Boro (B)

- ▶ **Aumenta a temperabilidade.**
- ▶ **Faixa: 0.0005 to 0.003%.**

Nitrogênio (N)

- ▶ **Quando adicionados a aços microligados aumentam a quantidade de nitretos com incremento em resistência.**
 - ▶ **Faixa: < 0.1%.**
- 



AS-CAST MICROSTRUCTURE OF TYPE 304 STAINLESS STEEL CONTAINING 2% B (CR REBALANCED) TINT ETCHED WITH BERAHA'S REAGENT (10% HCL PLUS 1 G/100 ML POTASSIUM METABISULFITE) TO COLOR THE AUSTENITE. THE CHROMIUM BORIDE, Cr_2B , IS UNAFFECTED. MAGNIFICATION BAR IS 50 MM IN LENGTH.

Enxofre (S) e Fósforo (P)

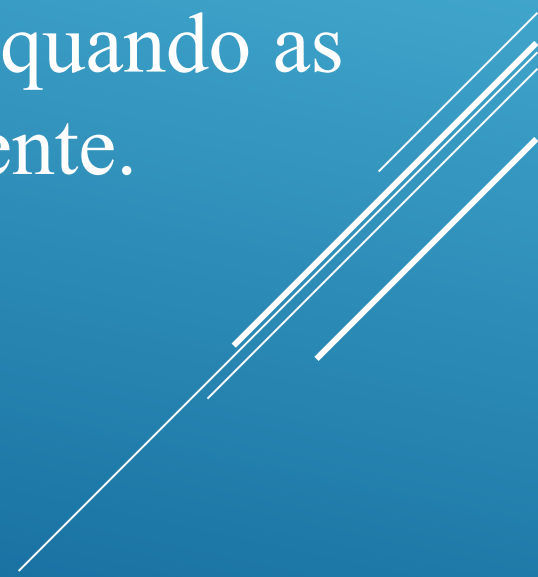
- ▶ **Melhora usinabilidade**
 - ▶ **Reduz soldabilidade, ductilidade e tenacidade.**
 - ▶ **Faixa: $< 0.5\%$.**
- 
- A series of several parallel white diagonal lines in the bottom right corner of the slide, pointing towards the top right.



Em alguns casos Si, S e P são considerados impurezas.

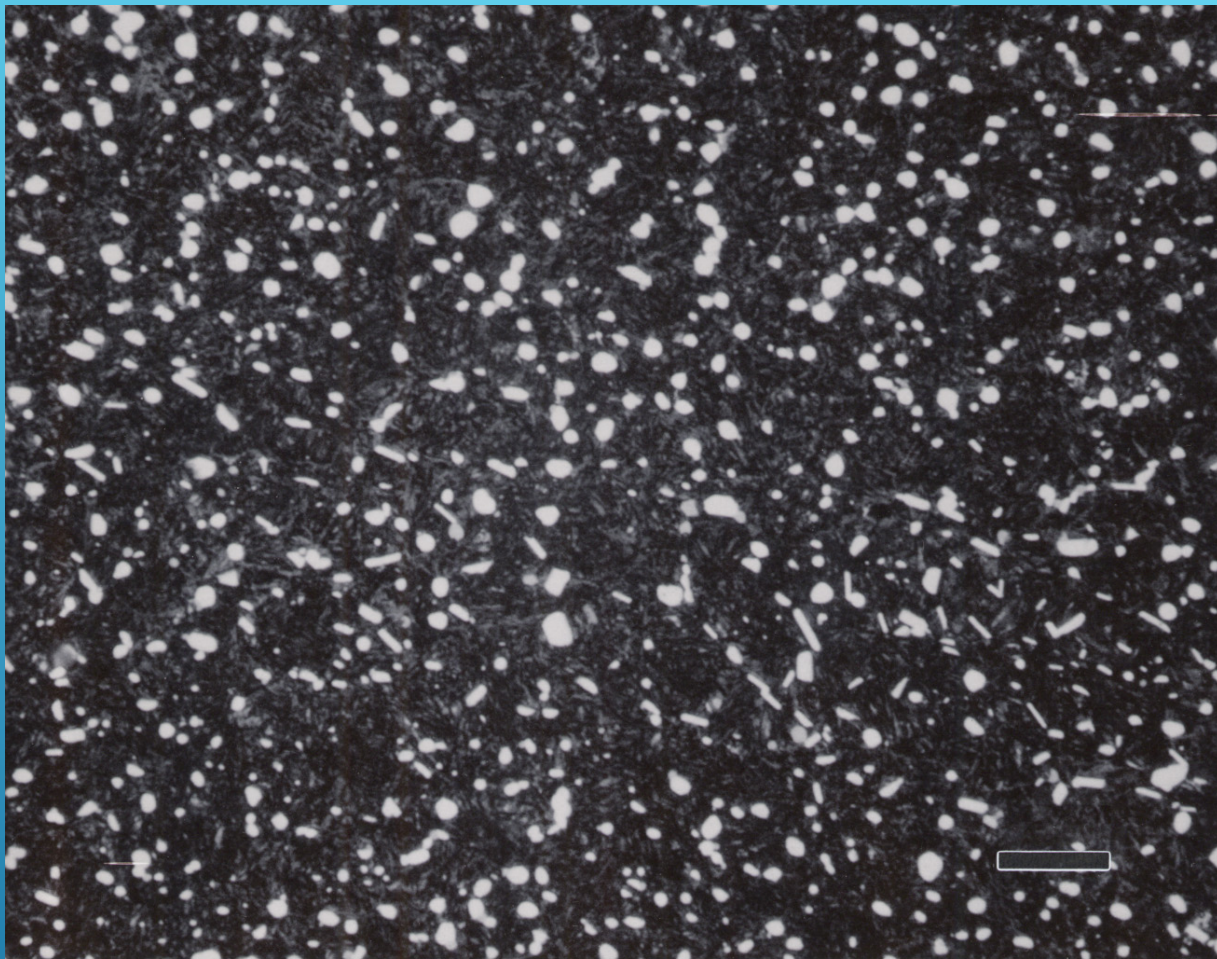
O efeito deles nas propriedades mecânicas dependerão grandemente da maneira como essas impurezas são distribuídas na estrutura do aço.

Efeitos menos prejudiciais acontecem quando as impurezas são distribuídas aleatoriamente.



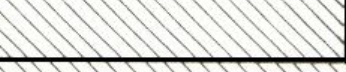
- ▶ **Alguns elementos formam carbonetos muito estáveis quando adicionados ao aço.**
 - ▶ **Isso é um efeito endurecedor dando ao aço proteção quanto ao desgaste.**
 - ▶ **Ao lado do Cr, Mo, V, há outros como Ti, Nb e W.**
- 
- A series of white diagonal lines of varying lengths and thicknesses, located in the bottom right corner of the slide, creating a modern, abstract graphic element.

- ▶ Alguns deles formam carbonetos bastante duros na microestrutura, como por ex.: Cr_7C_3 , W_2C , Mo_2C e VC.
- ▶ Outros formam carbonetos complexos contendo Fe e outros metais. Por exemplo, M_6C é um carboneto complexo e pode representar por exemplo $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$ e $\text{Fe}_4\text{Mo}_2\text{C}$ (M representa o total de átomos metálicos).

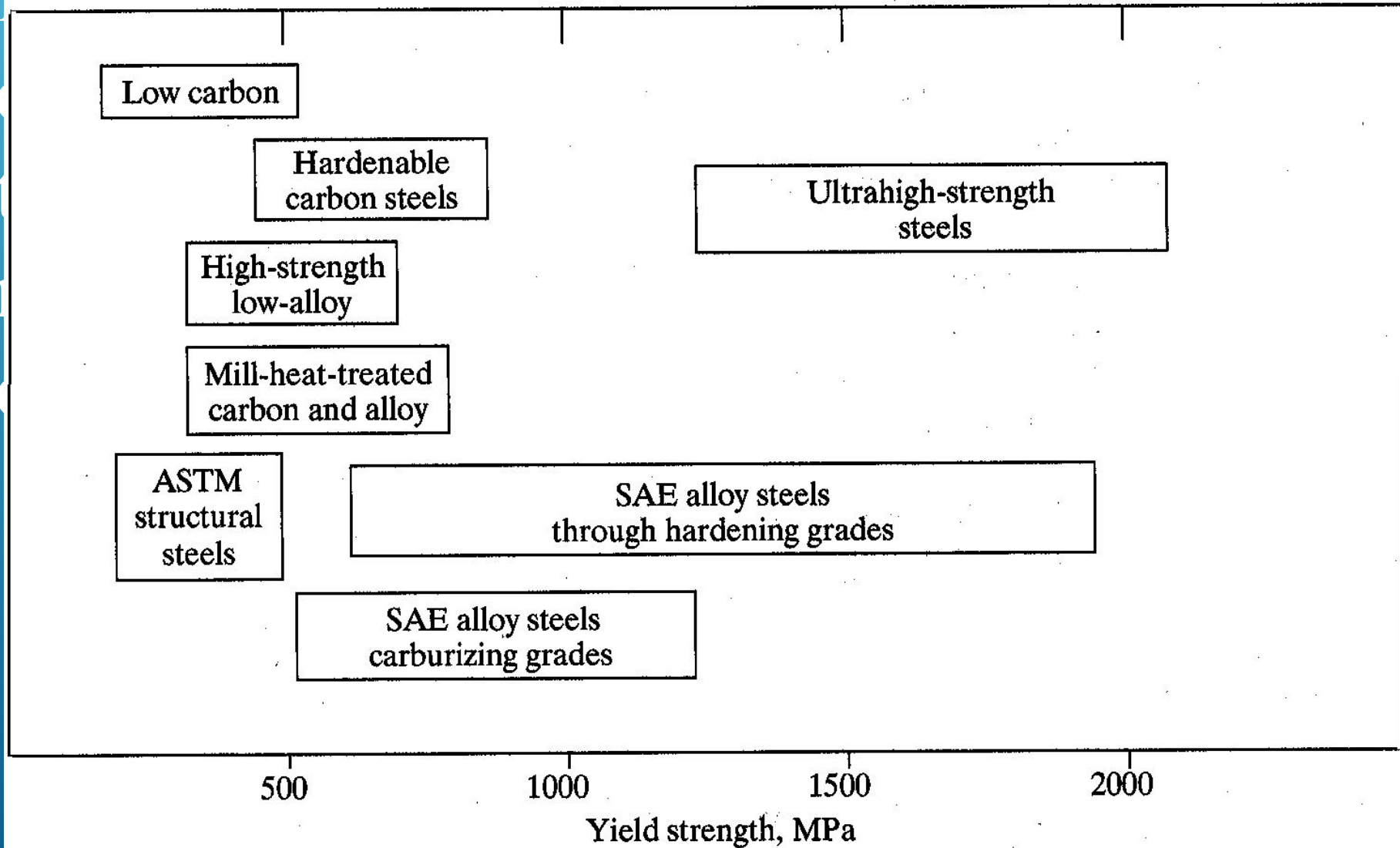


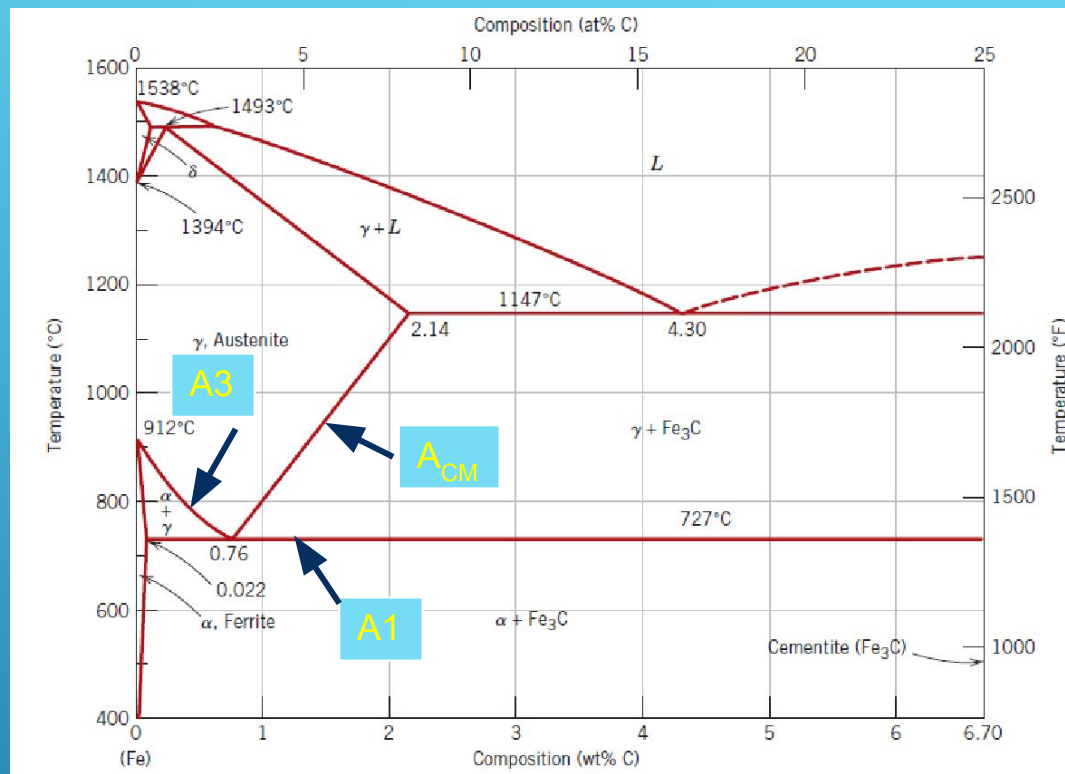
RESIDUAL ALLOY CARBIDE (WHITE PARTICLES) AND A TEMPERED MARTENSITE MATRIX IN P/M M42 HIGH SPEED STEEL (FE – 1.1% C – 8.25% CO – 9.5% MO – 1.5% W – 3.75% CR – 1.15% V) AT 68 HRC. ETCHED WITH VILELLA'S REAGENT. MAGNIFICATION BAR IS 10 MM IN LENGTH

Tendência de formação de carbonetos

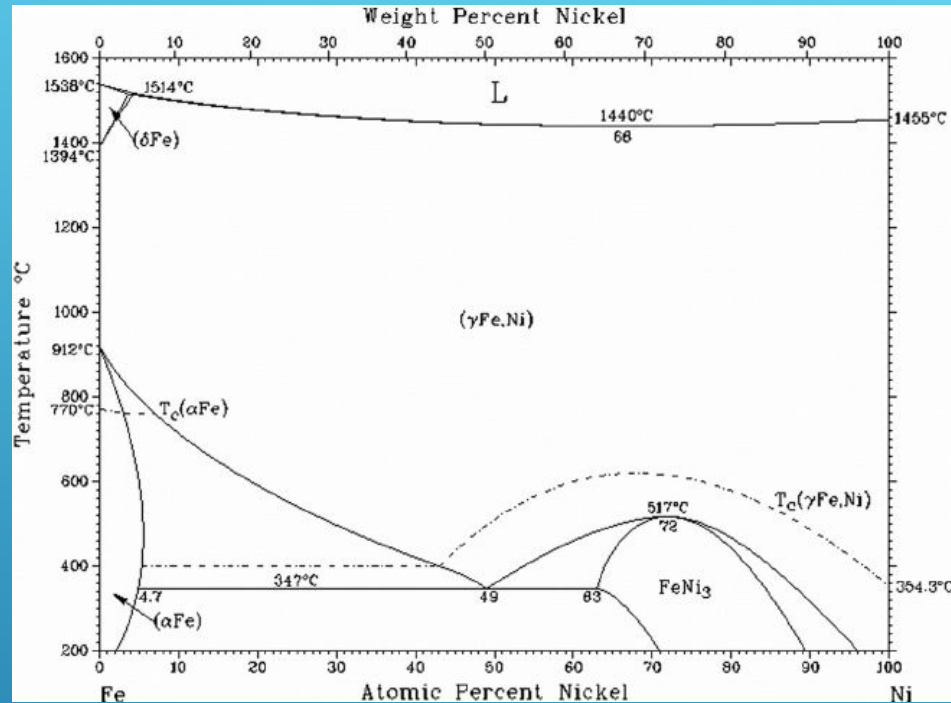
ELEMENT	PROPORTION DISSOLVED IN FERRITE ←	PROPORTION PRESENT AS CARBIDE →	ALSO PRESENT IN STEEL AS
NICKEL			Ni Al ₃
SILICON			—
ALUMINIUM			NITRIDES
MANGANESE			MnS INCLUSIONS
CHROMIUM			—
TUNGSTEN			—
MOLYBDENUM			—
VANADIUM			NITRIDES
TITANIUM			—
NIOBIUM			—
COPPER	SOL. 0.3% MAX		Cu GLOBULES IF > 0.3%
LEAD			Pb GLOBULES

As propriedades mecânicas finais são fortemente influenciadas pela



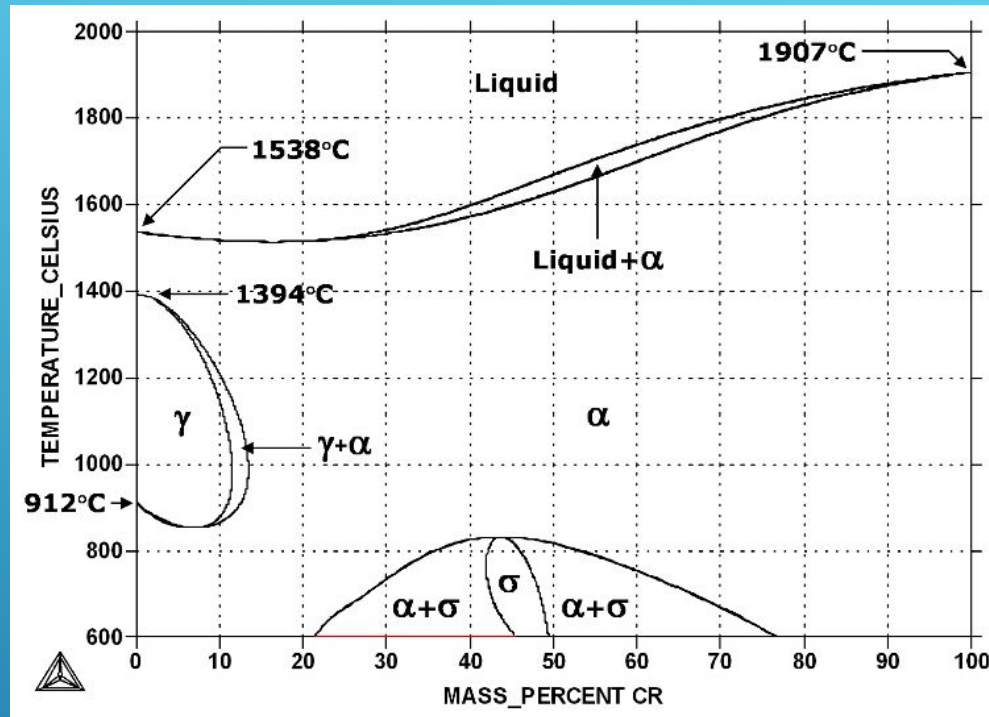


TEMPERATURAS CRÍTICAS MAIS
IMPORTANTES NO DIAGRAMA FE-Fe₃C



- Estabilizam a austenita: C, Mn, Ni

ELEMENTOS AUSTENITIZANTES OU GAMAGÊNICOS



- Estabilizam a ferrita: Cr, Si, Mo, W, Al

ELEMENTOS FERRITIZANTES OU ALFAGÊNICOS

EFEITO DOS ELEMENTOS NO CAMPO AUSTENÍTICO

a) Aberto

Ni, Mn, Co

b) Expandido

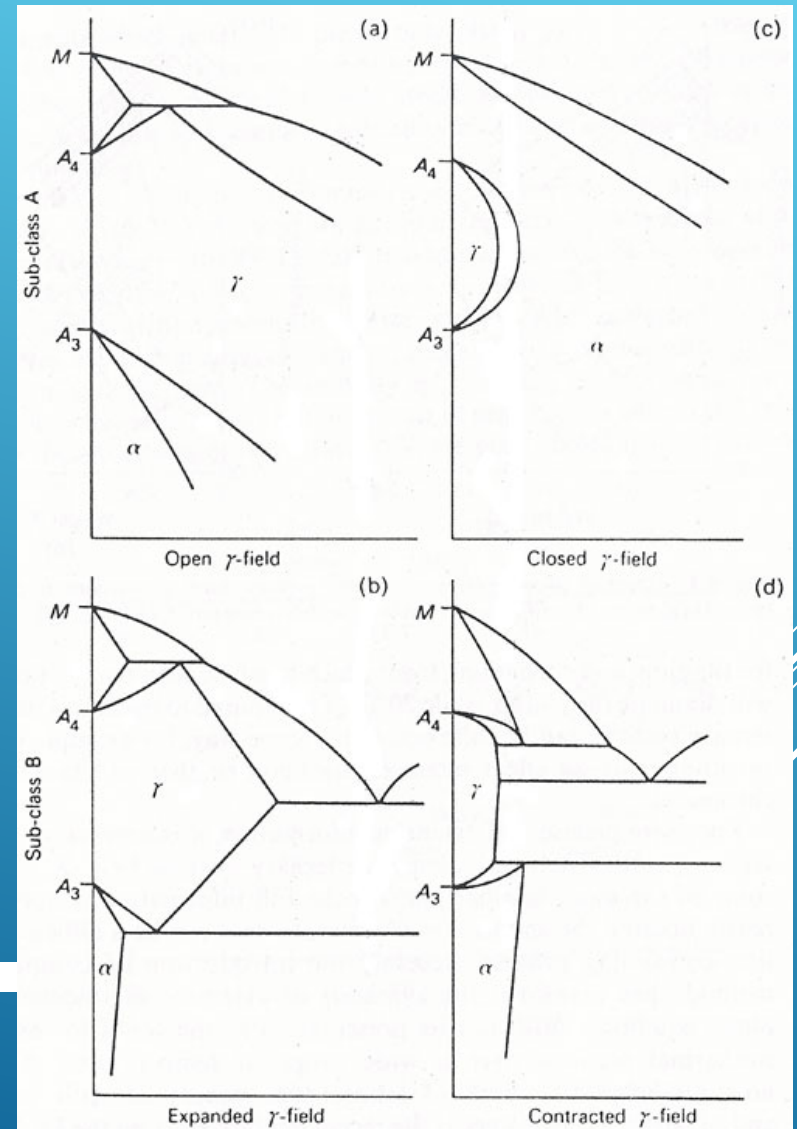
C, N, Cu

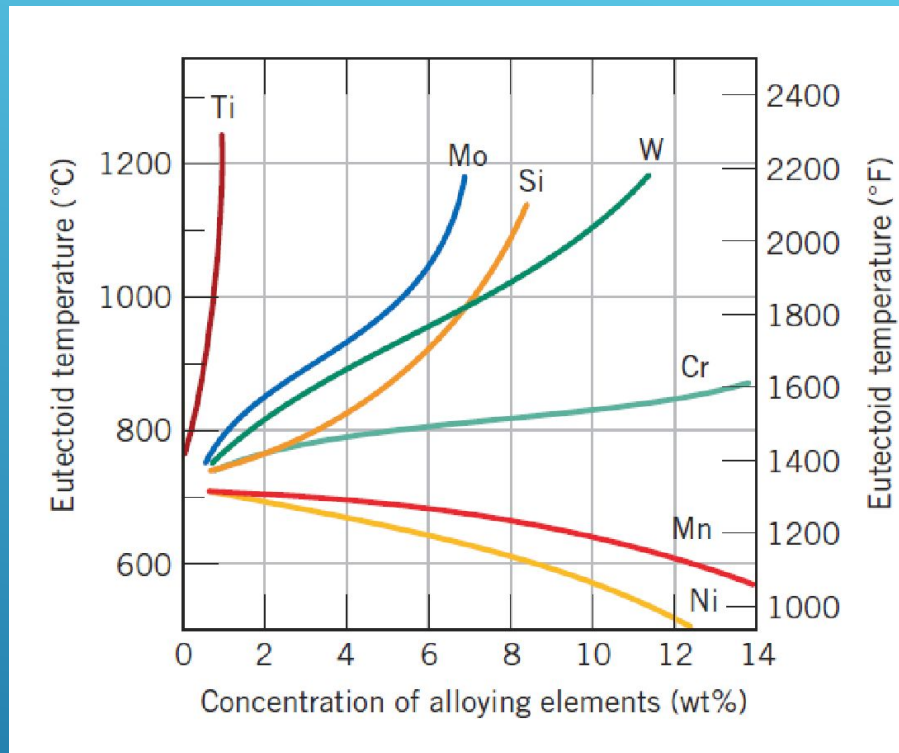
c) Fechado

Cr, Si, Al, P

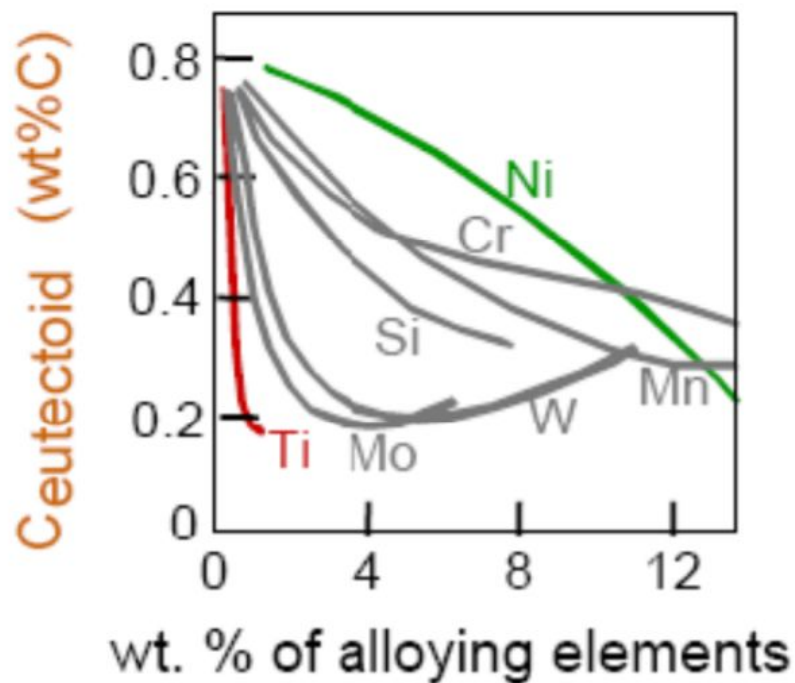
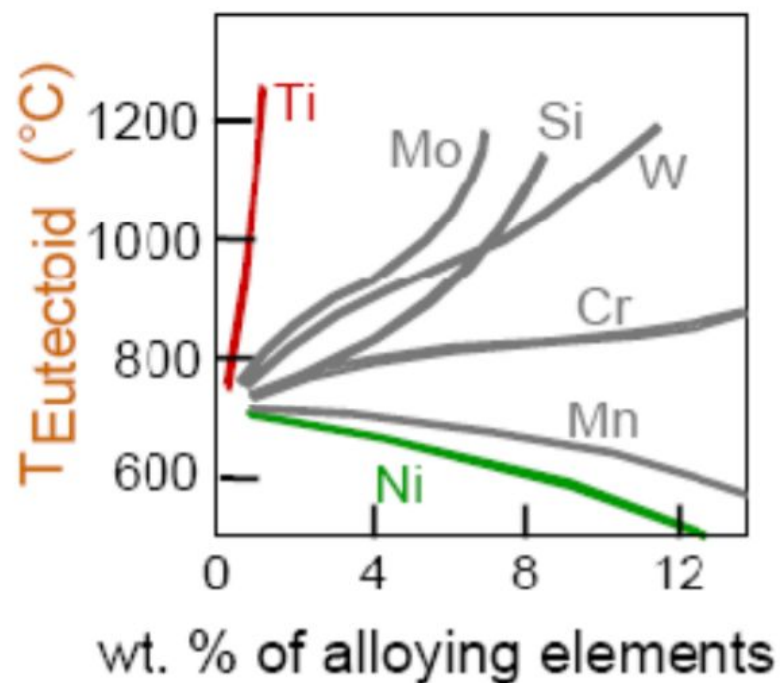
d) Contraído

B, Nb, Ta, Zr





INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA NO DIAGRAMA FE-Fe₃C



$$Ac_1 = 742 - 29 \cdot C - 14 \cdot Mn + 13 \cdot Si + \\ + 16 \cdot Cr - 17 \cdot Ni - 16 \cdot Mo + 45 \cdot V + 36 \cdot Cu$$

$$Ac_3 = 925 - 219 \cdot \sqrt{C} - 7 \cdot Mn + \\ + 39 \cdot Si - 16 \cdot Ni + 13 \cdot Mo + 97 \cdot V$$

$$B_s = 771 - 231.5 \cdot C - 69 \cdot Mn - 23 \cdot Si \\ - 58.5 \cdot Cr - 31 \cdot Ni - 55 \cdot Mo - 41 \cdot V$$

$$M_s = 541 - 401 \cdot C - 36 \cdot Mn \\ - 10.5 \cdot Si - 14 \cdot Cr - 18 \cdot Ni - 17 \cdot Mo$$

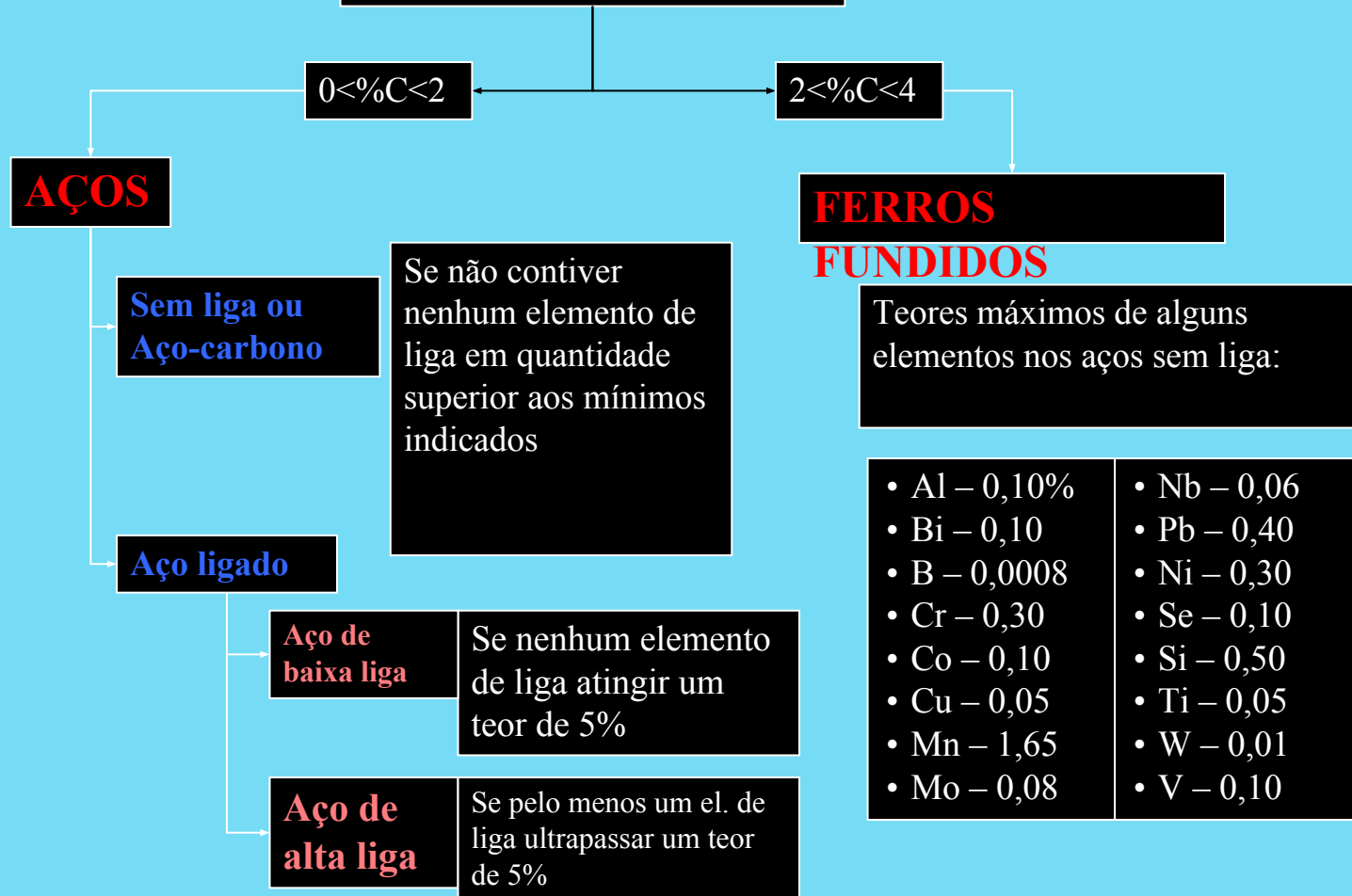
Arch. Metall. Mater., Vol. 61 (2016), No 2B, p. 981–986

DOI: 10.1515/amm-2016-0167

J. TRZASKA*#

CALCULATION OF CRITICAL TEMPERATURES BY EMPIRICAL FORMULAE

LIGAS FERRO-CARBONO



CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

QUANTO

- Composição química
- Estrutura
- Propriedades ou Aplicação

CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

- ▶ **Aço-Carbono** □ - sem elemento de liga

QUANTO A COMPOSIÇÃO

(elementos residuais: Si, Mn, P, S)

Alto, baixo e médio teor de carbono

- ▶ **Aço-Liga**
 - baixa liga (máximo 3-3,5%)
 - média liga
 - alta liga (teor total mínimo de 10-12%)

AÇO-LIGA OU AÇOS LIGADOS

Aços Baixa Liga

> Aços Carbono

- 10xx - comuns (Mn <1%, P < .04 e S < .05, + elementos residuais)
- 11xx - alto S (0,08 a 0,35) para usinabilidade

> Aços Mn

- 13xx - Mn 1,60-1,90
- 15xx - Mn 1,00-1,60

> Aços Ni

- 23xx - Ni 3,25-3,75
- 25xx - Ni 4,75-5,25

> Aços Mo

- 40xx - Mo 0,15-0,30
- 44xx - Mo 0,35-0,45
- 45xx - Mo 0,45-0,60

> Aços Cr

- 50xx - Cr 0,30-0,60
- 51xx - Cr 0,70-1,15
- 501xx- Cr 0,40-0,60
- 511xx- Cr 0,90-1,15
- 521xx- Cr 1,30-1,60

> Aços Si

- 92xx - Si 1,80-2,20

Aços Baixa Liga

> Aços Ni-Cr

➤ 31xx - Ni 1,10-1,40; Cr 0,55-0,75

➤ 33xx - Ni 3,25-3,75; Cr 1,40-1,75

> Aços Ni-Mo

➤ 46xx - Ni 1,65-2,00; Mo 0,20-0,30

➤ 48xx - Ni 3,25-3,75; Mo 0,20-0,30

> Aços Cr-Mo

➤ 41xx - Cr 0,80-1,10; Mo 0,15-0,25

> Aços Cr-V

➤ 61xx - Cr 0,70-1,10; V 0,10-0,15

> Aços Ni-Cr-Mo

Ni Cr Mo

➤ 43xx - 1,65-2,00/0,70-0,90 /0,20-0,30

➤ 47xx - 0,90-1,20/0,35-0,55/0,30-0,40

➤ 86xx - 0,40-0,70/0,40-0,60/0,15-0,25

➤ 87xx - 0,40-0,70/0,40-0,60/0,20-0,30

➤ 93xx - 3,00-3,50/1,00-1,40/0,08-0,15

➤ 98xx - 0,85-1,15/0,70-0,90/0,20-0,30

- ▶ Aços inoxidáveis
- ▶ Aços refratários (resistentes ao calor)
- ▶ Aços para ferramentas

São classificados de maneira diferente

CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS
ALTO TEOR DE LIGA

Aços Inoxidáveis

> Aços inoxidáveis:

- Martensíticos: 403, 410, 414, 416, 420, 422, 431, 440
- Ferríticos: 405, 409, 430, 434, 436, 442, 446, 18-2, 26-1S
- Austeníticos: 301, 302, 303, 304, 309, 310, 316, 317, 321, 347
- Endurecíveis por precipitação: 17-4PH, 15-5PH, 17-7-PH, A286
- Duplex e superduplex: 318, CD4MCu, 325, S32760.



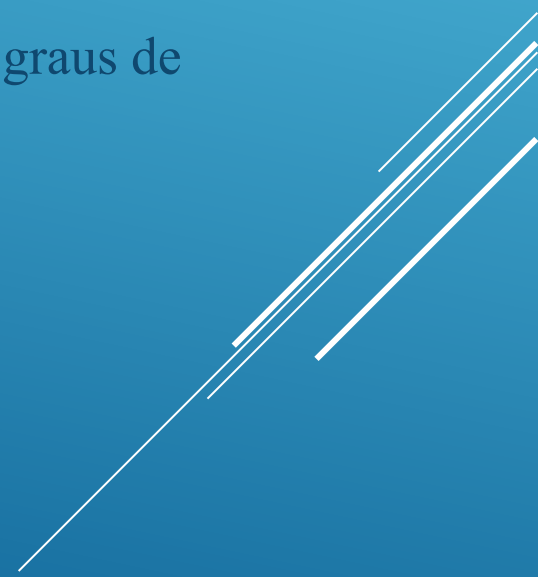


► Bandeamento

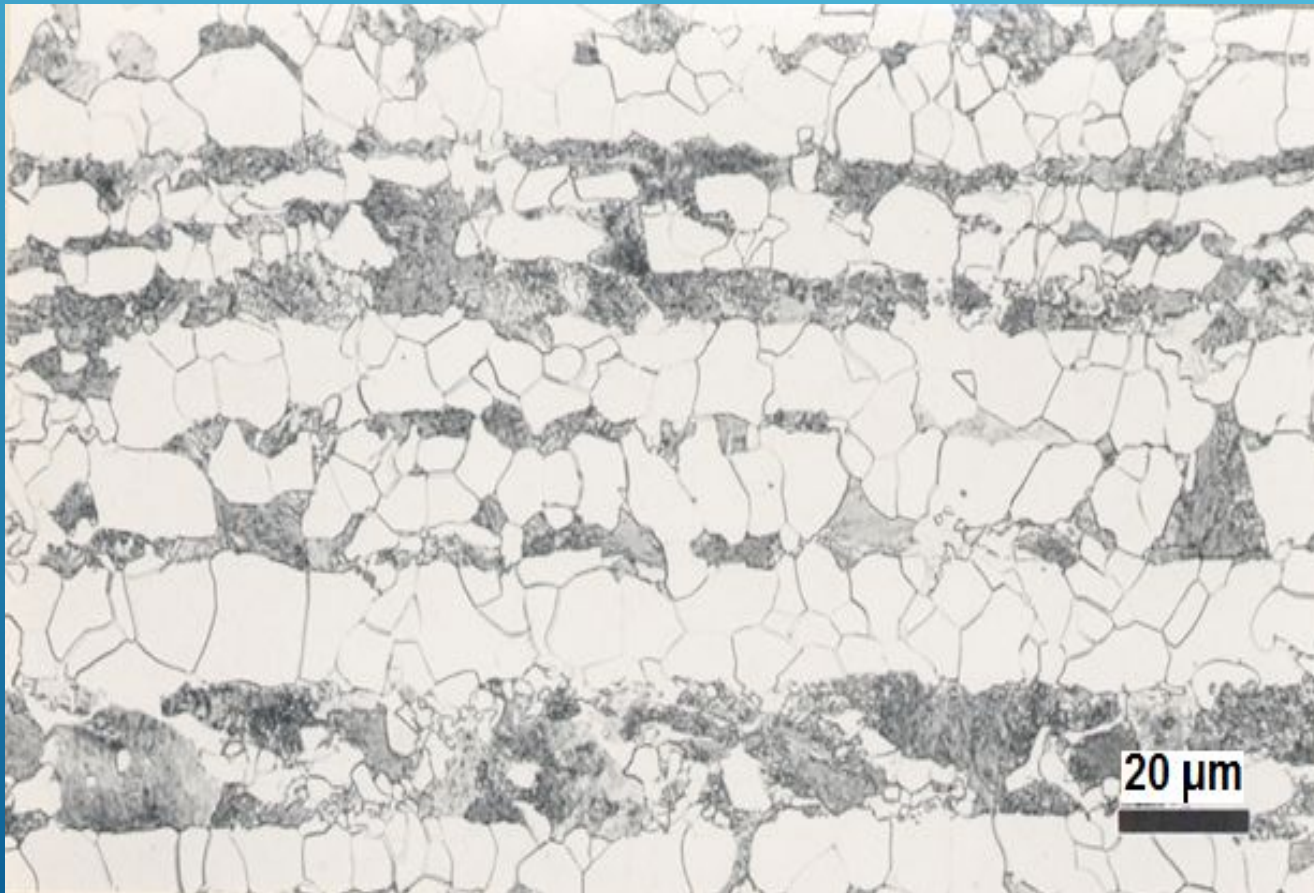
O processo de segregação inicia durante a solidificação da austenita quando o líquido entre as dendritas e os braços das dendritas se tornam mais ricos em termos dos teores de soluto.

Tal processo é chamado de microsegregação e porque acontece a nível do grão, é mais difícil de ser eliminado.

Essa segregação gera o fenômeno de bandeamento. Algum grau de segregação é achado em todos os tipos de aços.

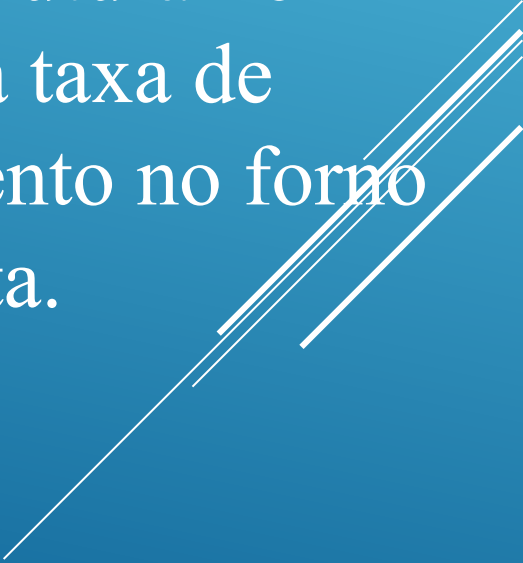


- ▶ Microestrutura de aço laminado a quente Fe – 0.22% C – 0.99% Mn - 0.02% Si – 0.059% Al .
- ▶ Grãos de ferrita equiaxiais e perlita bandeada (plano longitudinal).

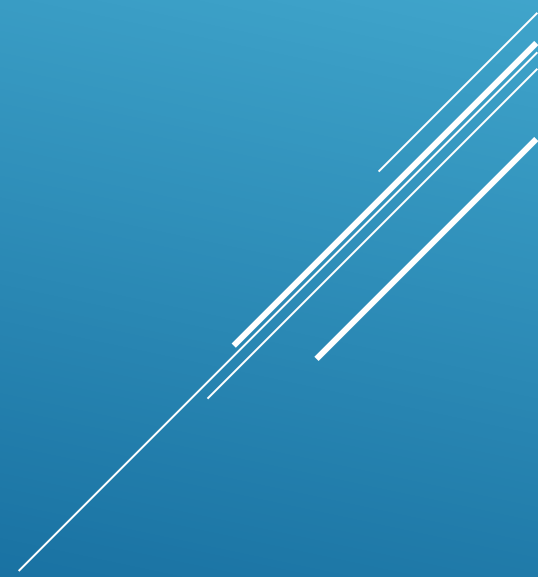


Embora a causa primária do bandeamento seja a microsegregação interdendrítica, a taxa de resfriamento, tamanho de grão austenítico e temperatura de austenitização também influenciam na severidade do bandeamento.

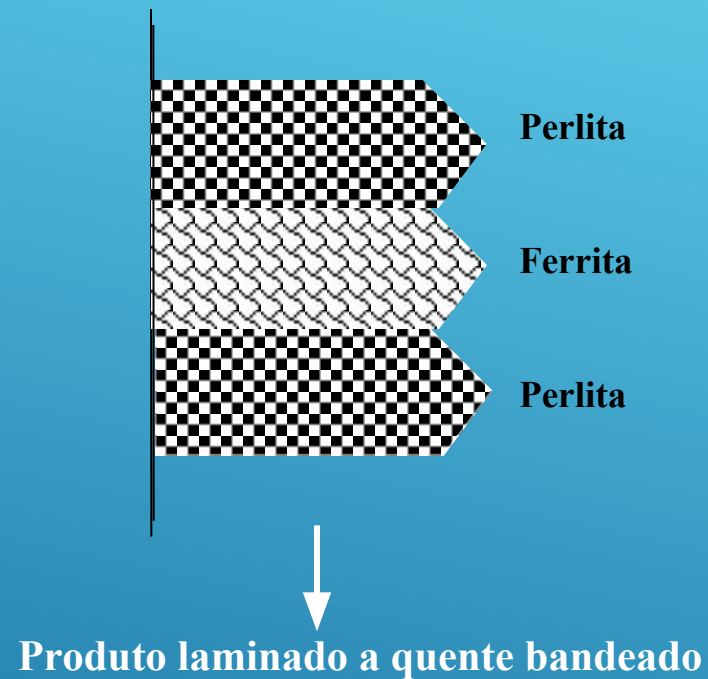
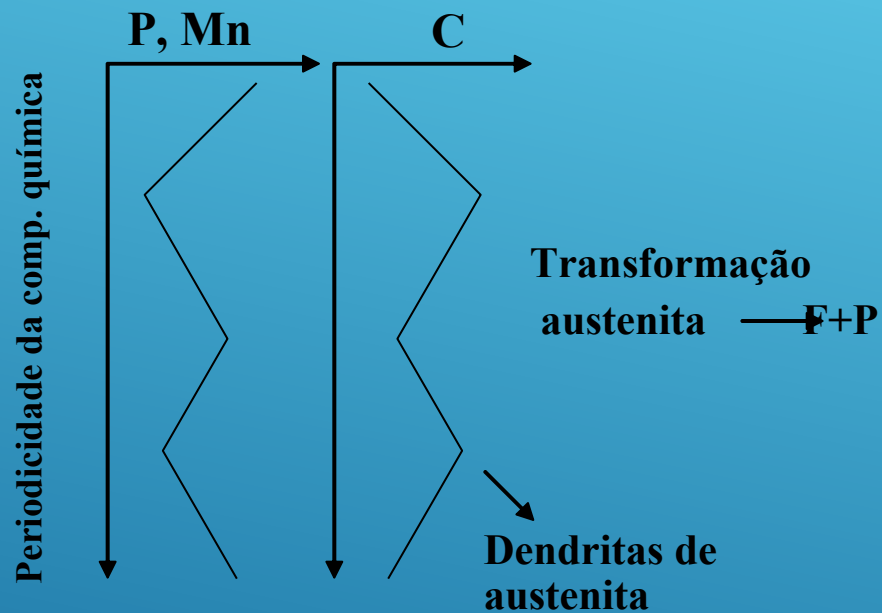
A intensidade do bandeamento microestrutural em aços hipoeutetóides aumenta conforme a taxa de resfriamento diminui. Assim o resfriamento no forno produz intensas bandas de perlita e ferrita.



- Laminação a quente alinha a variação química interdendrítica em bandas paralelas à direção de laminação produzindo regiões alternadas de alta e baixa concentração de vários elementos solutos.



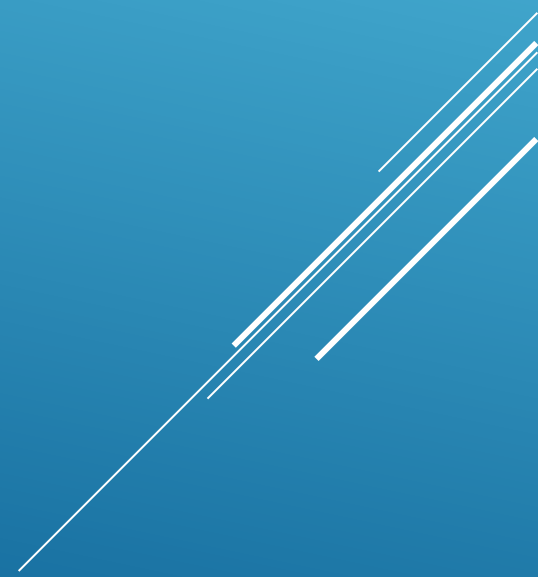
Microsegregação e Bandeamento



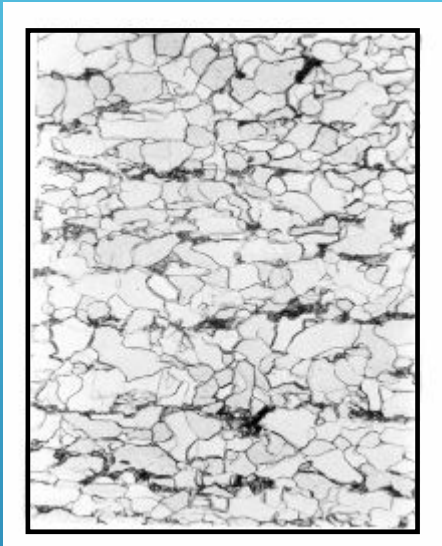
Com um razoável grau de trabalho a quente , cristais interdendríticos são quebrados e recristalizados. As inclusões não são removidas mas podem mudar de tamanho, , morfologia e distribuição.



- ▶ Para reduzir bandejamento, longos tempos e altas temperaturas de homogeneização são sugeridas, removendo gradientes composicionais.



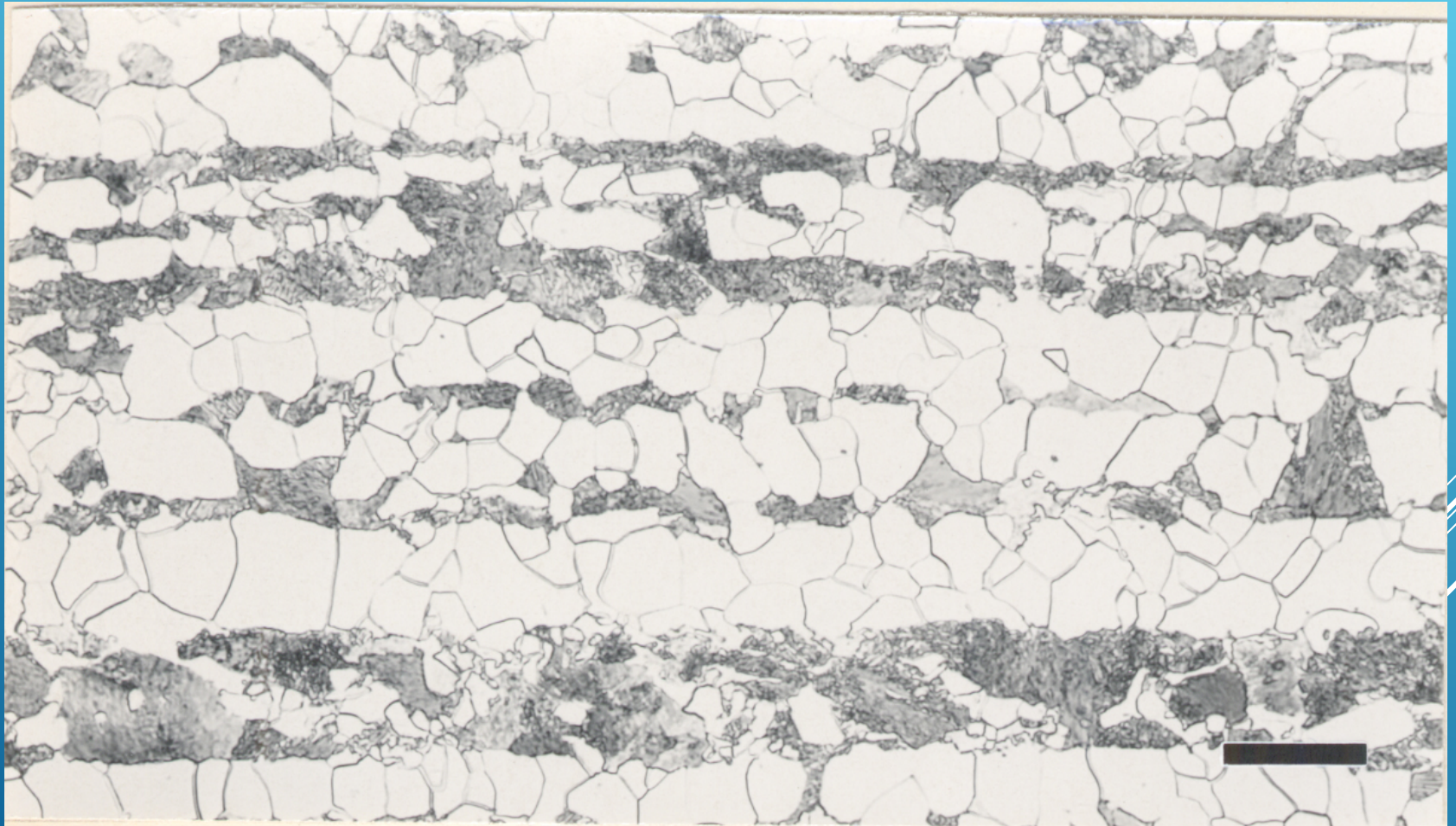
Microestrutura Bandeada

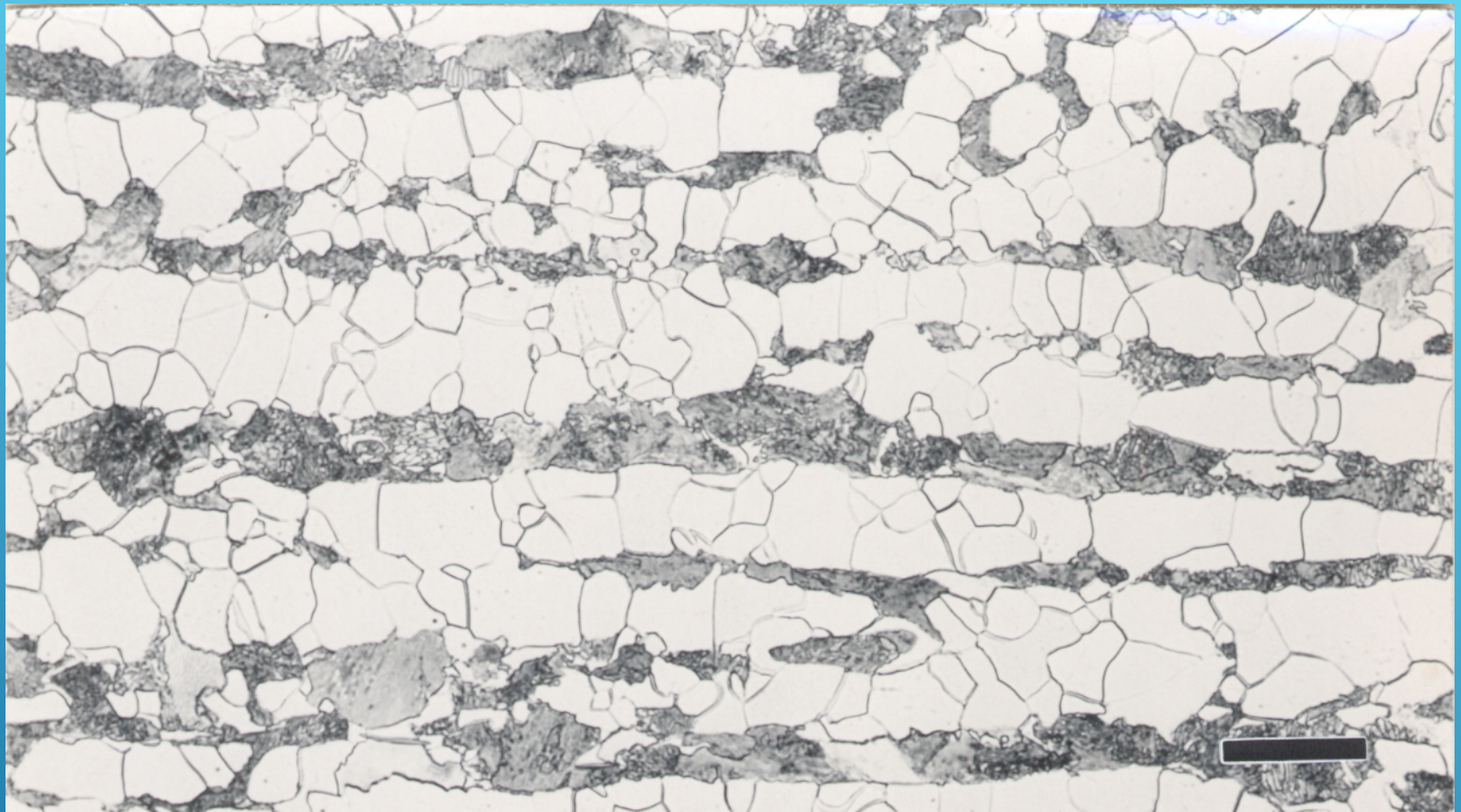


Ferrita-Perlita bandeada
API X 60, C-Mn-Nb-V-Ti

Minimização da Intensidade de Bandeamento

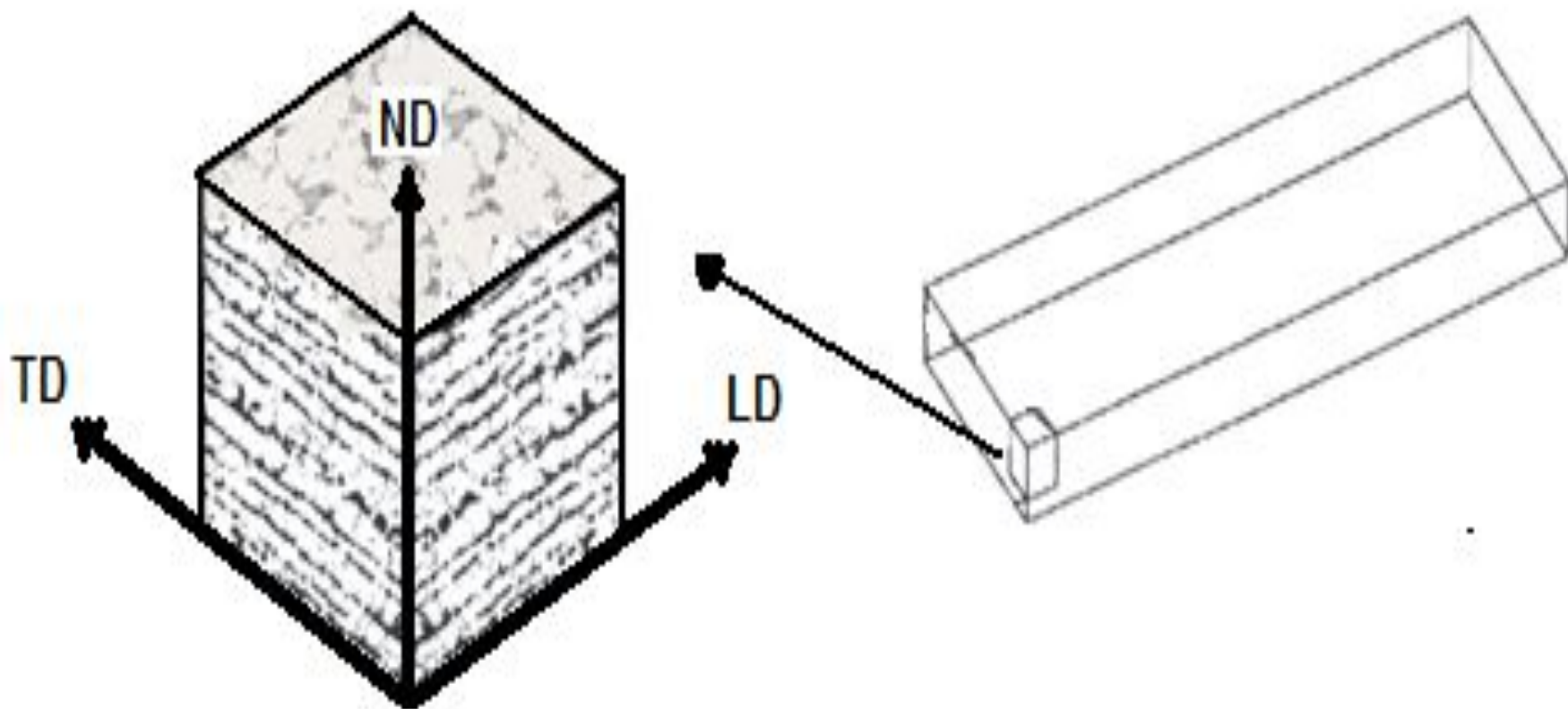
- Redução de teores de C, Mn, P
- Controle de parâmetros de Ling. Contínuo
(superaquecimento, resfriamento secundário)
- Redistribuição de C com resfriamento acelerado após laminação





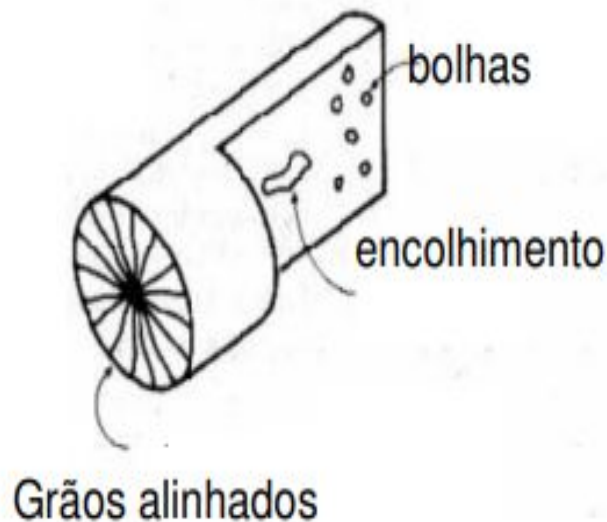
Microstructure of hot rolled Fe – 0.22% C – 0.99% Mn – 0.02% Si – 0.059% Al carbon steel with a finishing temperature of 1400 °F (760 °C). Note the equiaxed ferrite grains and banded (layered) pearlite (top – longitudinal plane, bottom – transverse plane

LD - Longitudinal direction
TD - Transversal direction
ND - Normal direction

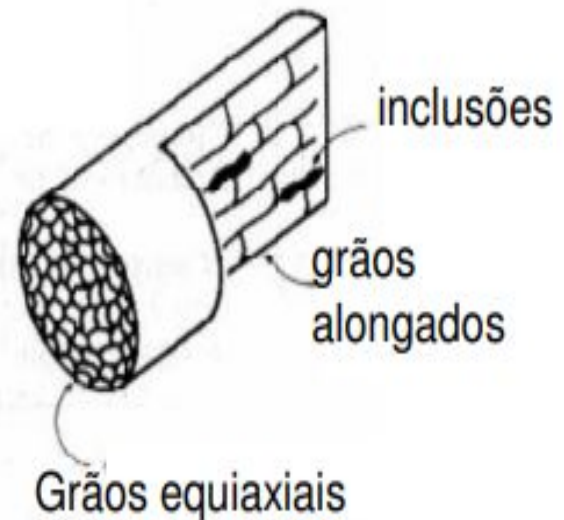


Alguns Detalhes na Observação da Estrutura Segundo Diferentes Cortes

Barra Fundida



Barra Forjada



Observe esquematicamente a diferença na estrutura de grãos segundo corte longitudinal e transversal de uma barra fundida ou forjada.