

SMM0302

Processamento de Materiais I



Solidificação e Fundição



O que é solidificação?

O que é fundição?

- Solidificação:

- transformação de fase: líquido **➔** sólido

- Fundição:

- Produção de peças pela solidificação de metal líquido em moldes
- *Além de "dar forma" às peças determina sua microestrutura e propriedades*

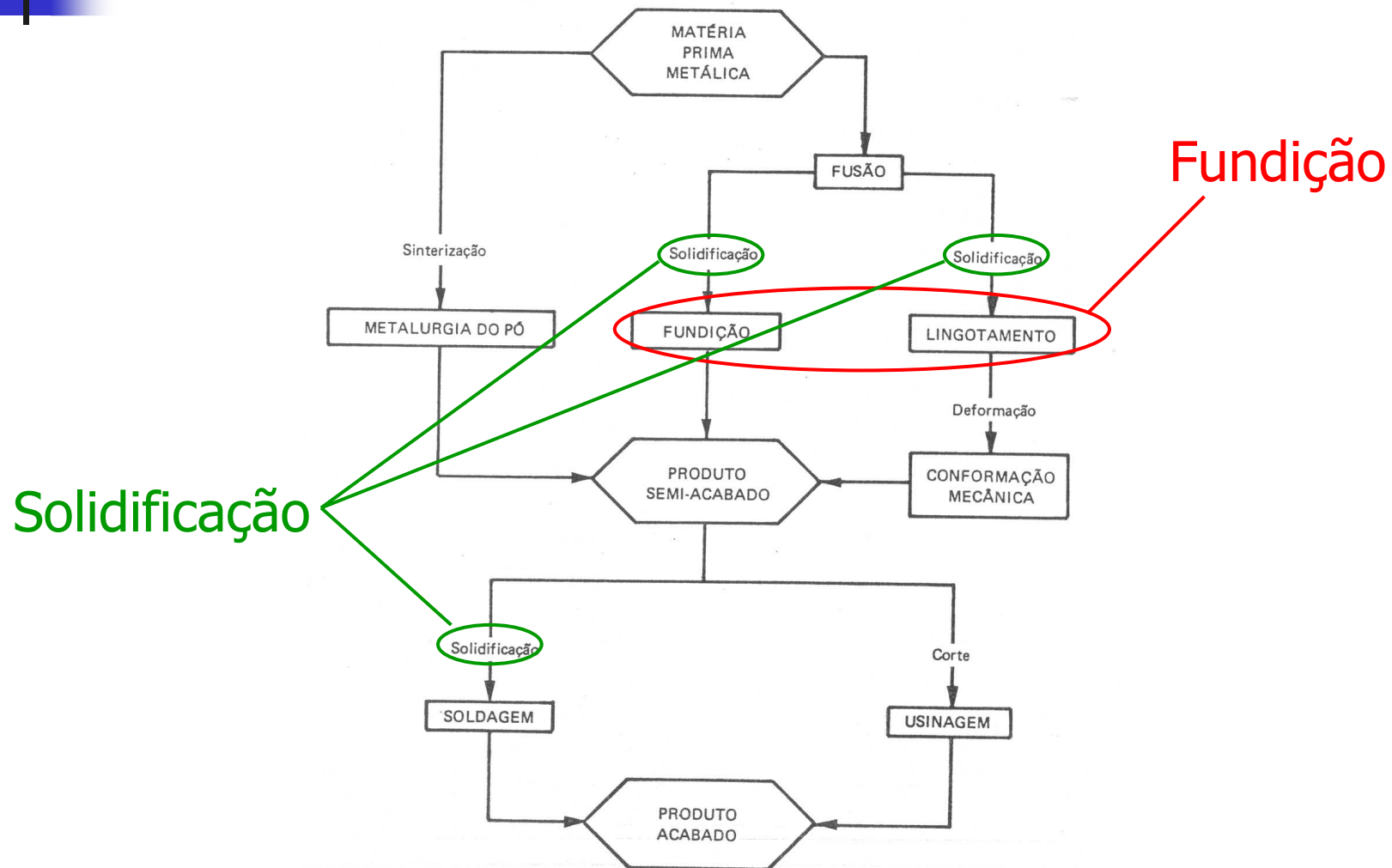


Exemplos de Solidificação e Fundição

Exemplo de Solidificação

Exemplo de Fundição

A fundição e a solidificação nas rotas de fabricação de metais

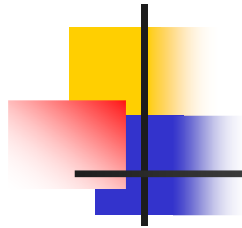


Exemplo de produto fundido



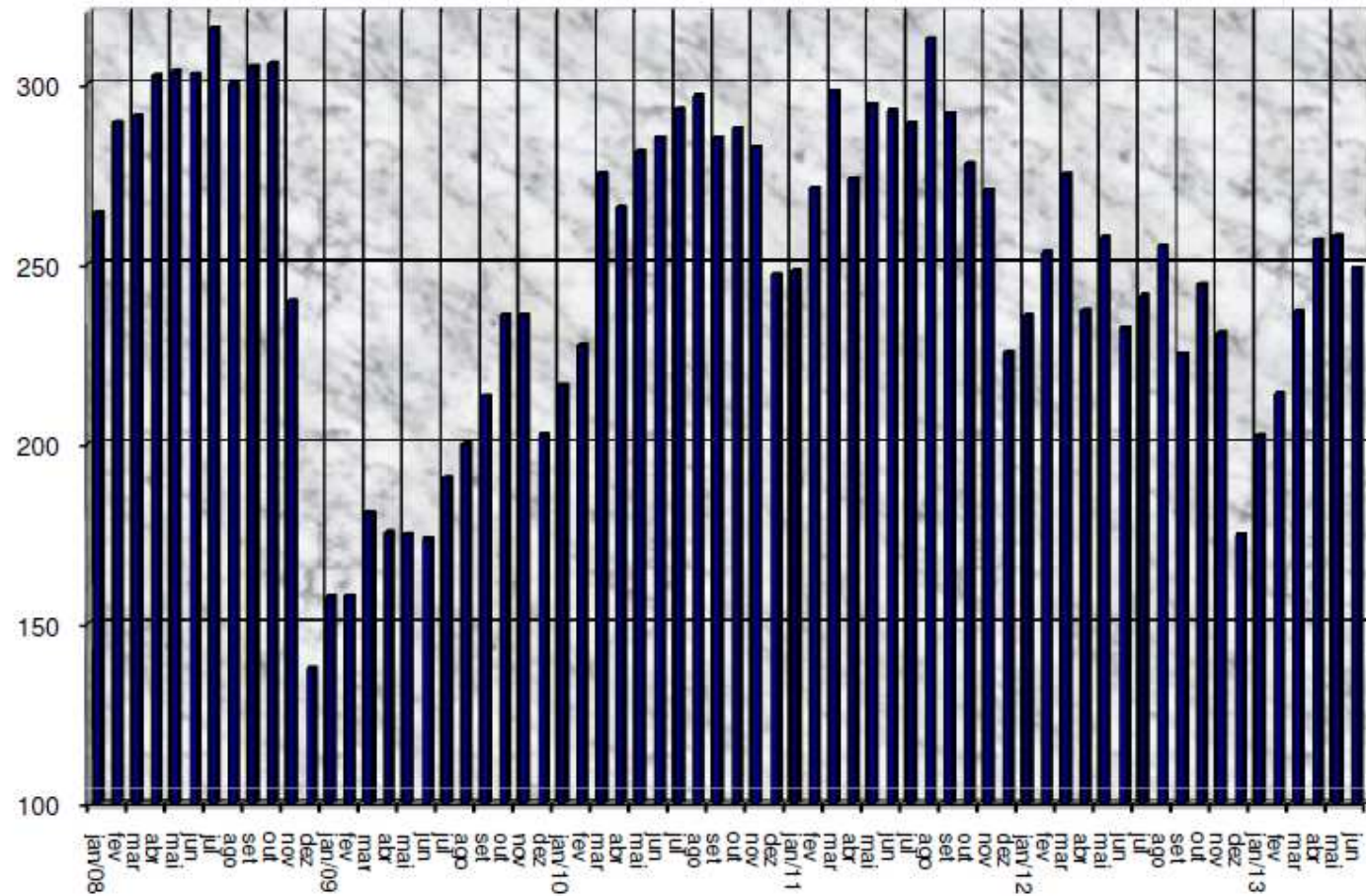
Exemplo de produto fundido





Produção Brasileira

Milhares Toneladas





Produção Brasileira

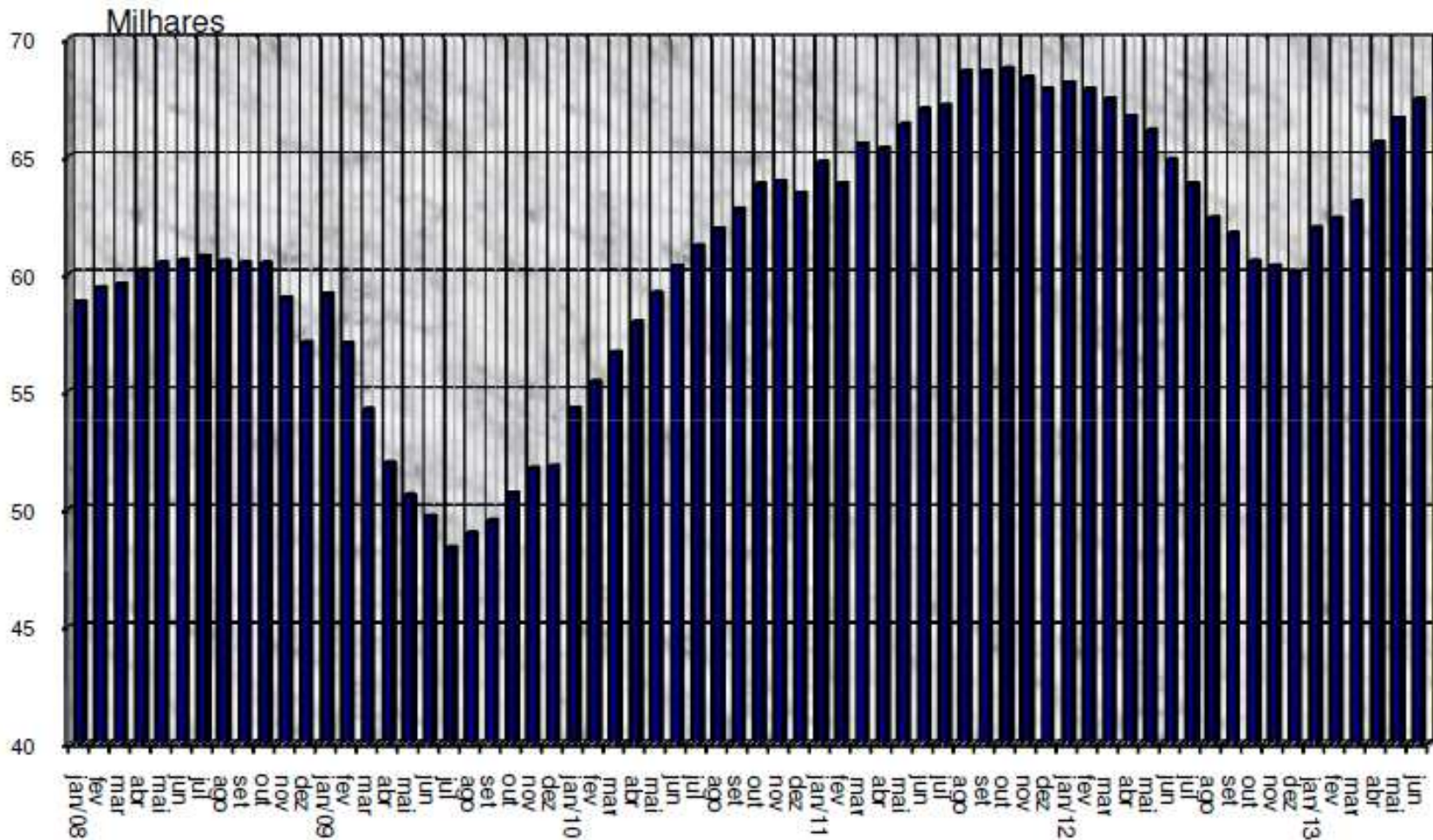
I - PRODUÇÃO DE FUNDIDOS (t)

PERÍODO	JUN/13 (A)	MAI/13 (B)	JUN/12 (C)	A/B %	A/C %	JAN-JUN/13 (D)	JAN-JUN/12 (E)	D/E %
METAL								
83,0% 1- FERRO TOTAL	206.529	212.074	187.481	(2,6)	10,2	1.168.356	1.225.615	(4,7)
7,7% 2- AÇO TOTAL	19.140	20.976	23.595	(8,8)	(18,9)	112.256	139.664	(19,6)
9,2% 3- NÃO FERROSOS	22.988	24.602	20.625	(6,6)	11,5	135.042	124.329	8,6
3.1 - COBRE	2.850	2.616	1.241	8,9	129,7	13.004	7.590	71,3
3.2 - ZINCO	126	290	310	(56,6)	(59,4)	1.594	1.778	(10,3)
7,9% 3.3 - ALUMÍNIO	19.653	21.337	18.774	(7,9)	4,7	118.363	112.979	4,8
3.4 - MAGNÉSIO	359	359	300	-	19,7	2.081	1.982	5,0
4 - TOTAL GERAL	248.657	257.652	231.701	(3,5)	7,3	1.415.654	1.489.608	(5,0)

Aço bruto: ~2.800.000 T jun 2013

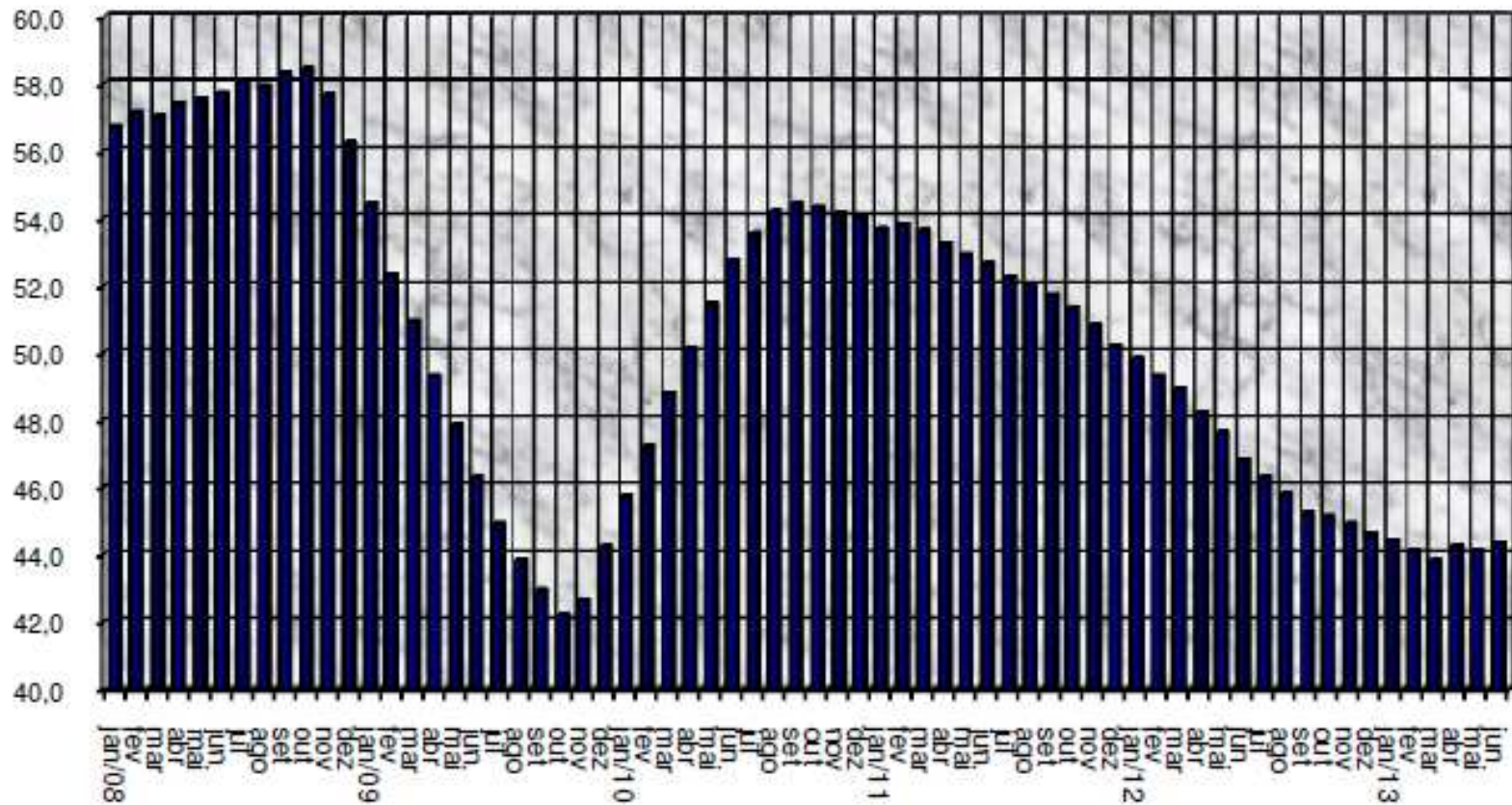
Al primário: ~120.000 T/mês

Pessoal Empregado

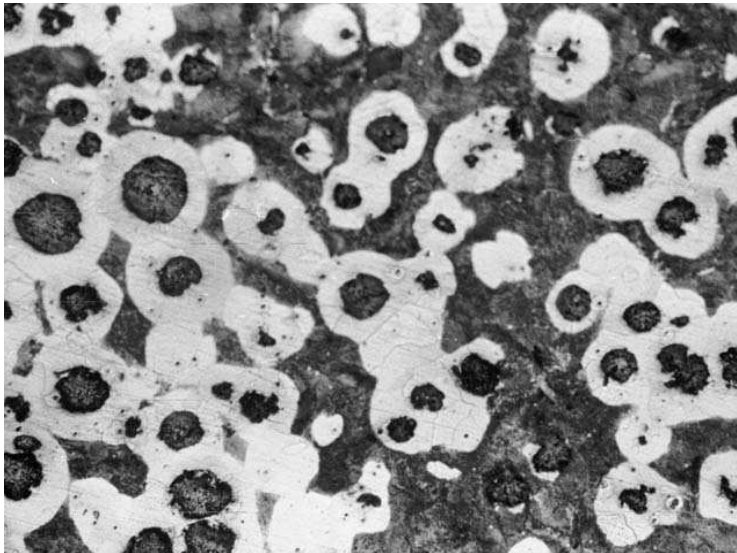


Produtividade

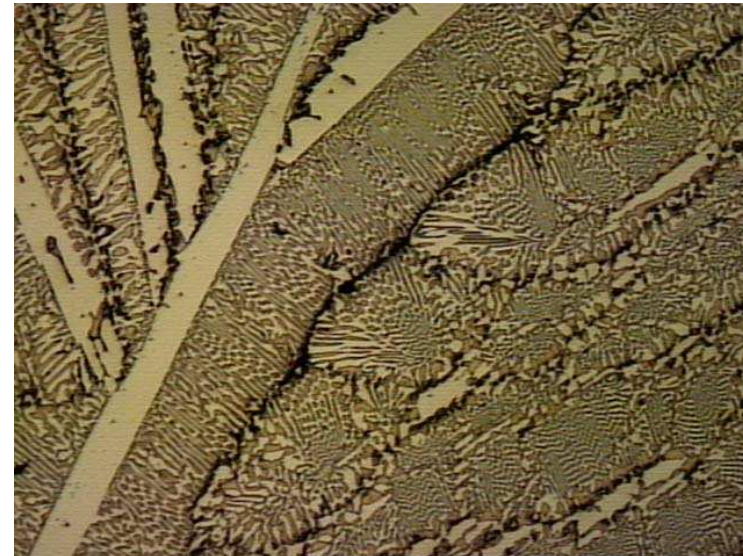
PRODUTIVIDADE t/h ANO



Exemplo de controle da microestrutura do fundido



FoFo nodular



FoFo branco

**DEPENDE DAS CONDIÇÕES DE FUNDIÇÃO
(tipo de molde, T inicial, impurezas, etc.)**

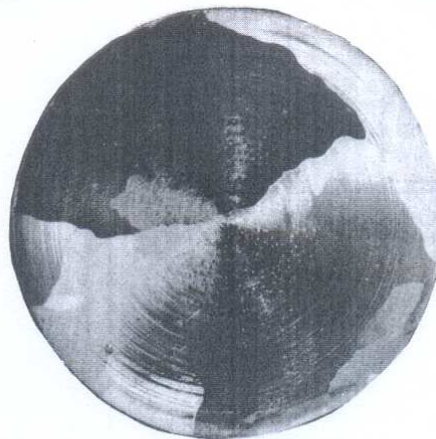
Outro exemplo



(a)



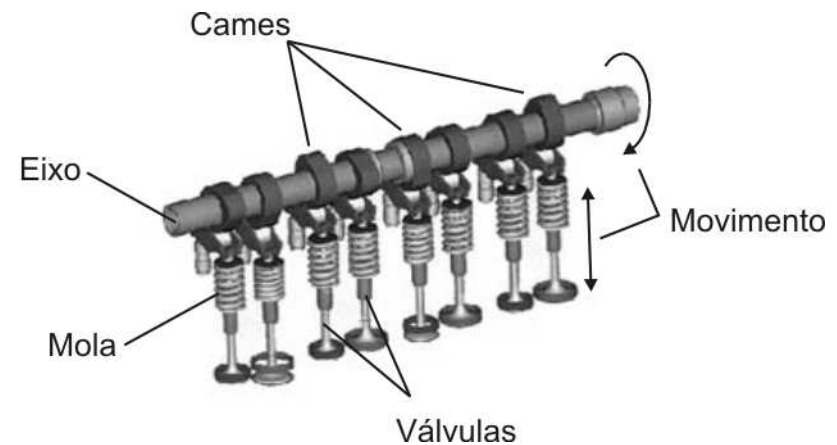
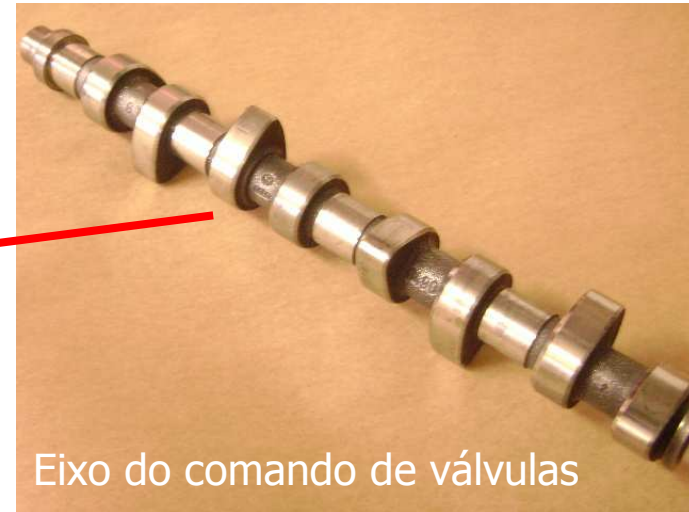
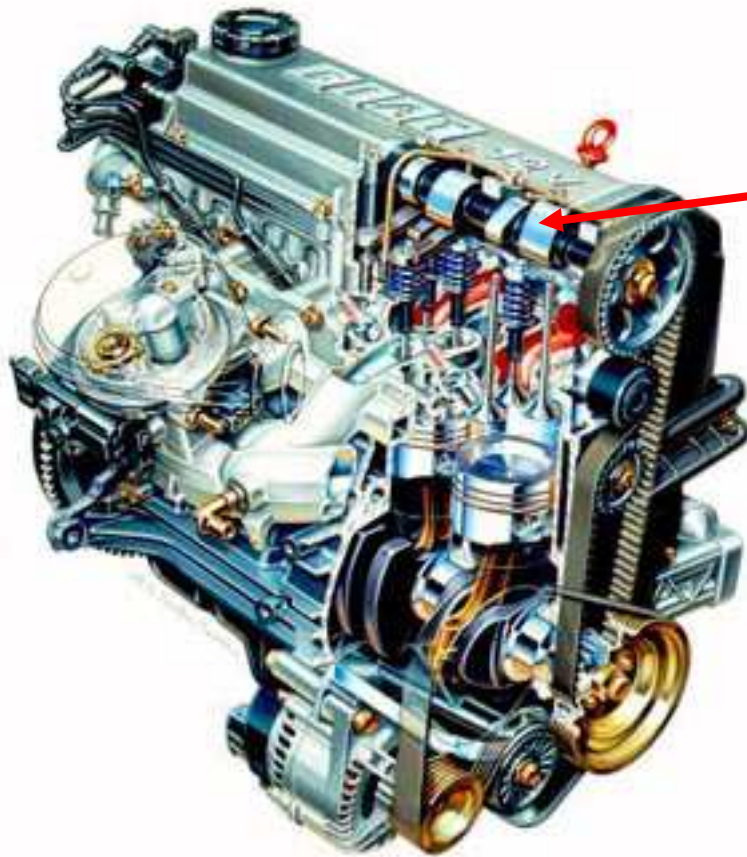
(b)



(c)

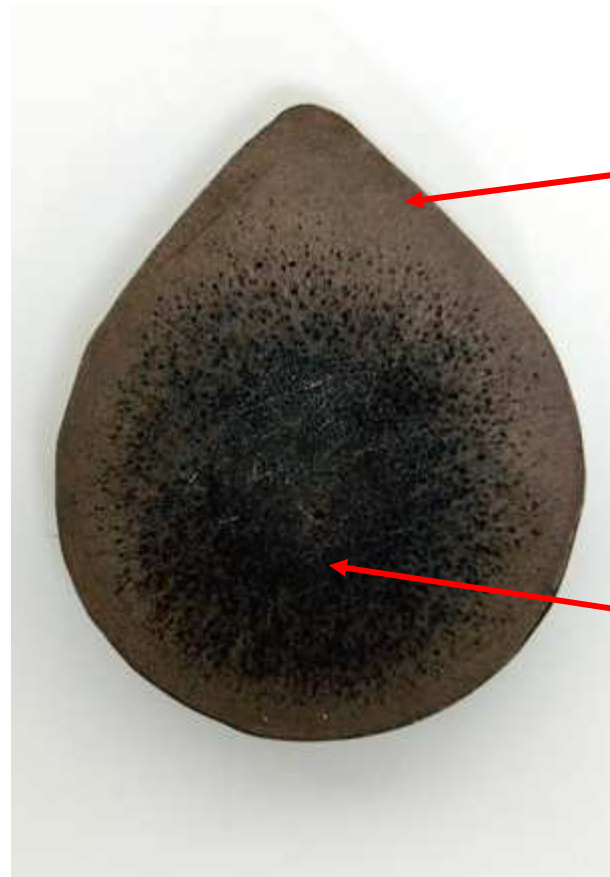
Fig. 5.18 Tamanho de grão da estrutura inicial resultante da solidificação do Alumínio com diferentes contatos térmicos na interface metal/molde: (a) molde polido; (b) molde com revestimento condutor; (c) molde com revestimento isolante.

Exemplo de aplicação do controle da solidificação



Exemplo de aplicação do controle da solidificação

Eixo do comando
em corte
(Macrografia)



FoFo branco

FoFo cinzento



Solidificação

É uma transformação de fase que depende de:

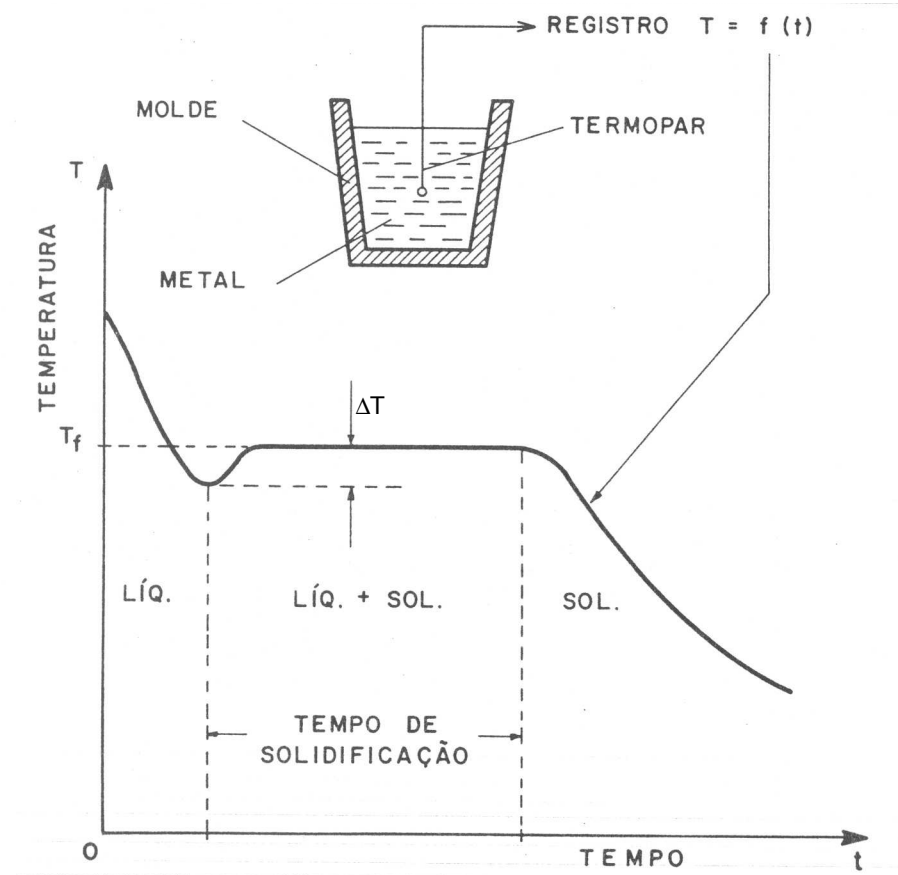
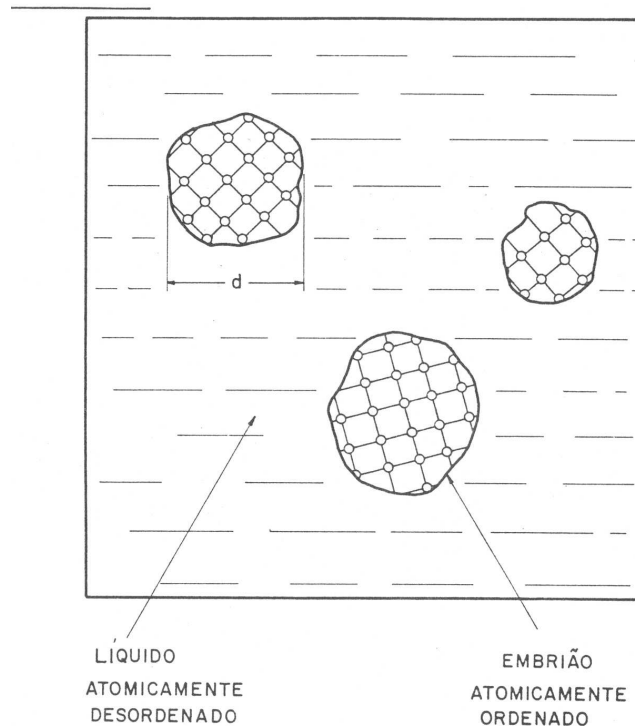
Nucleação e Crescimento



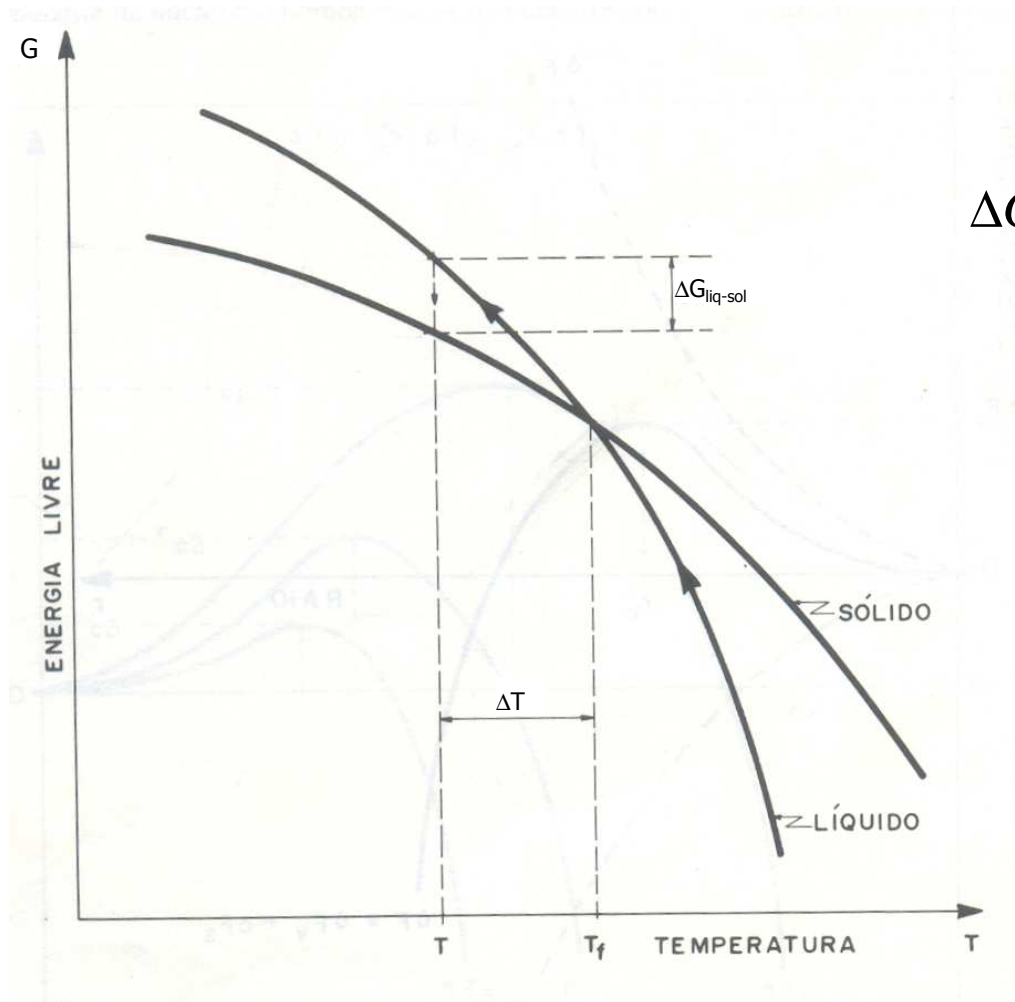
Super-resfriamento Nucleação e Crescimento

- Líquido super-resfriado 1
- Líquido super-resfriado 2

Super-resfriamento Nucleação e Crescimento

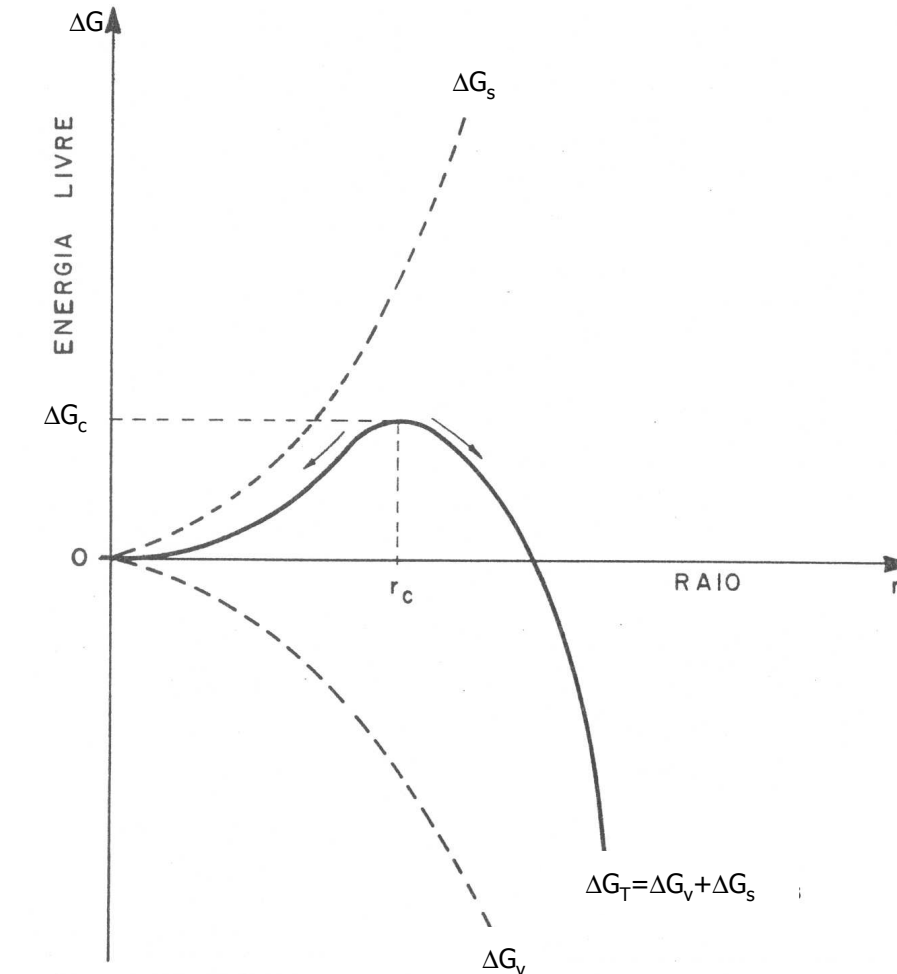


Variação da Energia Livre Líquido - Sólido



$$\Delta G_{liq \rightarrow sol} = -\frac{\Delta H_f \Delta T}{T_f}$$

Nucleação Homogênea



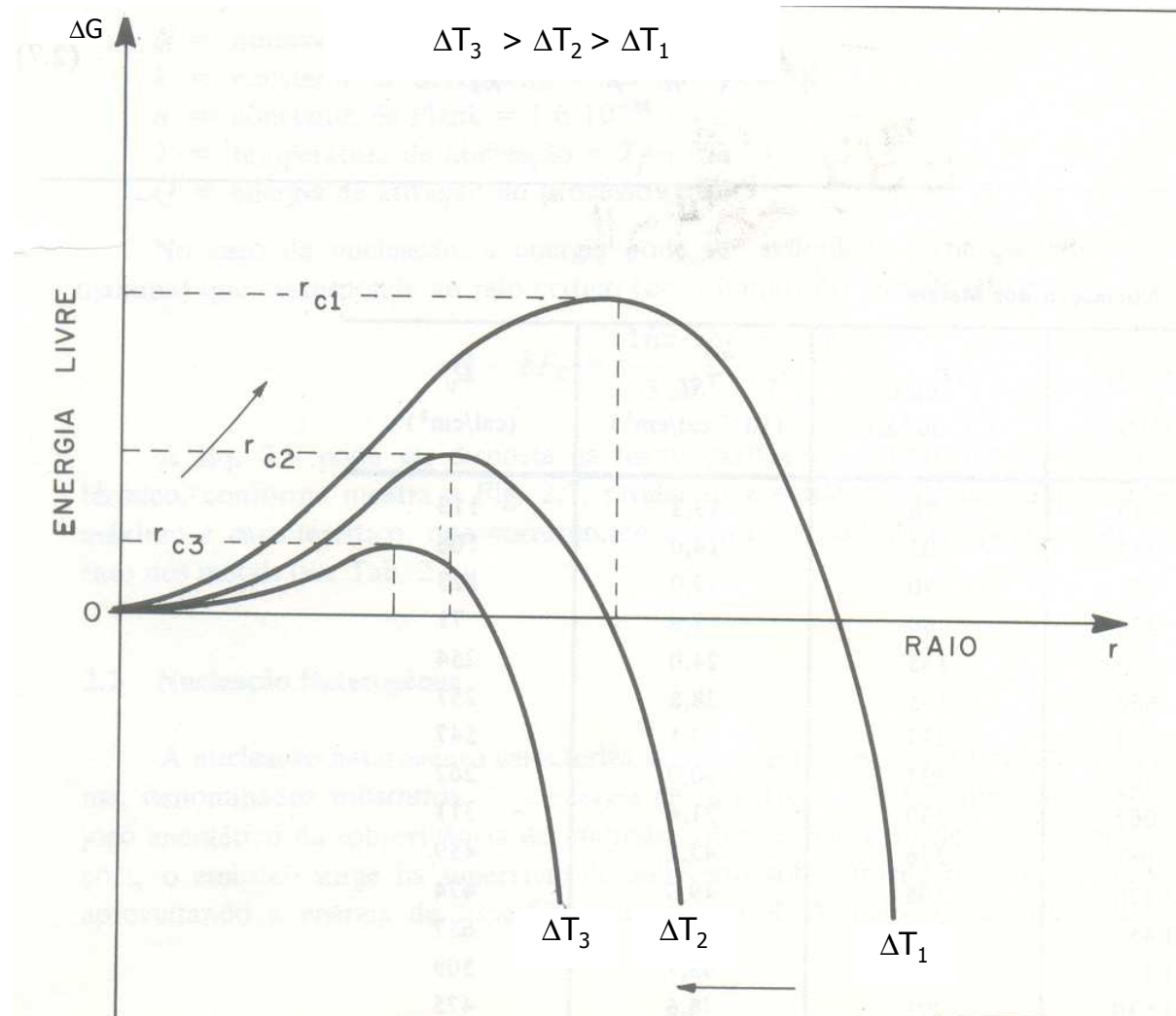
$$\Delta G_v = -\frac{\Delta H_f \Delta T}{T_f} \cdot \frac{4}{3} \pi r^3$$

$$\Delta G_s = \gamma_{SL} \cdot 4\pi r^2 \quad (\text{Filme } \gamma)$$

$$r_c = \frac{2\gamma_{SL} T_f}{\Delta H_f \Delta T}$$

$$\Delta G_c = \frac{16\pi\gamma_{SL}^3 T_f^2}{3\Delta^2 H_f \Delta^2 T} = \frac{4}{3} \pi \gamma_{SL} r_c^2$$

Influência do super-resfriamento no raio crítico e na energia de ativação

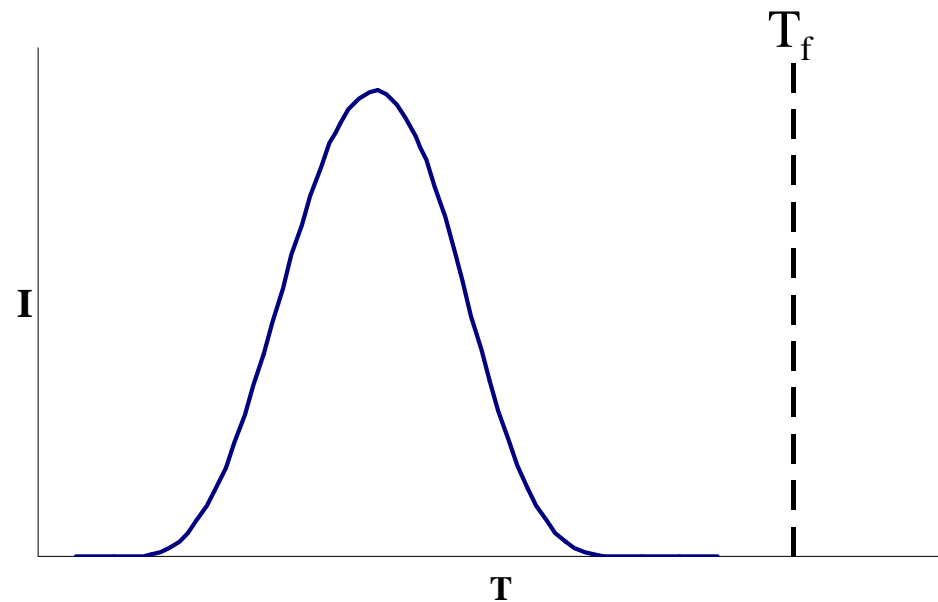


Taxa de Nucleação

Número de núcleos formados por unidade de volume e por unidade de tempo

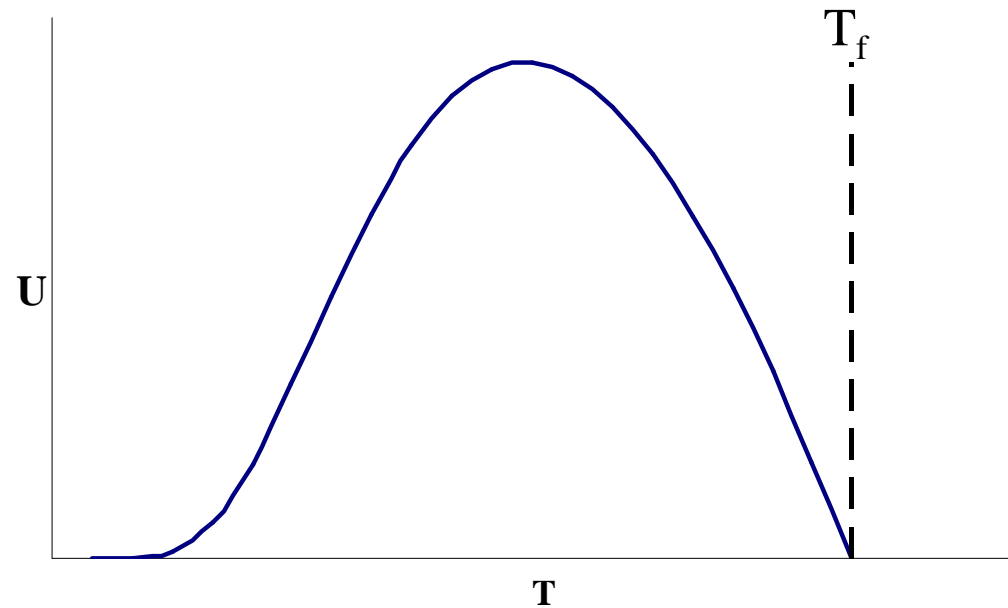
$$I = \frac{C_1}{\eta} \exp\left(\frac{-\Delta G_c}{kT}\right)$$

$$\eta = A' \exp\left(\frac{B}{T - T_0}\right)$$



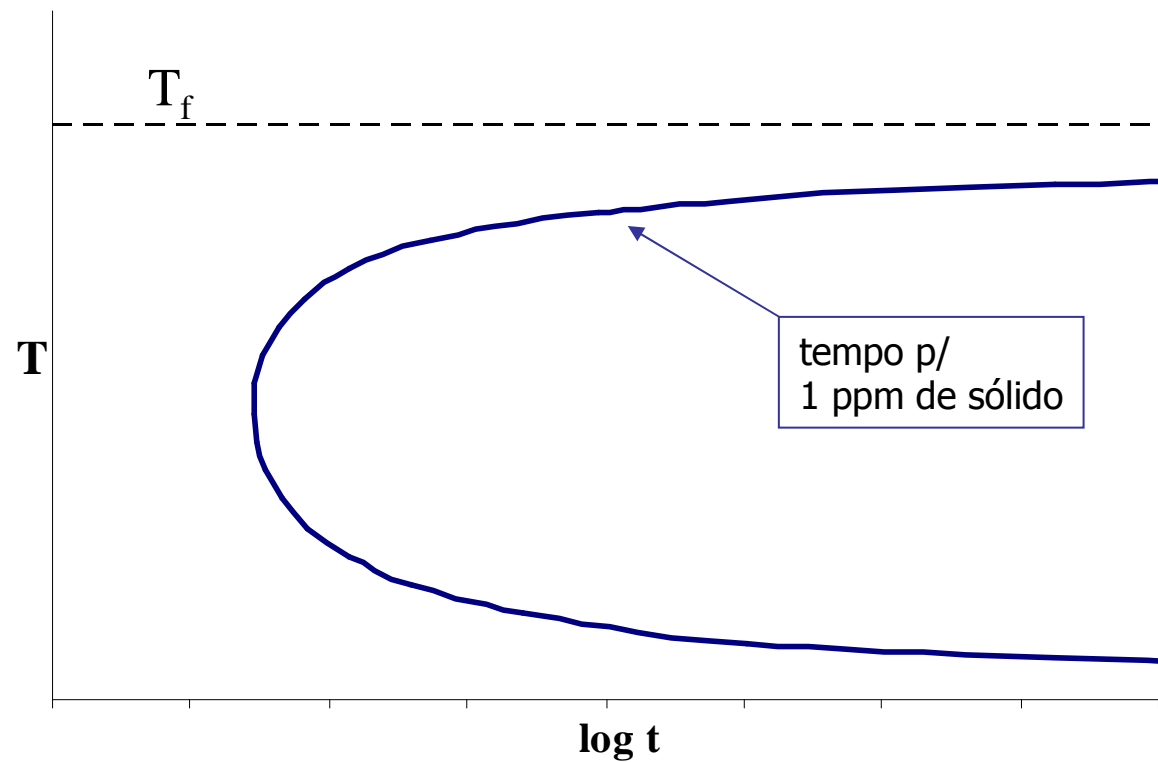
Velocidade de crescimento

$$U = \frac{C_2}{\eta} \left[1 - \exp\left(\frac{-\Delta H_f \Delta T}{T_f k T}\right) \right]$$

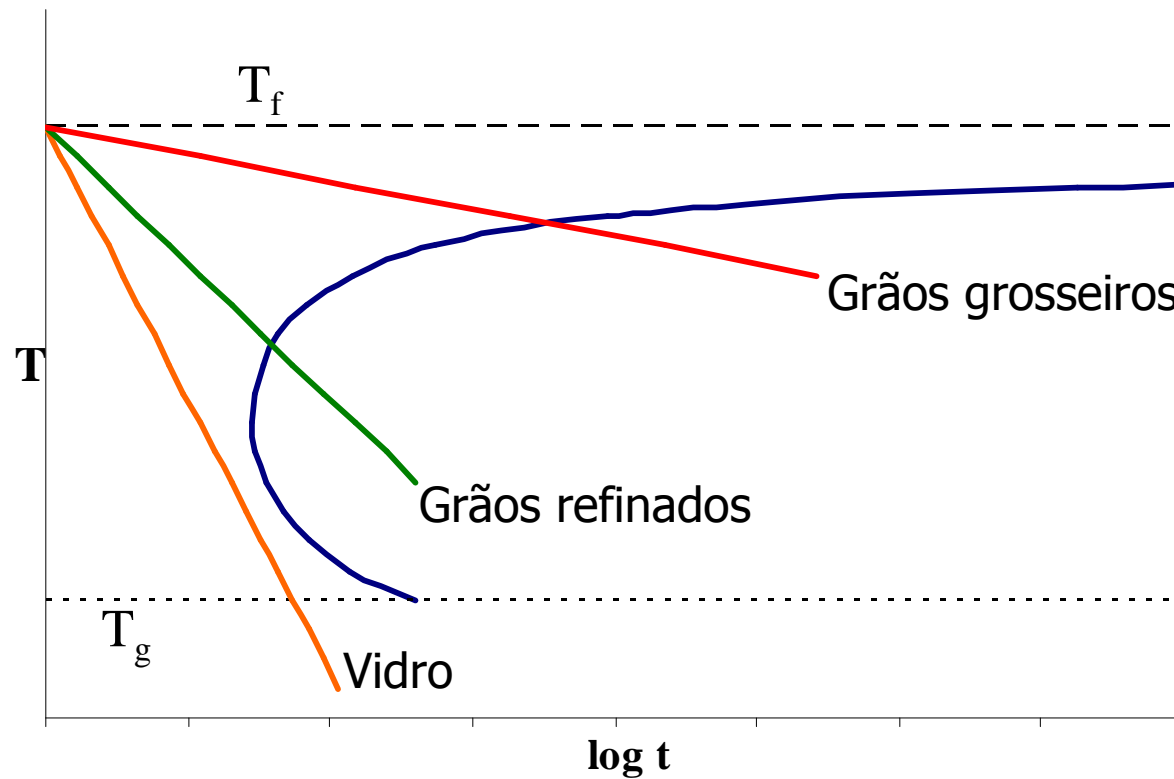


Fração volumétrica de sólido formado com o tempo

$$\chi_{sol} \approx \frac{1}{3} \pi I U^3 t^4$$



Influência da taxa de resfriamento na microestrutura



Influência da taxa de resfriamento

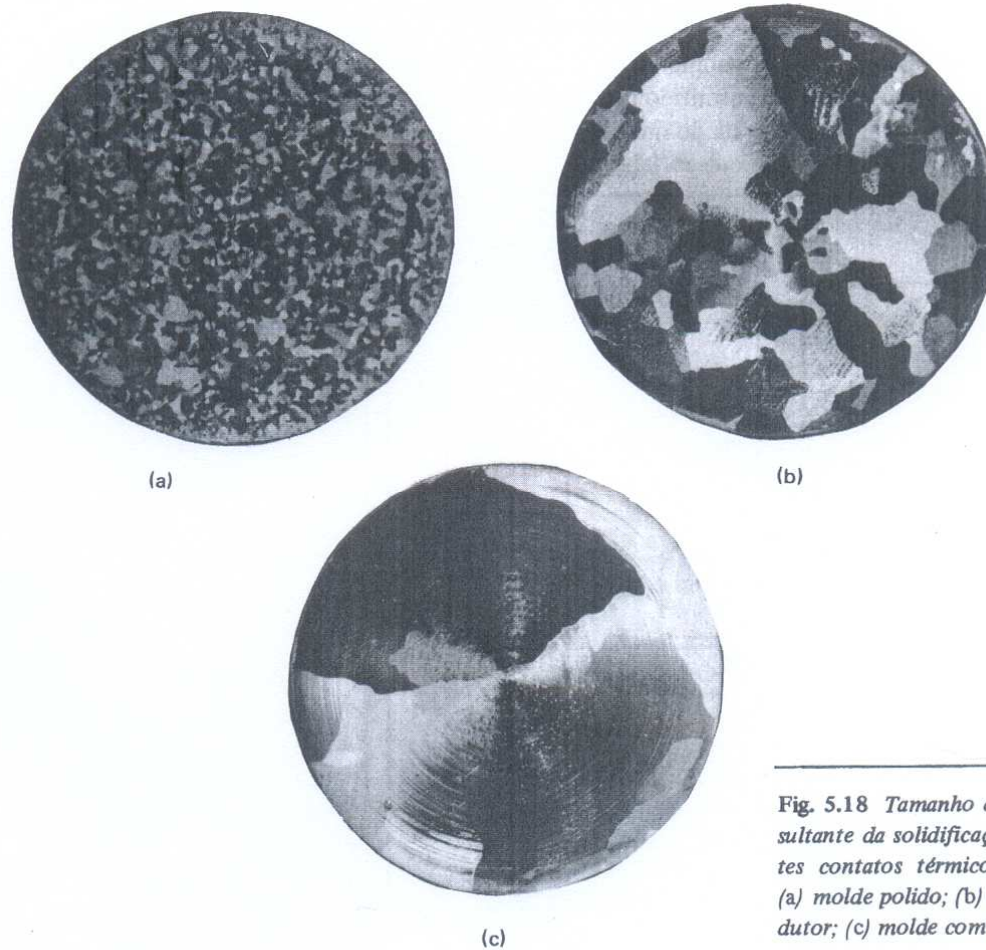
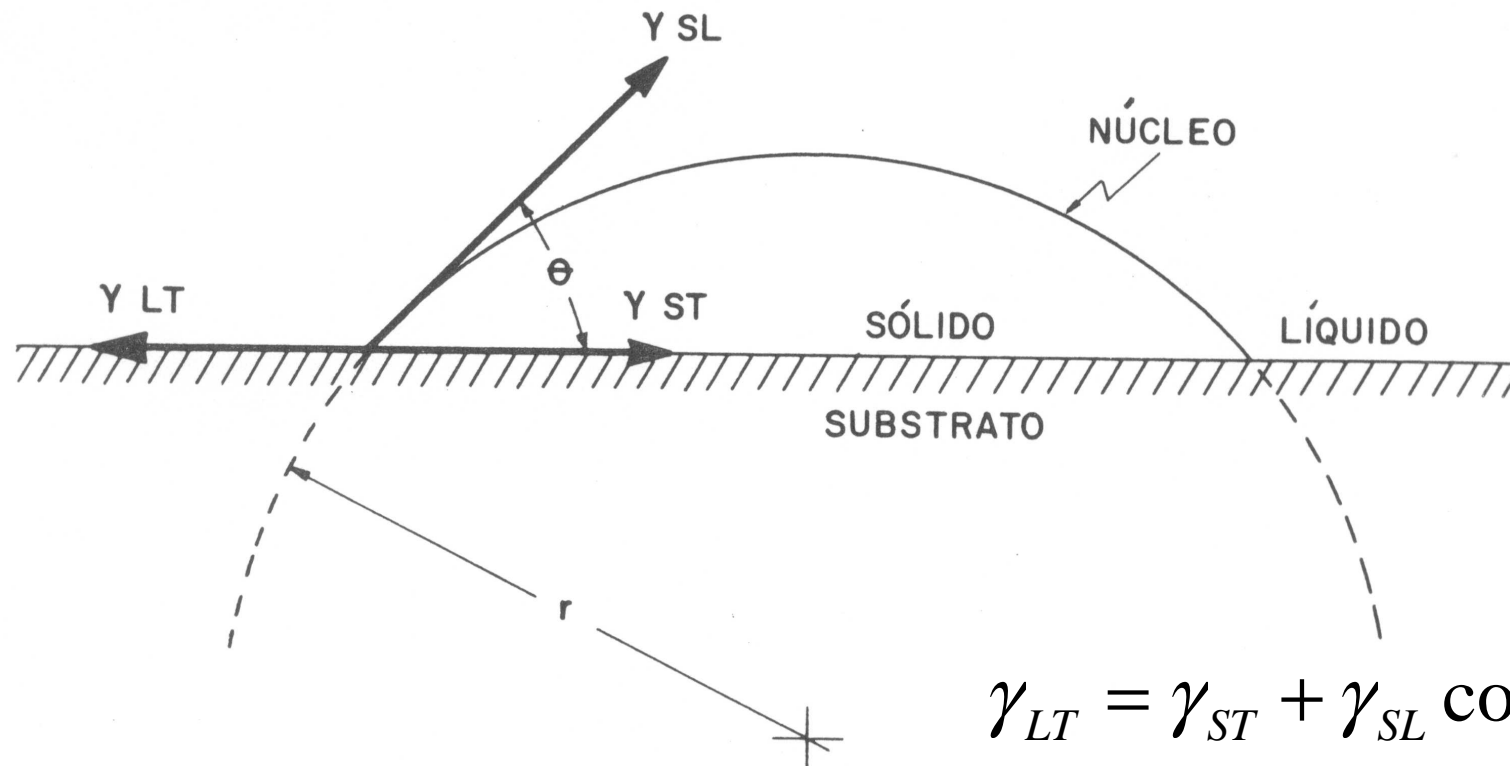


Fig. 5.18 Tamanho de grão da estrutura inicial resultante da solidificação do Alumínio com diferentes contatos térmicos na interface metal/molde: (a) molde polido; (b) molde com revestimento condutor; (c) molde com revestimento isolante.

Nucleação Heterogênea



Para aprender mais sobre tensão e energia superficial:
<https://www.youtube.com/watch?v=DkEhPltiqmo>



Nucleação Heterogênea

- O cálculo deve considerar uma calota esférica
- Também deve considerar 3 tipos de interfaces diferentes: LT, ST e SL
- Resultado:

$$\Delta G_c^{\text{heter}} = f(\theta) \cdot \Delta G_c^{\text{homo}}$$

$$r_c^{\text{heter}} = r_c^{\text{homo}}$$

$$f(\theta) = \frac{(2 + \cos \theta)(1 - \cos \theta)^2}{4}$$

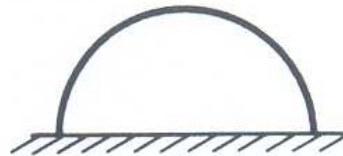
Ângulo de molhamento

Fig. 2.9 Casos-limite de molhamento entre o em
brião e o substrato na nucleação heterogênea.



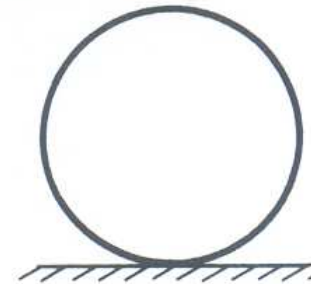
MOLHAMENTO
TOTAL

$$\theta = 0^\circ$$



MOLHAMENTO
PARCIAL

$$0^\circ < \theta < 180^\circ$$



MOLHAMENTO
NULO

$$\theta = 180^\circ$$

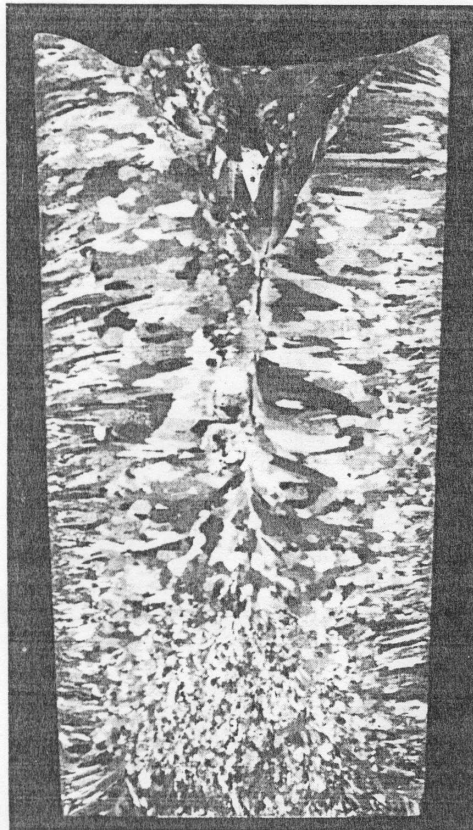


Molhamento

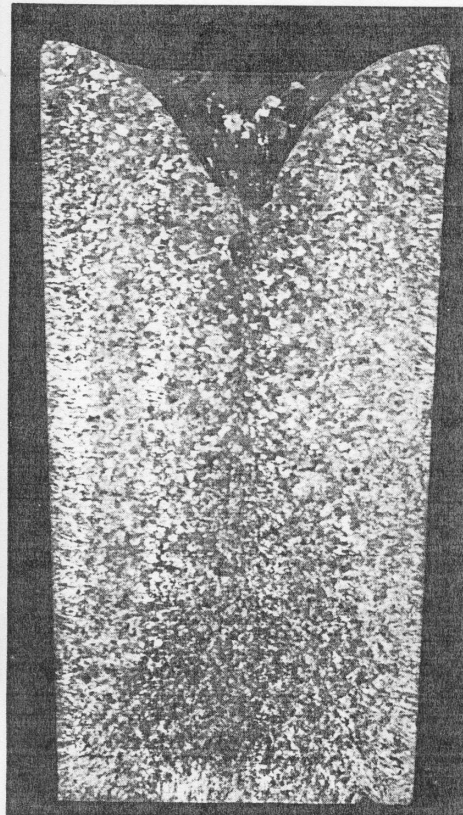
$\theta(^{\circ})$	Type of Nucleation	$f(\theta)$
0 complete wetting	no nucleation barrier (§)	0
10	heterogeneous	0.00017
20		0.0027
30		0.013
40		0.038
50		0.084
70		0.25
90		0.5
110		0.75
130		0.92
150		0.99
170	0.9998	
180 no wetting	homogeneous	1

§ immediate growth can occur

Nucleação heterogênea (Inoculação)



(a)

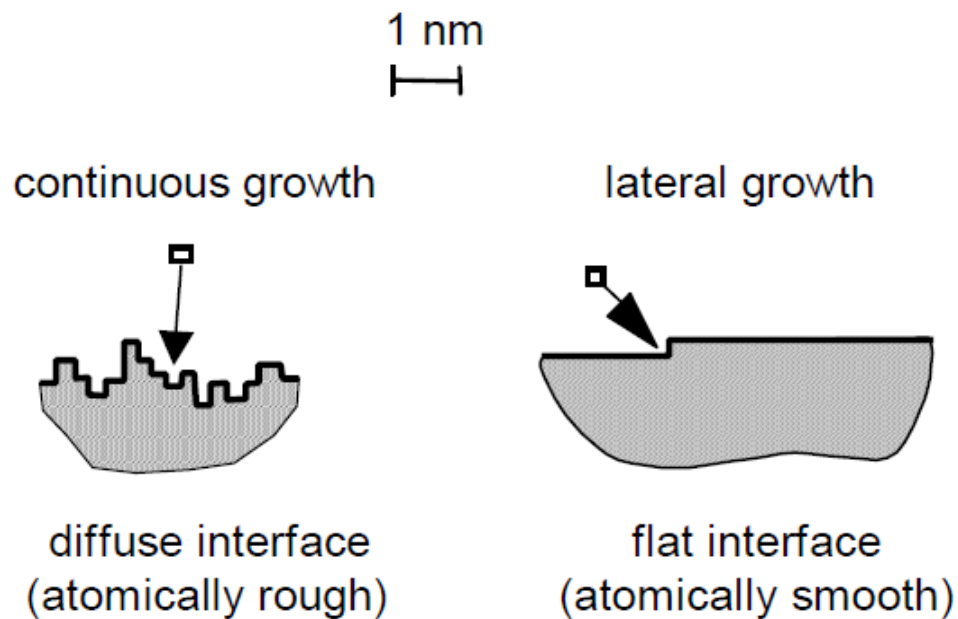


(b)

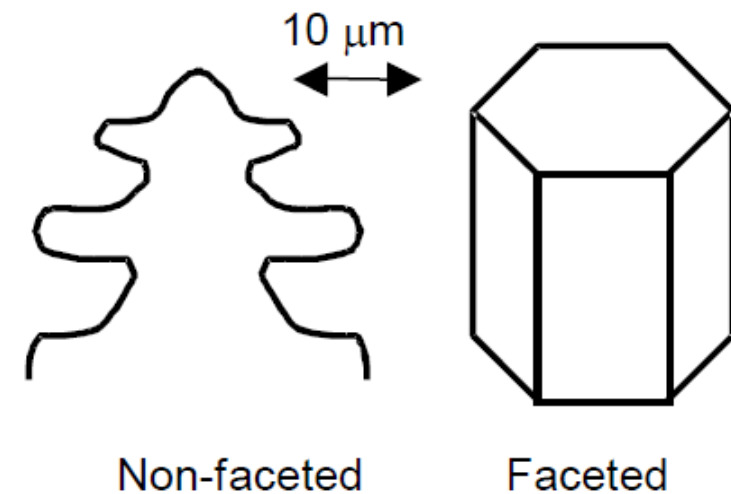
Fig. 2.11 Macroestrutura ($\times 1$) da seção longitudinal de lingotes de alumínio solidificados em molde-coquilha de aço: (a) estrutura de solidificação normal, sem nenhum tipo de inoculação; (b) com inoculação prévia de boro-titânio para refino de grão.

Filme
Inoculação

Interface de crescimento



a) atomic scale

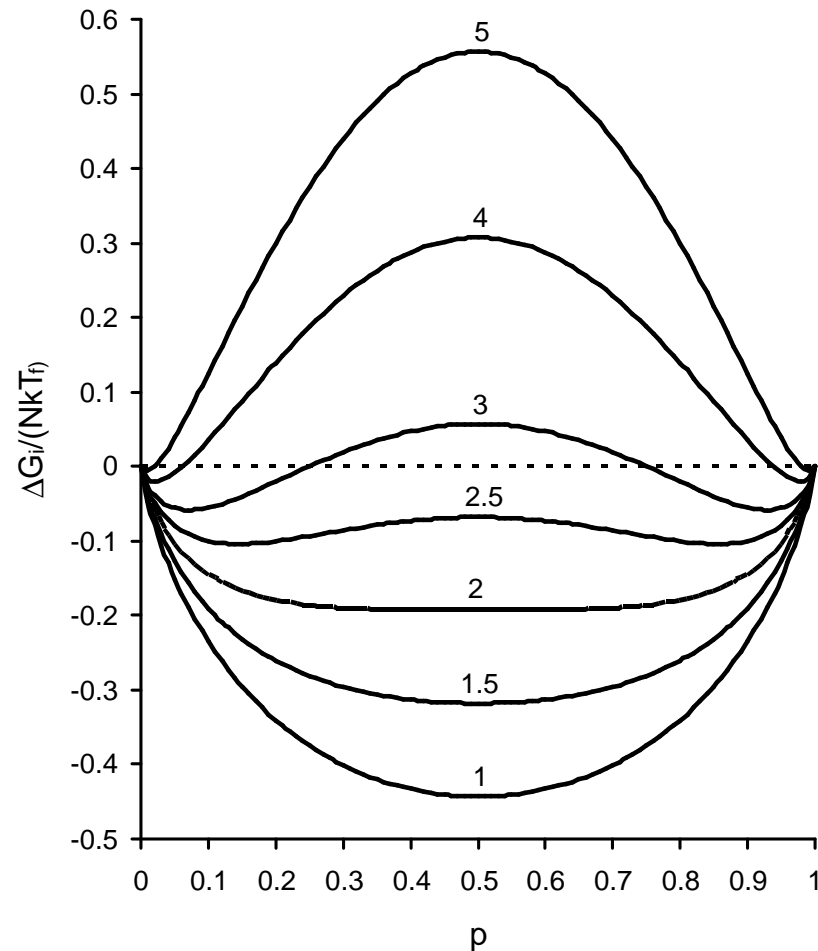


b) micro-scale

Interface de crescimento

$$\frac{\Delta G_i}{NkT_f} = \alpha p(1-p) + p \ln p + (1-p) \ln(1-p)$$

$$\alpha = \frac{\Delta S_f}{R}$$





Interface de crescimento

- Interface difusa

- $\alpha \leq 2$, típica de metais
- crescimento normal (cristal não-facetado)
 - $v \approx \mu_1 \Delta T_i$

- Interface lisa

- $\alpha > 2$, típica de cerâmicas e semicondutores
 - crescimento lateral (cristal facetado)
 - $v \approx \mu_2 \Delta^2 T_i$
- $$\mu_2 \approx \frac{\mu_1}{1000}$$



Interface Lisa ou Difusa

- Interface Lisa (cristal facetado) 1
- Interface Lisa (cristal facetado) 2
- Interface Lisa (cristal facetado) X Difusa (cristal não-facetado)



Lista de símbolos

T – temperatura

t – tempo

T_f – temperatura de fusão

ΔT – super-resfriamento: $T_f - T$ ($T < T_f$)

ΔH_f – entalpia de fusão ou calor latente de fusão

$\Delta G_{\text{liq-sol}}$ – variação de energia livre do estado líquido para o sólido

ΔG_v – variação de energia livre relativa ao volume do núcleo

r – raio do núcleo

ΔG_s – variação de energia livre relativa à superfície do núcleo, interface sólido/líquido

γ_{SL} – energia ou tensão superficial da interface sólido/líquido

ΔG_T – variação total da energia livre para a nucleação

r_c – raio crítico

ΔG_c – variação crítica de energia livre ou barreira energética para a nucleação

I – taxa de nucleação

C_1 – constante da equação de I

η – viscosidade

k – constante de Boltzmann

A' , B e T_0 – constantes da equação de viscosidade



Lista de símbolos

U – velocidade de crescimento

C_2 – constante da equação de U

χ_{sol} – fração volumétrica de sólido

T_g – temperatura de transição vítrea

γ_{LT} – energia ou tensão superficial da interface líquido/substrato

γ_{ST} – energia ou tensão superficial da interface sólido/substrato

θ – ângulo de “molhamento” entre o núcleo sólido e o substrato

$f(\theta)$ – função do ângulo de molhamento, $0 \leq f(\theta) \leq 1$

ΔG_c^{homo} – barreira energética para a nucleação homogênea

ΔG_c^{heter} – barreira energética para a nucleação heterogênea

r_c^{homo} – raio crítico da nucleação homogênea

r_c^{heter} – raio crítico da nucleação heterogênea

ΔG_i – variação de energia livre na interface de crescimento

N – constante de Avogadro

ΔS_f – entropia de fusão, $\Delta H_f/T_f$

R – constante universal dos gases

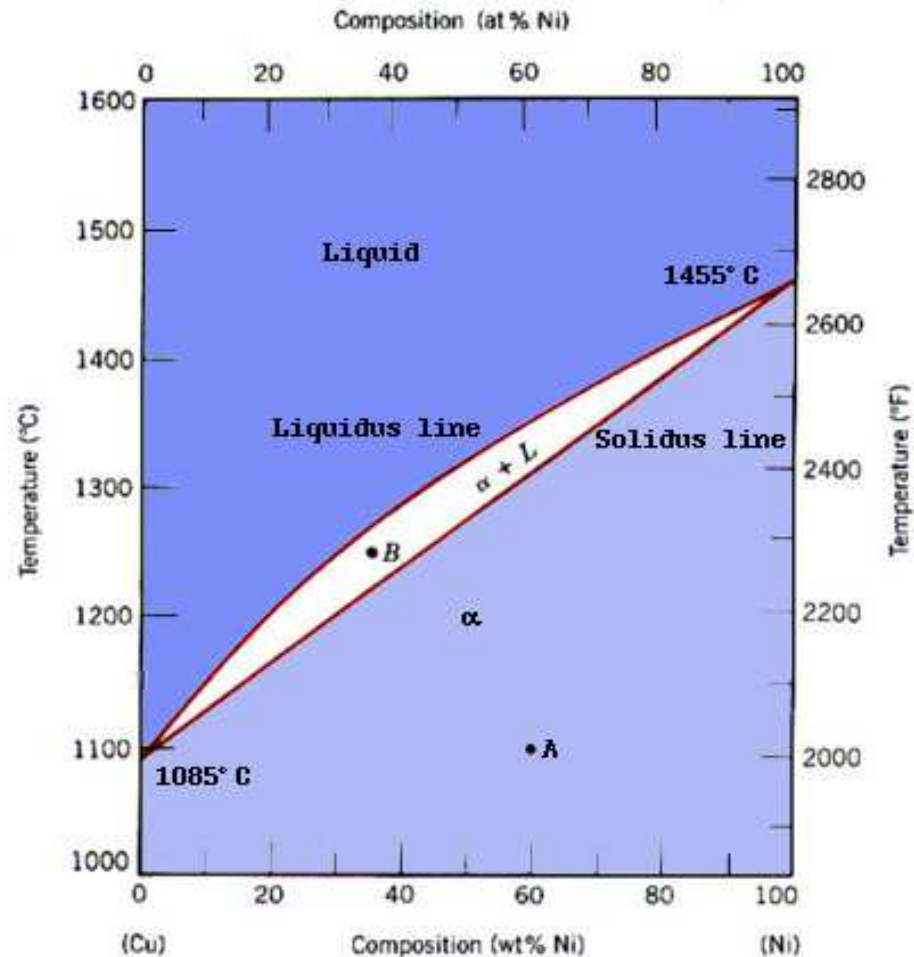
α – razão entre ΔS_f e R

p – fração de átomos na interface pertencentes ao sólido

ΔT_i – super-resfriamento na interface de crescimento

Redistribuição de Soluto na Solidificação de Ligas

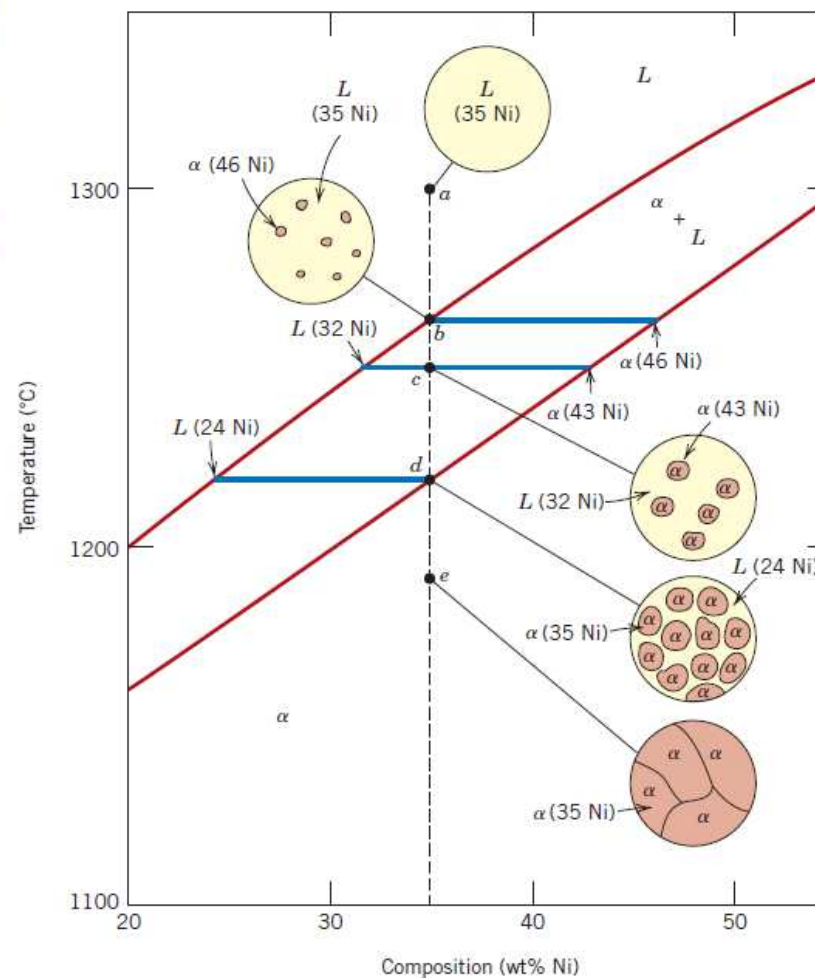
O diagrama de fases Cu-Ni



Redistribuição de Soluto na Solidificação de Ligas

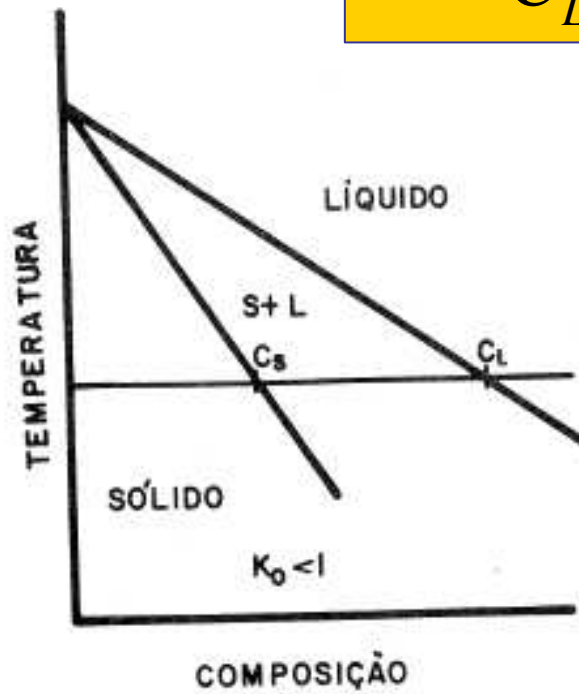
Figure 9.4
Schematic representation of the development of microstructure during the equilibrium solidification of a 35 wt% Ni–65 wt% Cu alloy.

Solidificação no Equilíbrio

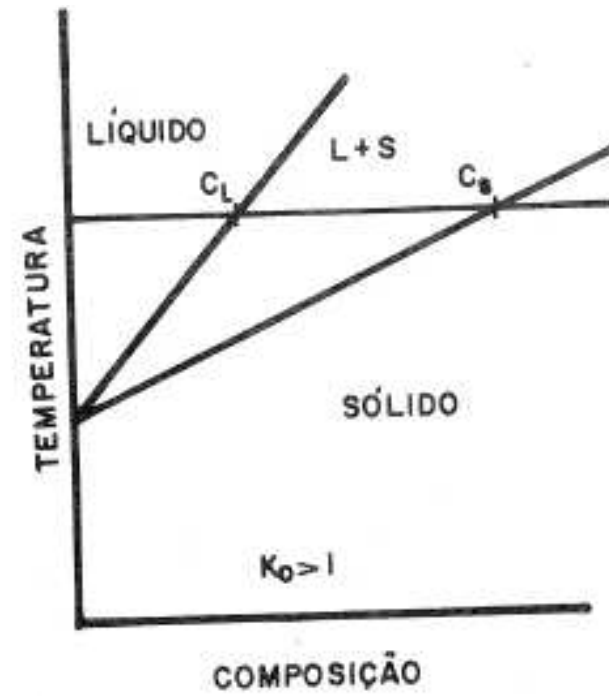


Coeficiente de distribuição

$$k_0 = \frac{C_S}{C_L}$$



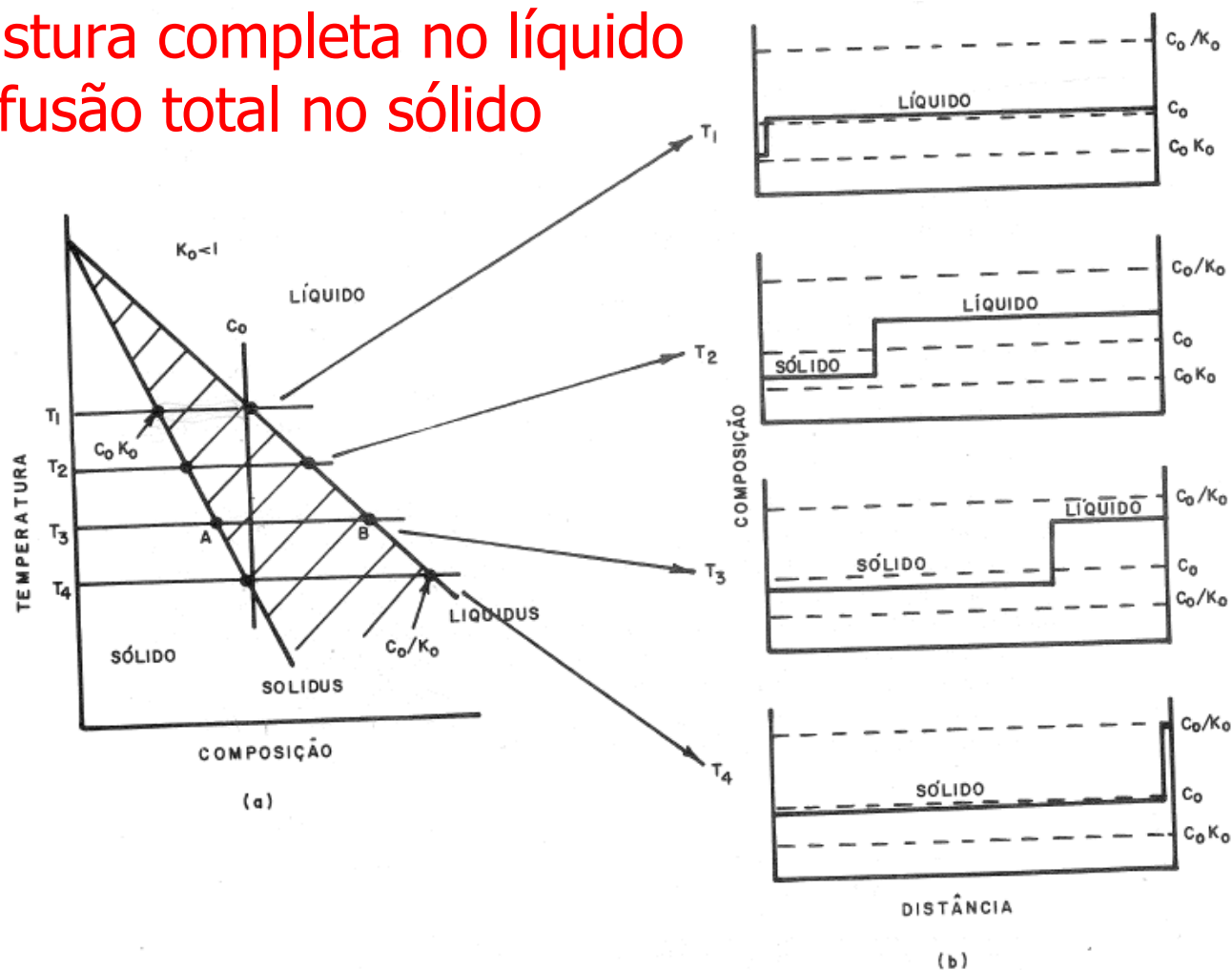
(a)



(b)

Solidificação no Equilíbrio

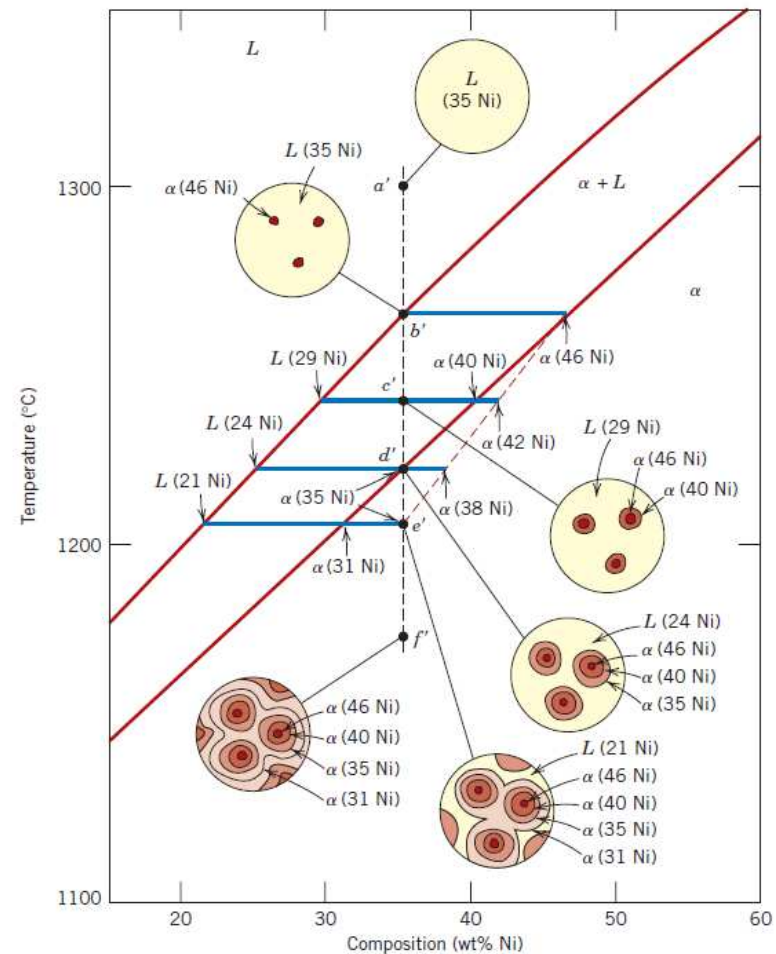
- Mistura completa no líquido
- Difusão total no sólido



Redistribuição de Soluto na Solidificação

Solidificação Fora do Equilíbrio

Figure 9.5
Schematic representation of the development of microstructure during the nonequilibrium solidification of a 35 wt% Ni–65 wt% Cu alloy.





Solidificação Fora do Equilíbrio

- Difusão no sólido:
 - Pode ser desconsiderada pois a difusividade ($\sim 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$) é muito pequena perto da velocidade da interface sólido/líquido ($> 10^{-2} \text{ cm/s}$)
- No líquido pode-se considerar:
 - Mistura completa
 - Somente difusão
 - Mistura Parcial

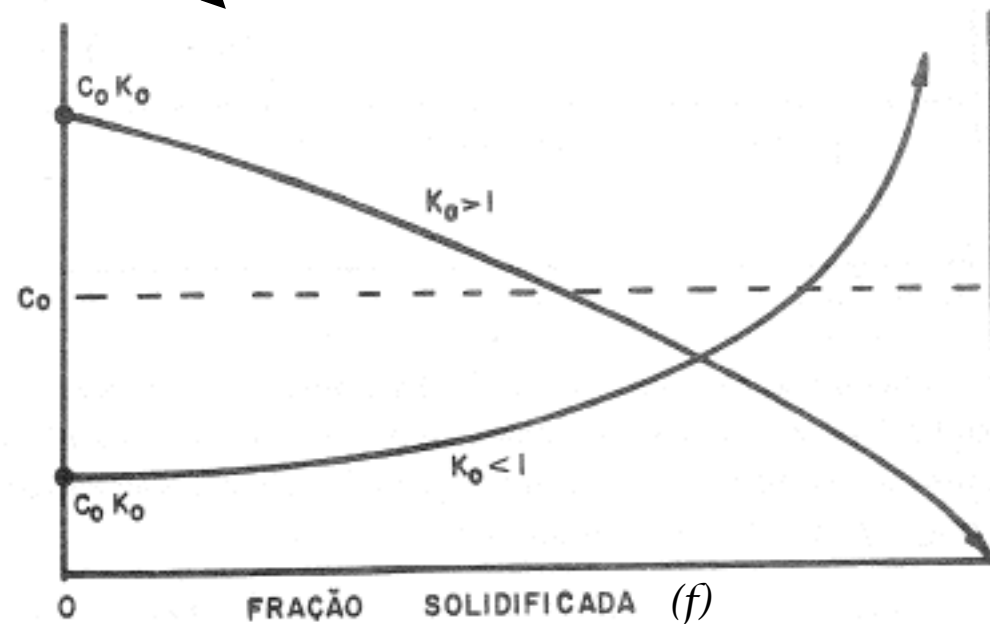
Mistura Completa no Líquido

$$C_S = C_0 \cdot k_0 \cdot (1 - f)^{k_0 - 1}$$

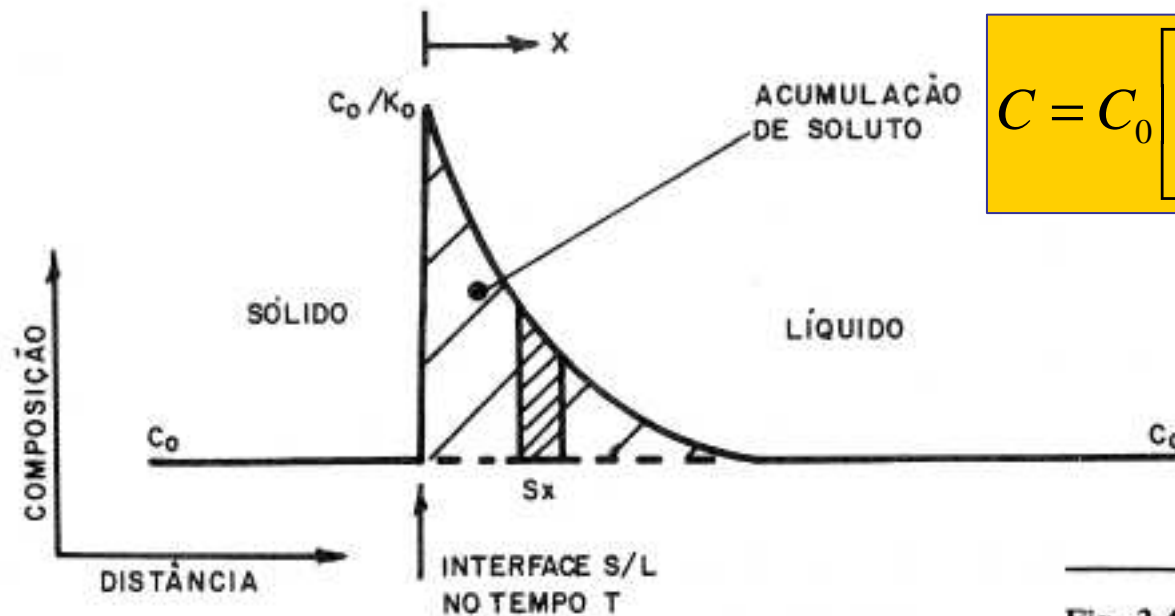
Equação de Scheil

$$C_L = C_0 \cdot (1 - f)^{k_0 - 1}$$

Fig. 3.8 Perfil "distância x concentração" de uma barra solidificada sob condições de mistura total no líquido.



Somente Difusão no Líquido

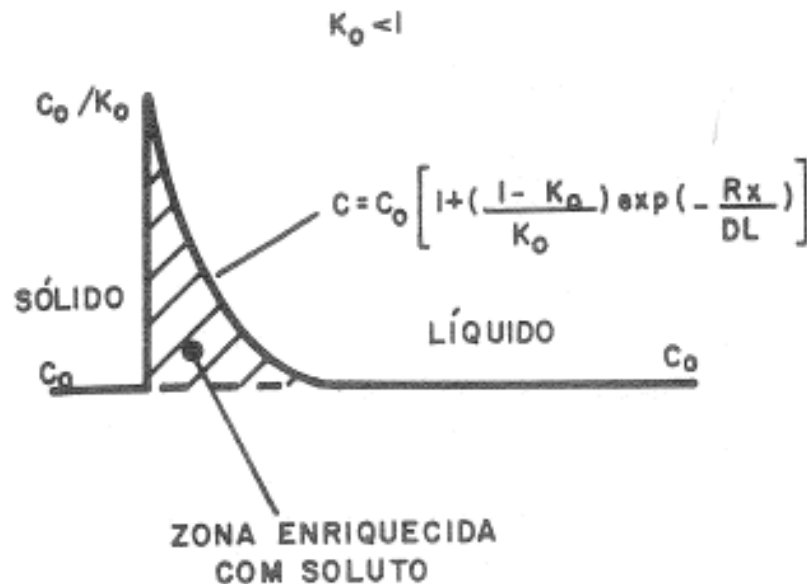


$$C = C_0 \left[1 + \left(\frac{1 - k_0}{k_0} \right) \exp \left(- \frac{R \cdot x}{D_L} \right) \right]$$

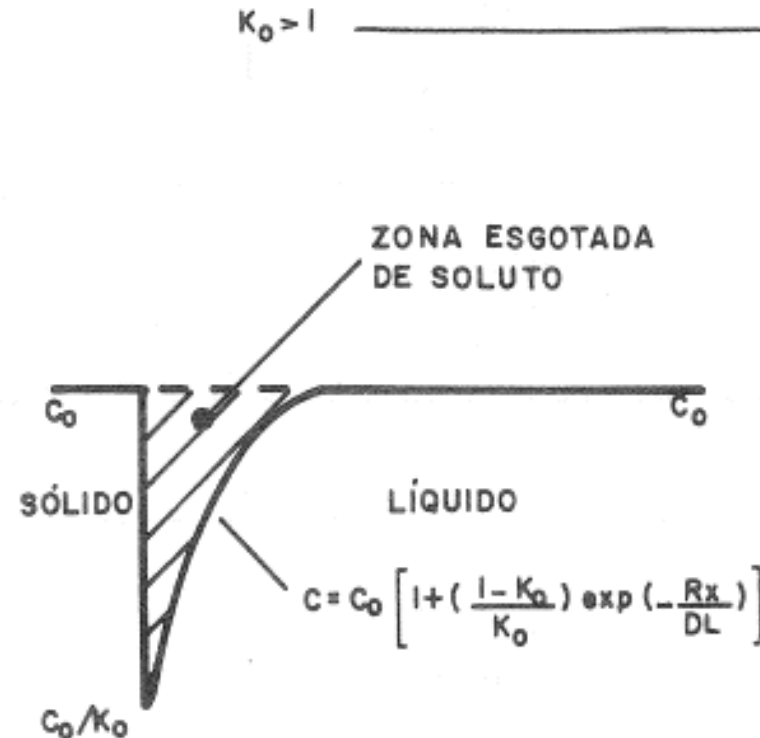
Fig. 3.4 Representação esquemática do acúmulo de soluto na interface de regime permanente, durante o crescimento, com mistura do soluto no líquido somente por difusão.

Somente Difusão no Líquido

Fig. 3.5 (a) Perfil do soluto a partir da interface sólido/líquido durante a solidificação em regime permanente, com redistribuição de soluto somente por difusão ($k_0 < 1$). (b) Perfil correspondente ao de (a), porém para $k_0 > 1$.



(a)



(b)

Influência das variáveis no perfil de concentração

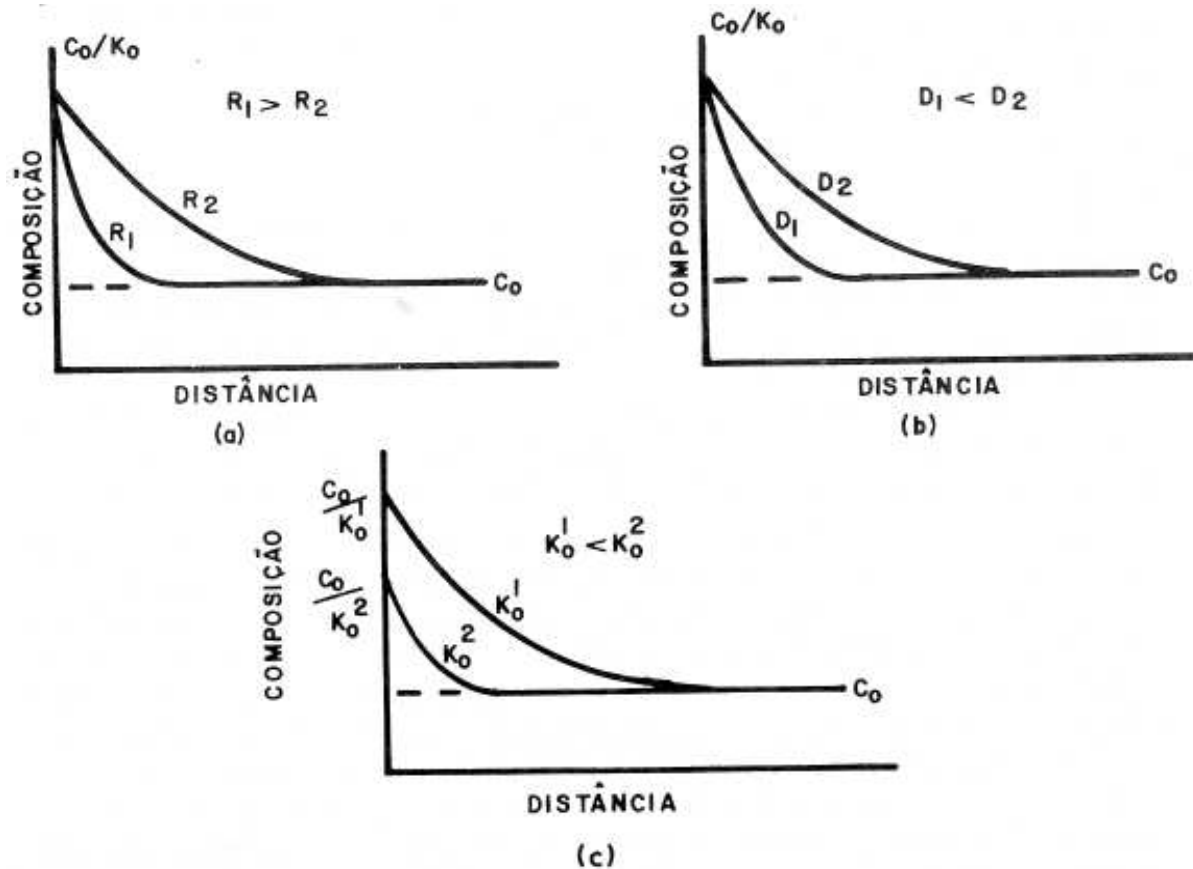
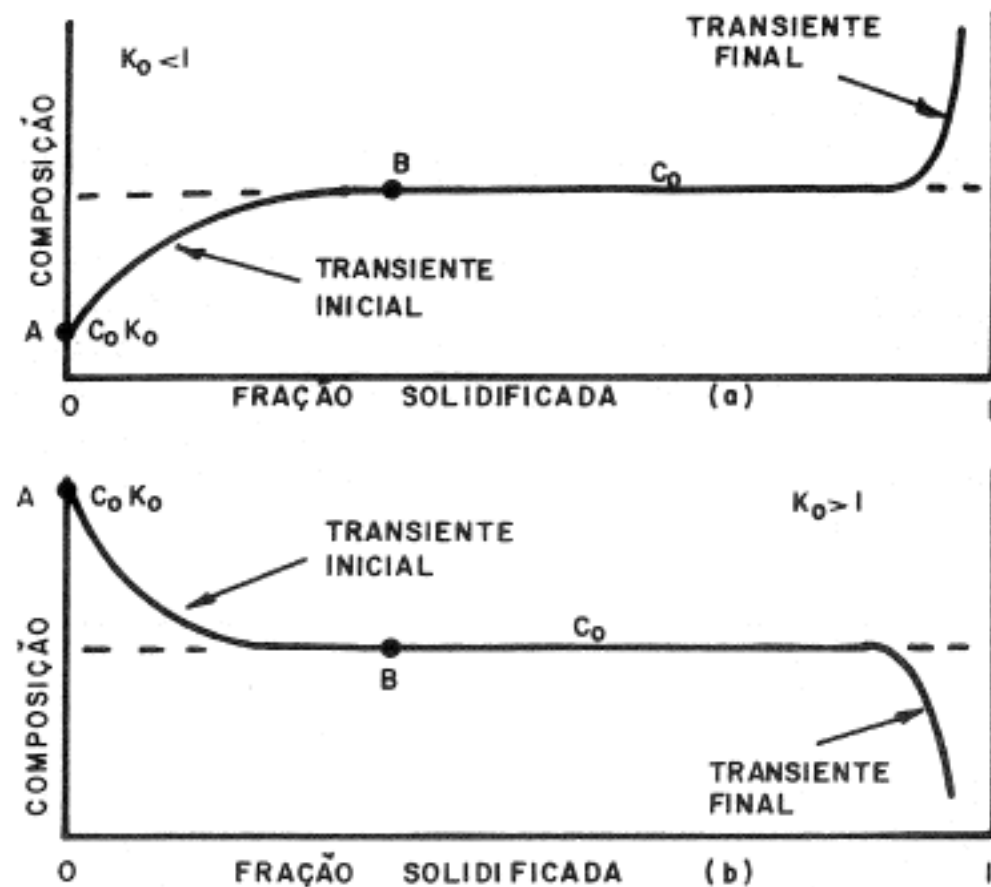


Fig. 3.6 Variações na concentração de soluto a partir da interface em crescimento ($\kappa_0 < 1$), dadas por variações nos seguintes parâmetros de crescimento: (a) velocidade de crescimento; (b) difusividade; (c) coeficiente de distribuição.

Perfil de concentração final para o caso de somente difusão

Fig. 3.7 Perfis "distância x concentração", de uma barra solidificada sob condições tais que o transporte de soluto no líquido é efetuado somente por difusão: (a) $k_0 < 1$; (b) $k_0 > 1$.

- Somente para concentrações $< 0,5\%$
- Para concentrações $> 0,5\%$ ocorrerá alteração na configuração da interface sólido/líquido



Mistura Parcial no Líquido (caso intermediário)

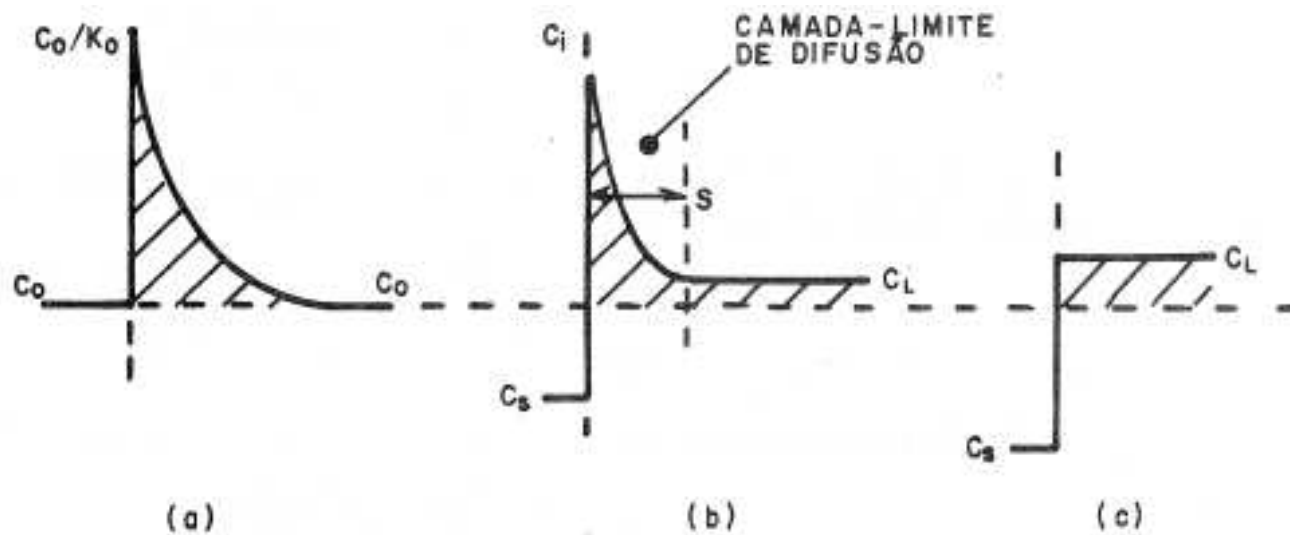


Fig. 3.9 Efeito das condições de mistura na camada de soluto junto à interface sólido/líquido ($k_0 < 1$): (a) não há mistura, considerando-se somente difusão; (b) mistura parcial; (c) mistura total.



Mistura Parcial no Líquido (caso intermediário)

$$C_S = C_0 \cdot k_E \cdot (1 - f)^{k_E - 1}$$

$$k_E = \frac{k_0}{k_0 + (1 - k_0) \exp(-R.S / D_L)}$$

k_E – coeficiente de distribuição efetivo

Comparação entre os quatro casos

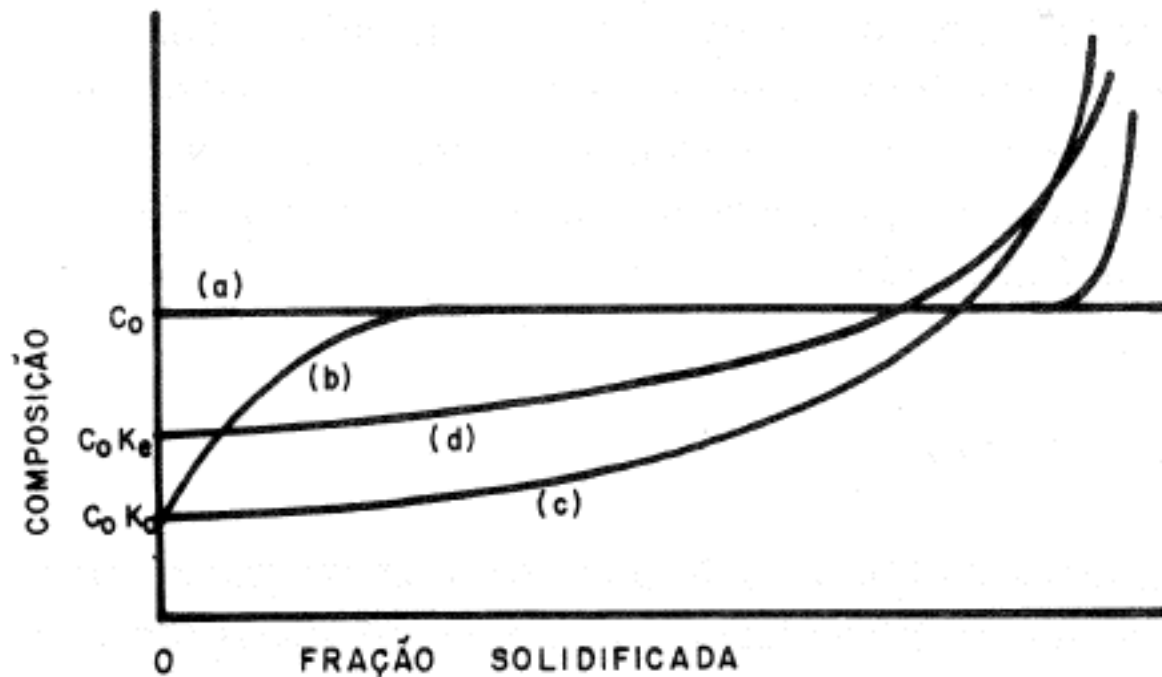


Fig. 3.10 Distribuição de soluto numa barra solidificada a partir de um líquido de concentração inicial C_0 com $k_0 < 1$, para: (a) resfriamento em equi-

líbrio; (b) mistura do soluto no líquido somente por difusão; (c) mistura total do soluto no líquido; (d) mistura parcial do soluto no líquido.



Conseqüências Práticas

- Refino por Fusão Zonal
- Alteração na morfologia da interface de crescimento (super-resfriamento constitucional)
- Microssegregação
- Macrossegregação

Refino por Fusão Zonal

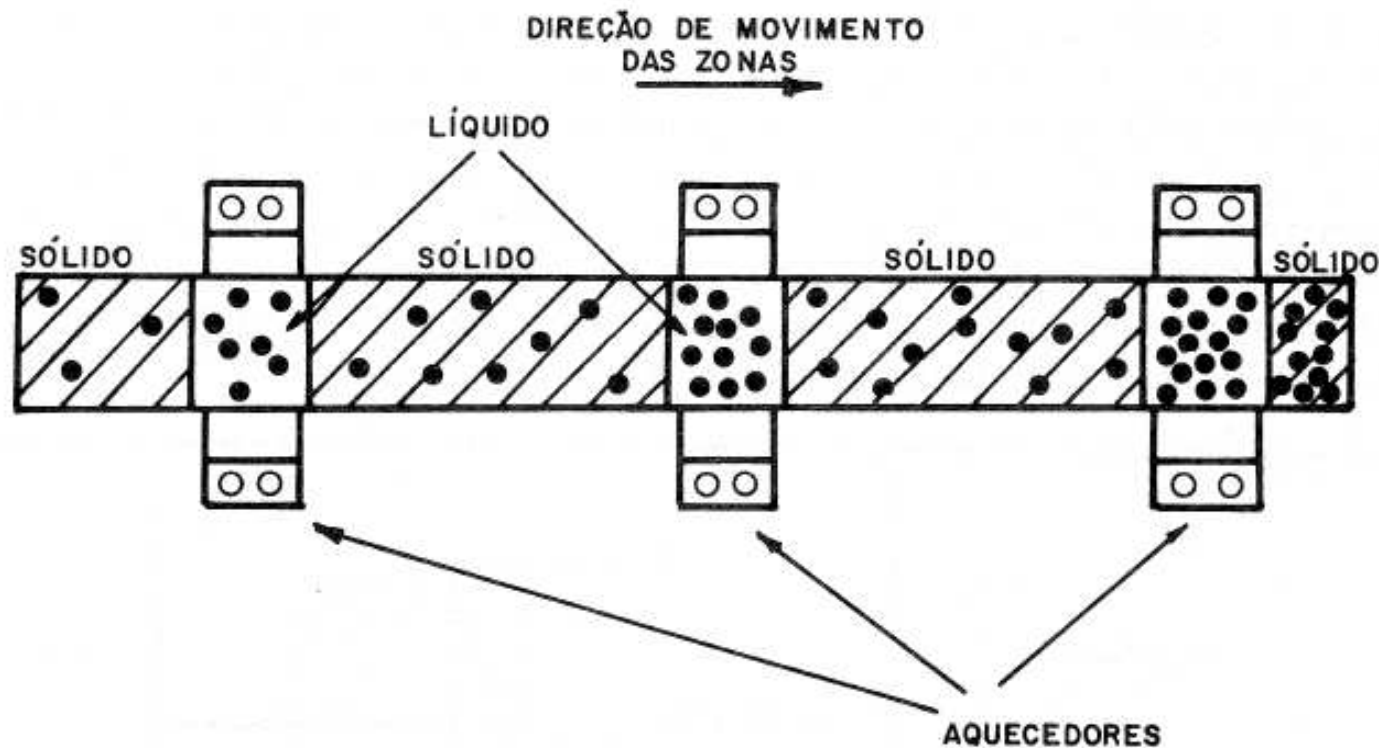
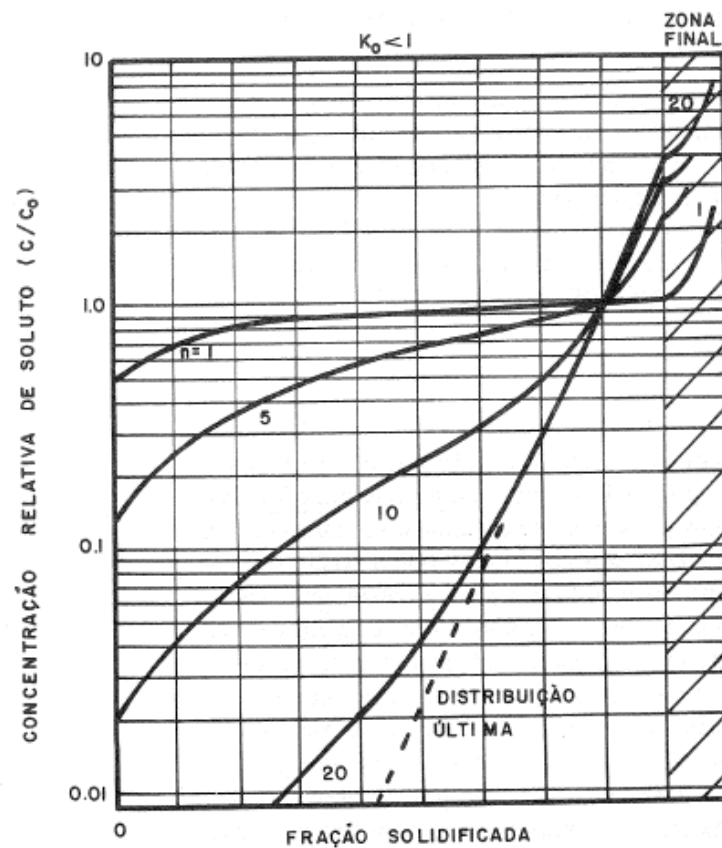
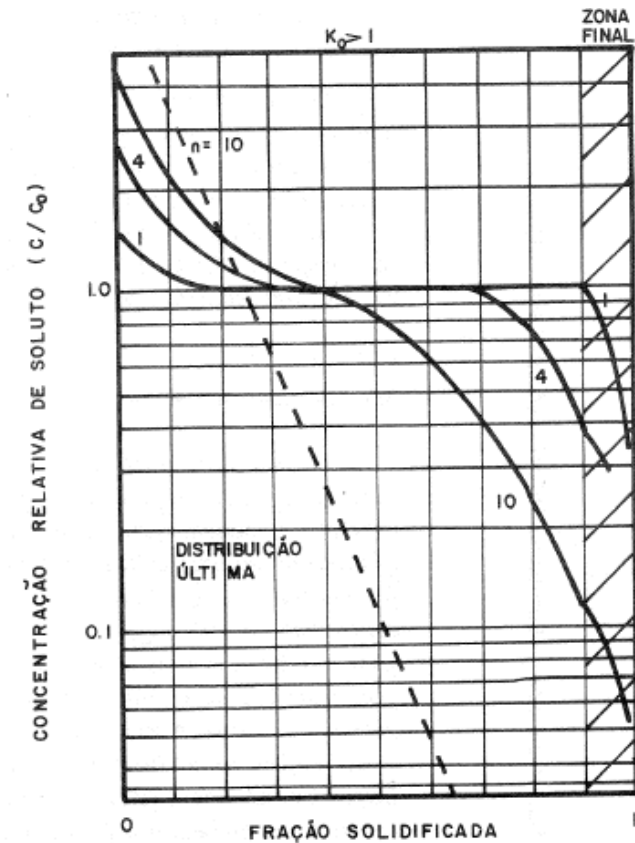


Fig. 3.12 Diagrama esquemático do refino zonal de uma barra, usando-se três zonas fundidas, e mostrando a direção de movimento do soluto ($k_0 < 1$).

Refino por Fusão Zonal



(a)

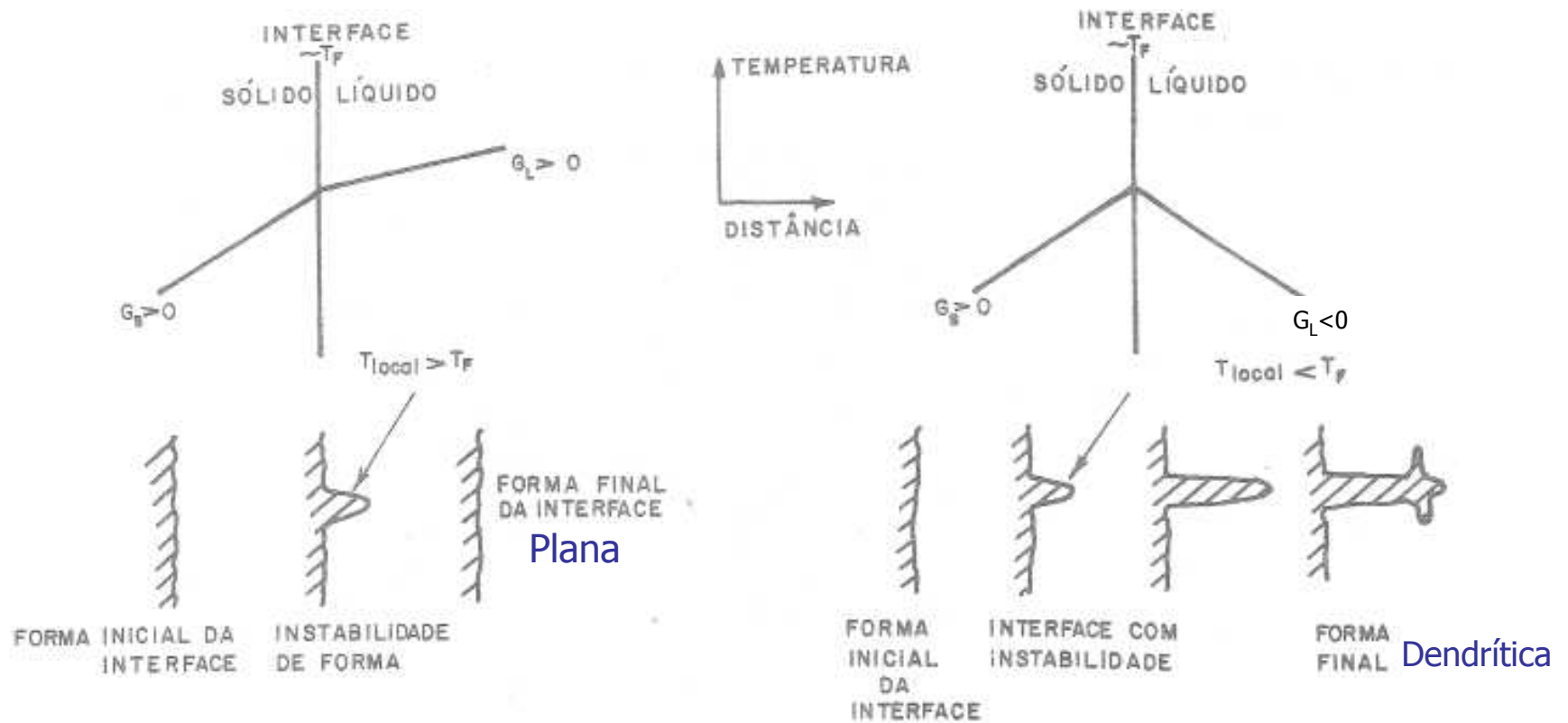


(b)

Fig. 3.15 Concentração relativa de soluto para o refino zonal de uma barra com $L = 10 \lambda$, para vários números de passadas: (a) para $k_0 = 0,5$; (b) para $k_0 = 1,5$.

Morfologia da Interface sólido/líquido

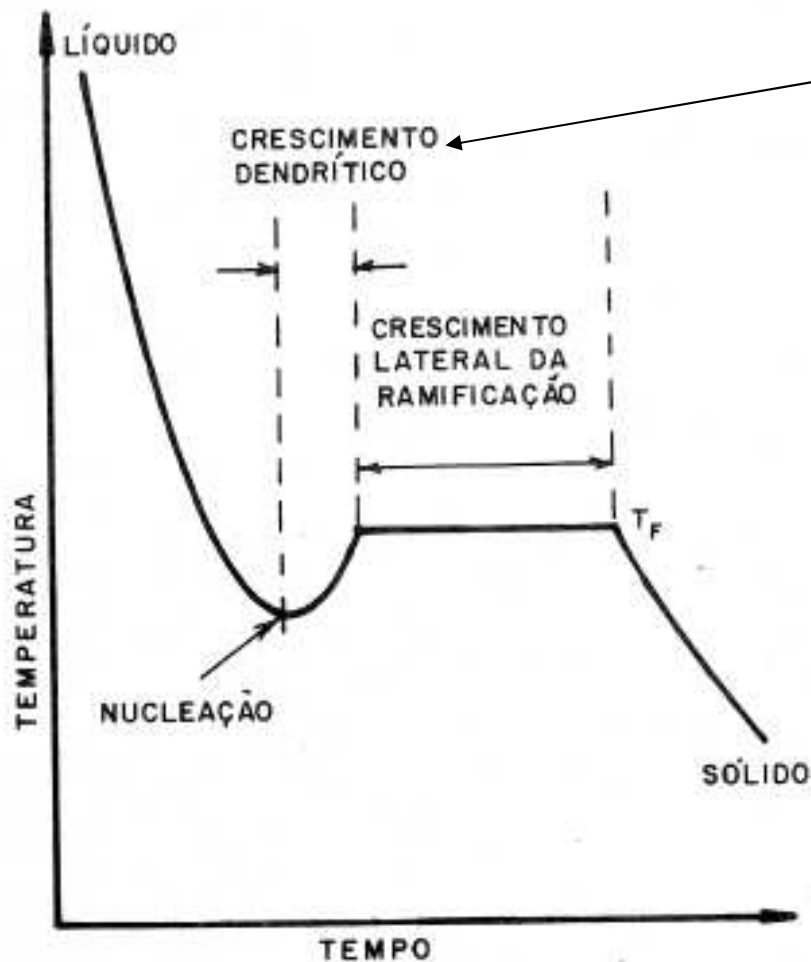
O caso de metais puros



Sem S.R. à frente da interface

Com S.R. à frente da interface

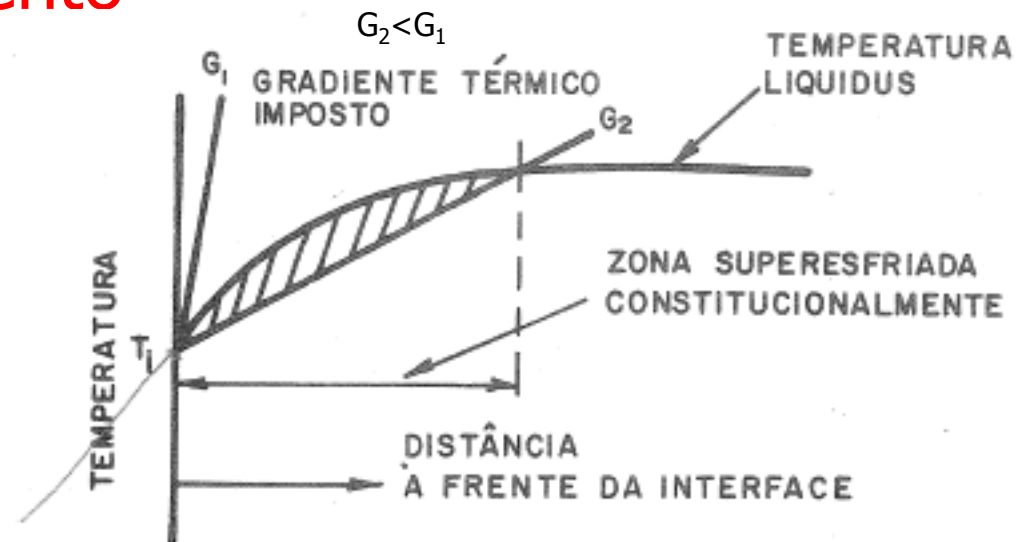
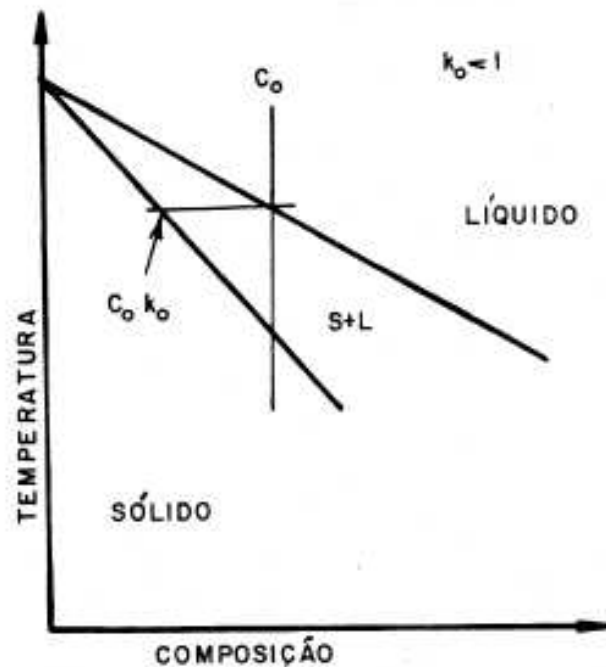
Crescimento dendrítico devido ao super-resfriamento térmico em metais puros



[Filme para Crescimento Dendrítico em substância pura](#)

Efeito da redistribuição de soluto na interface de crescimento

■ Super-resfriamento Constitucional



$$\frac{G_L}{R} < \frac{m \cdot C_0}{D_L} \cdot \frac{(1 - k_0)}{k_0}$$

Condição necessária

O mesmo efeito ocorre para $k_0 > 1$



Condições que favorecem o super-resfriamento constitucional

$$\frac{G_L}{R} < \frac{m \cdot C_0}{D_L} \cdot \frac{(1 - k_0)}{k_0}$$

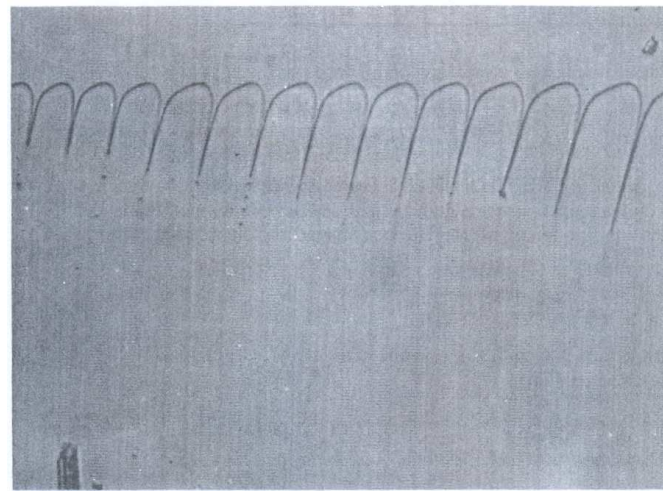
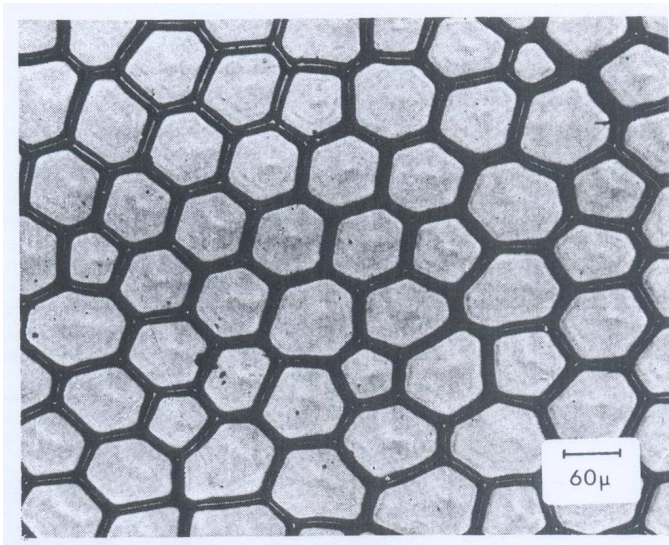
- Baixo gradiente térmico (G) no líquido
- Altas velocidades (R) de crescimento
- Linhas liquidus abruptas (m elevado)
- Altos teores de soluto na liga (C_0)
- Baixa difusividade no líquido (D_L)
- k_0 bem pequeno ou bem grande



Conseqüência do super-resfriamento constitucional

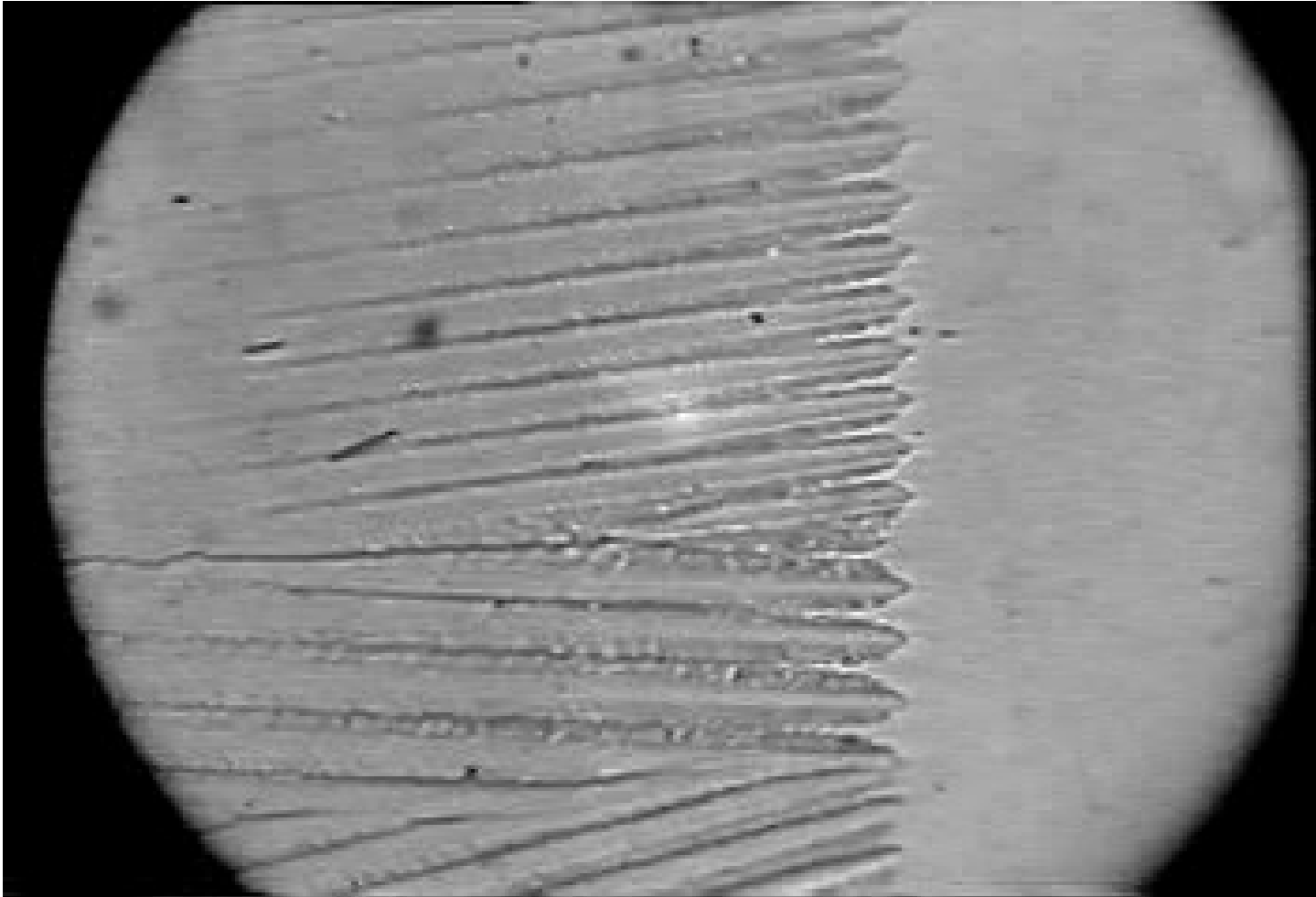
- Degeração da interface plana de crescimento
 - Baixo super-resfriamento
 - Crescimento Celular
 - Alto super-resfriamento
 - Crescimento Dendrítico

Crescimento Celular

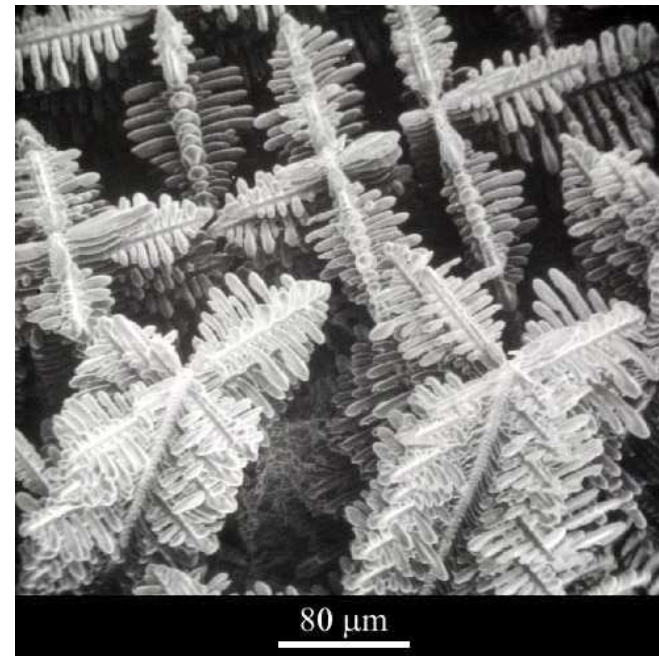
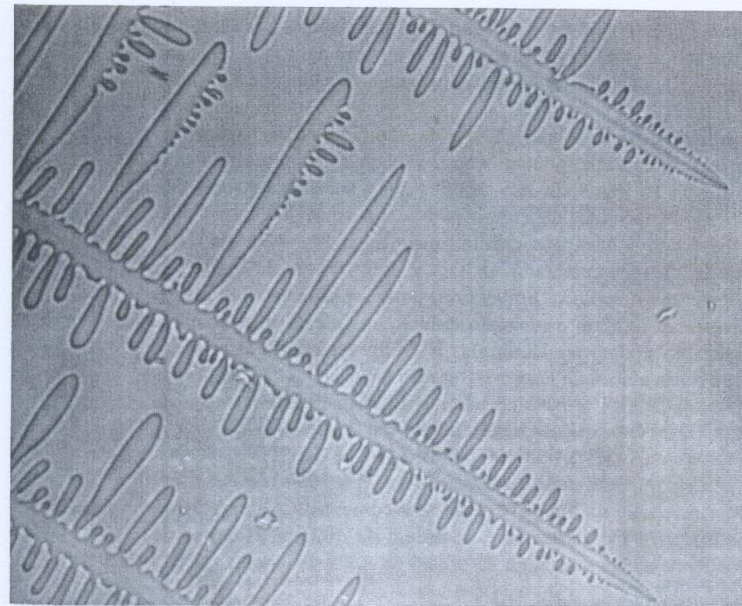




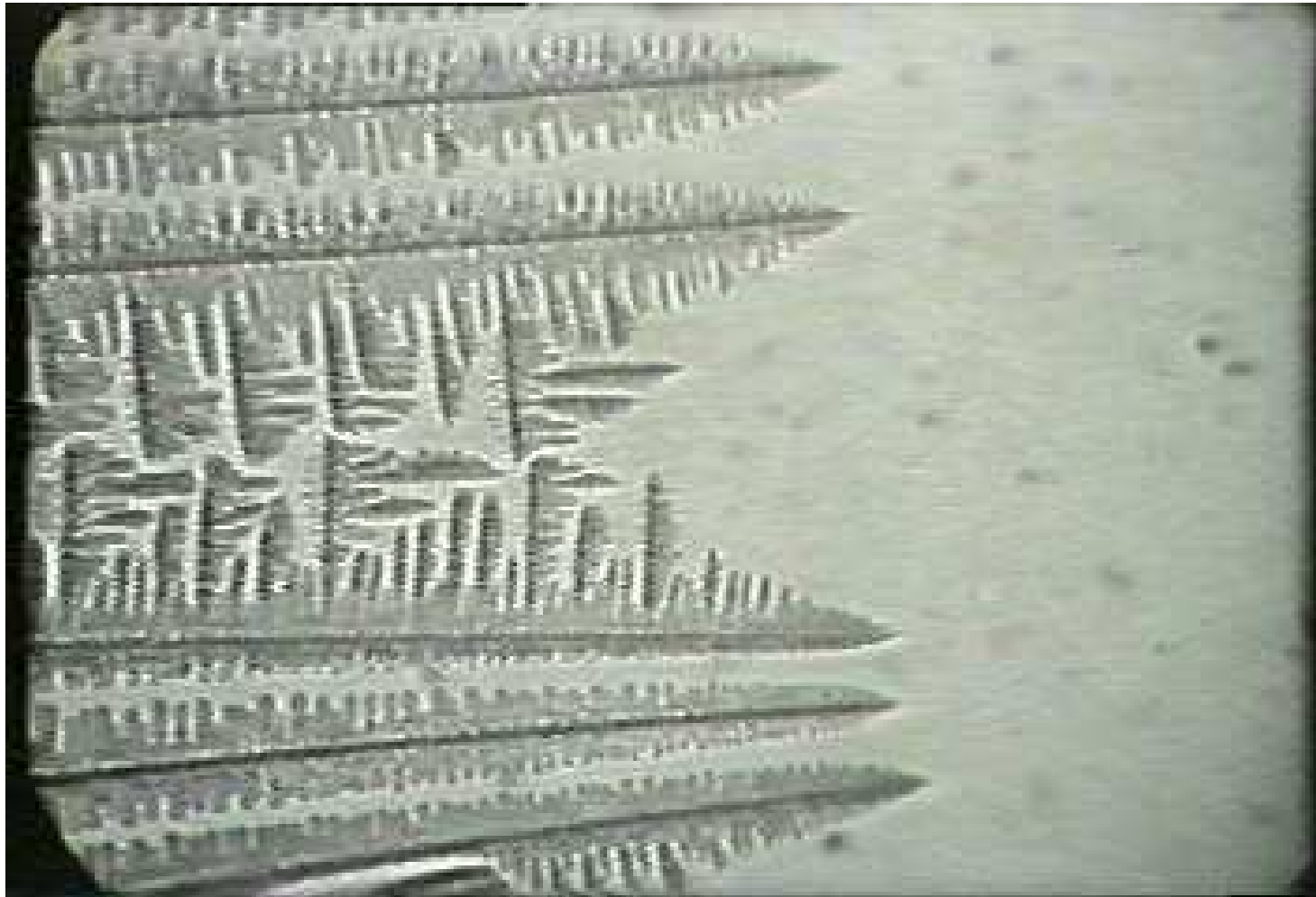
Crescimento Celular



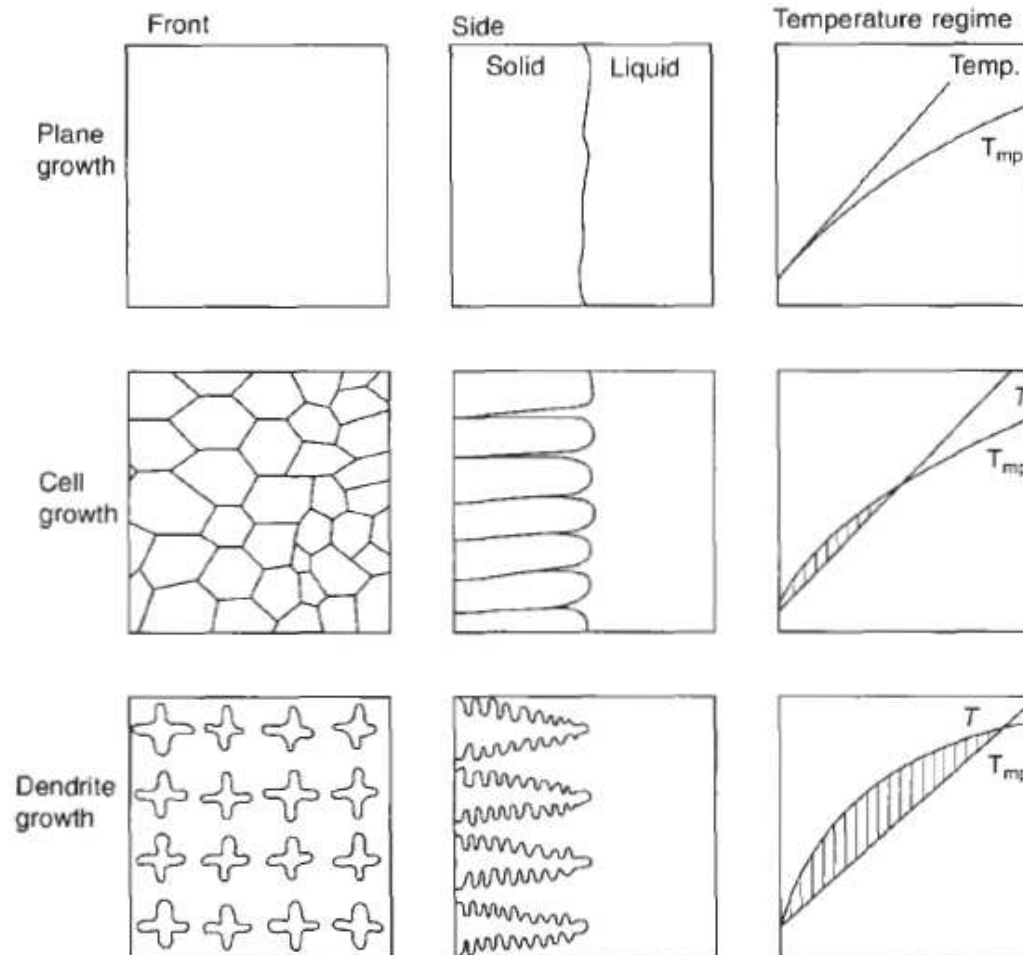
Crescimento Dendrítico



Crescimento Dendrítico

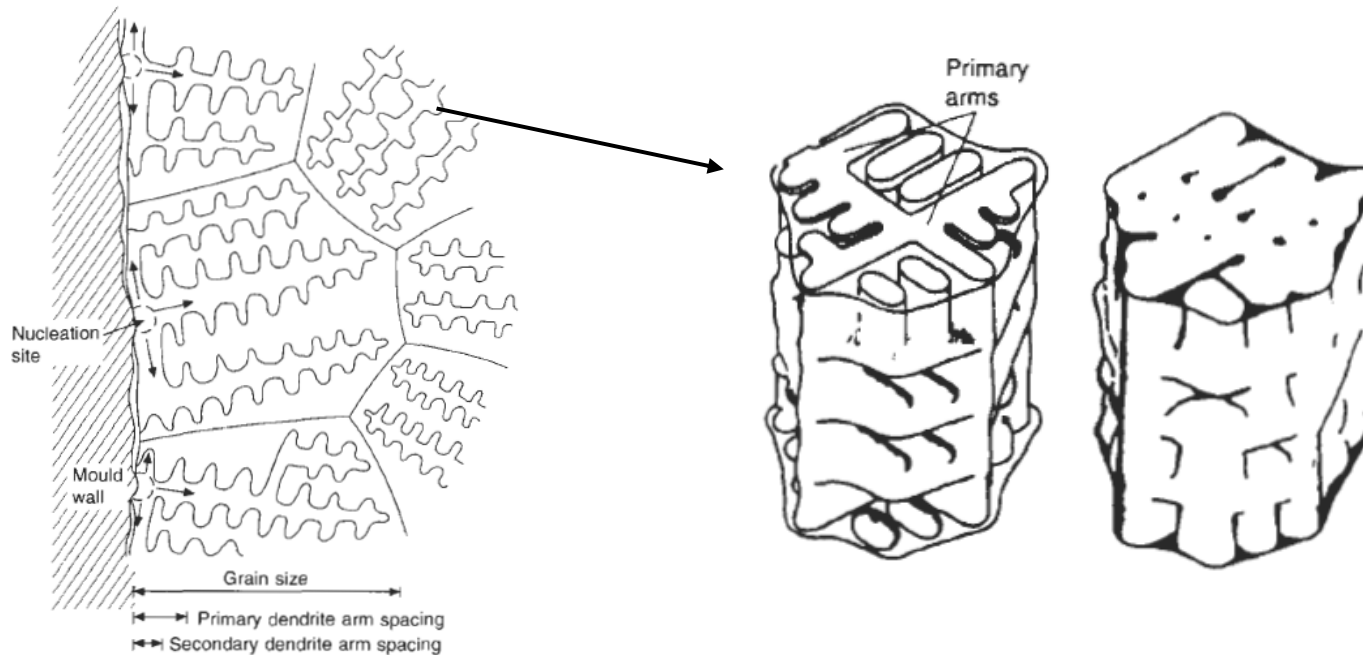


Comparação final entre as morfologias da interface



A formação dos grãos

- Pode ocorrer por:
 - Crescimento Planar
 - Crescimento Celular
 - Crescimento Dendrítico seguido de espessamento dos braços



Mais sobre o crescimento dendrítico

- Ocorre em direções cristalográficas específicas
 - Exemplo: $\langle 100 \rangle$ nos metais CFC
- O espaçamento entre os braços dendríticos (λ) depende do tempo local de solidificação

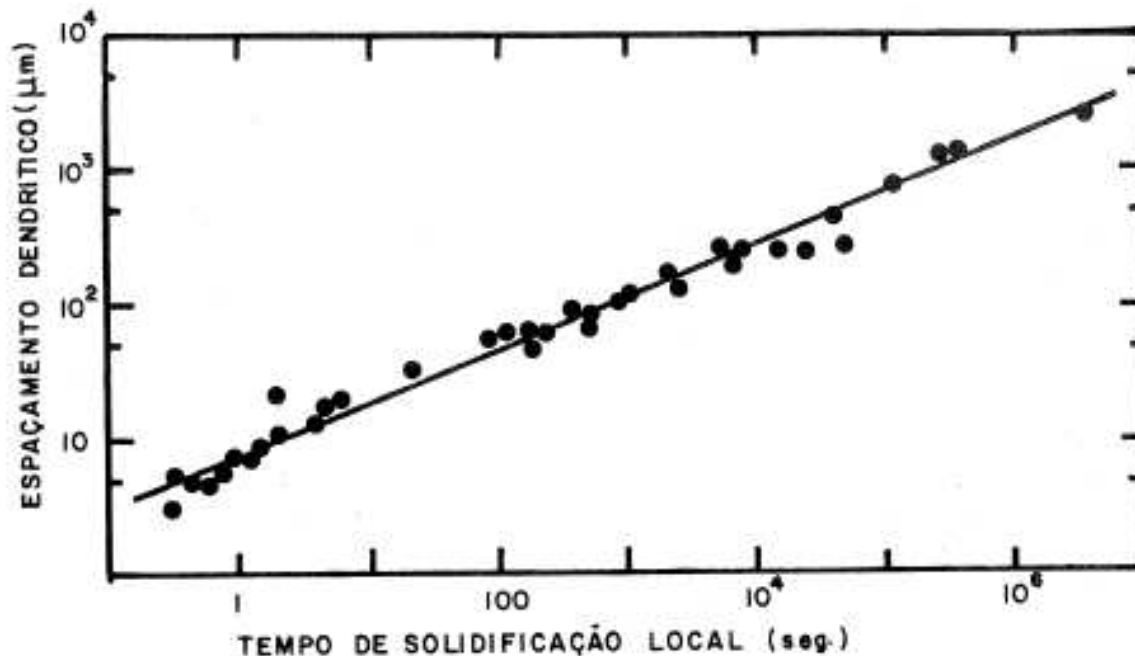


Fig. 4.13 Variação no espaçamento entre as ramificações dendríticas, em função do tempo de solidificação local: (a) em alumínio-4,5% cobre; (b) em alumínio-10% cobre; (c) em alumínio-15% cobre; (d) em alumínio-20% cobre; (e) em alumínio-25% cobre; (f) em alumínio-30% cobre; (g) em alumínio-35% cobre; (h) em alumínio-40% cobre; (i) em alumínio-45% cobre; (j) em alumínio-50% cobre; (k) em alumínio-55% cobre; (l) em alumínio-60% cobre; (m) em alumínio-65% cobre; (n) em alumínio-70% cobre; (o) em alumínio-75% cobre; (p) em alumínio-80% cobre; (q) em alumínio-85% cobre; (r) em alumínio-90% cobre; (s) em alumínio-95% cobre; (t) em alumínio-99% cobre.



Microssegregação

- Celular
- Dendrítica
- Em contorno de grão

Microsegregação Celular

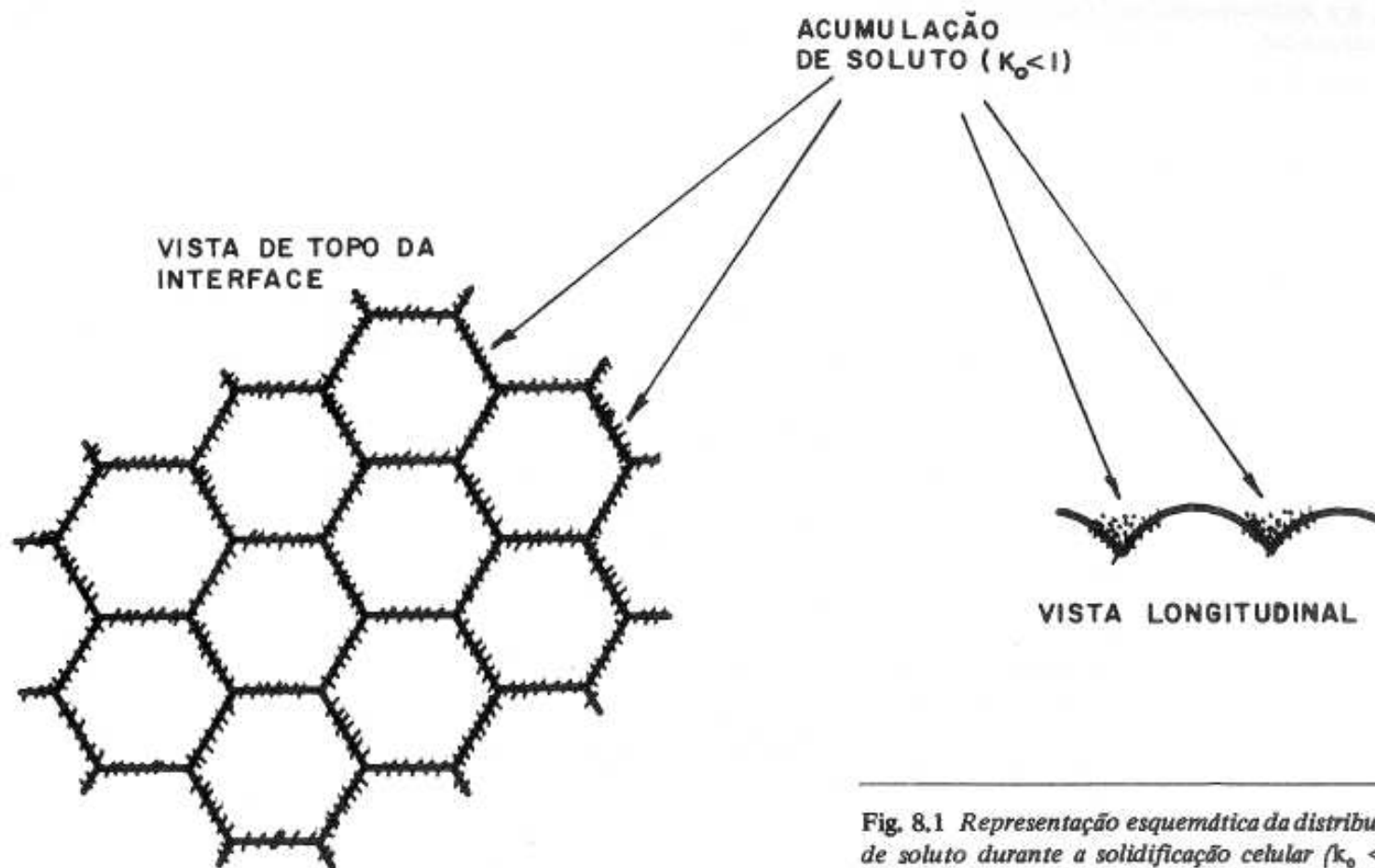


Fig. 8.1 Representação esquemática da distribuição de soluto durante a solidificação celular ($k_0 < 1$).

Microsegregação Dendrítica

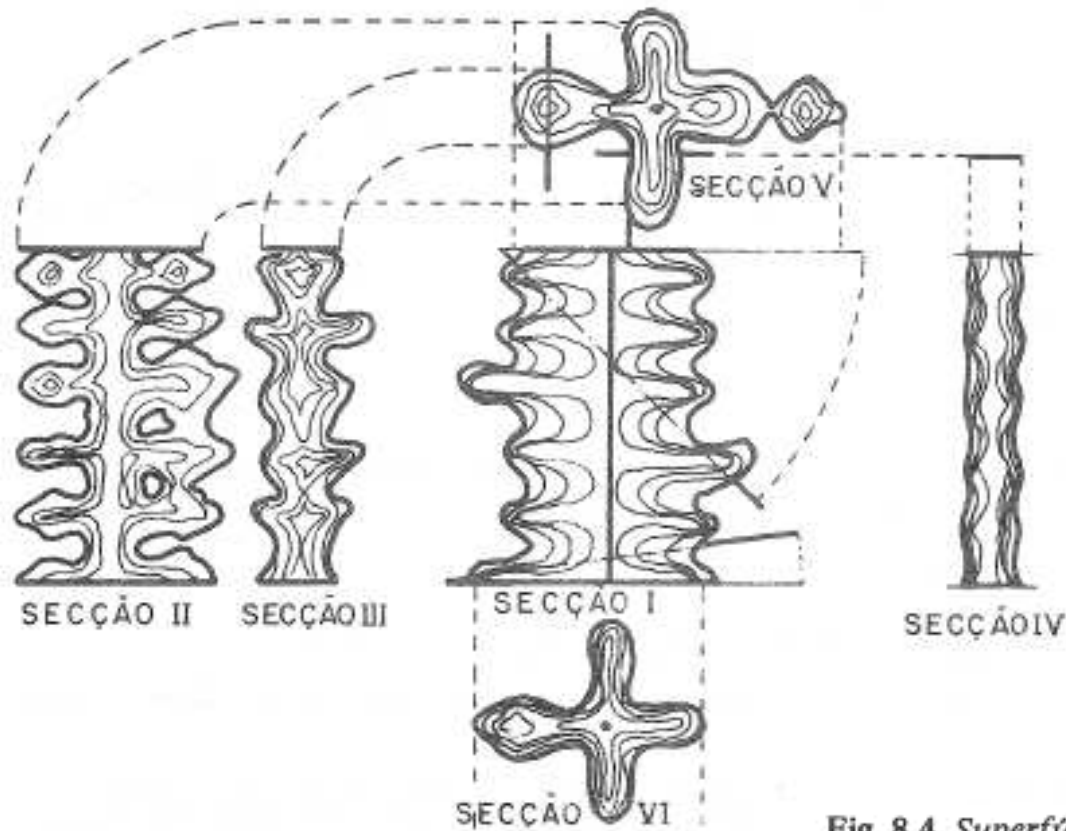
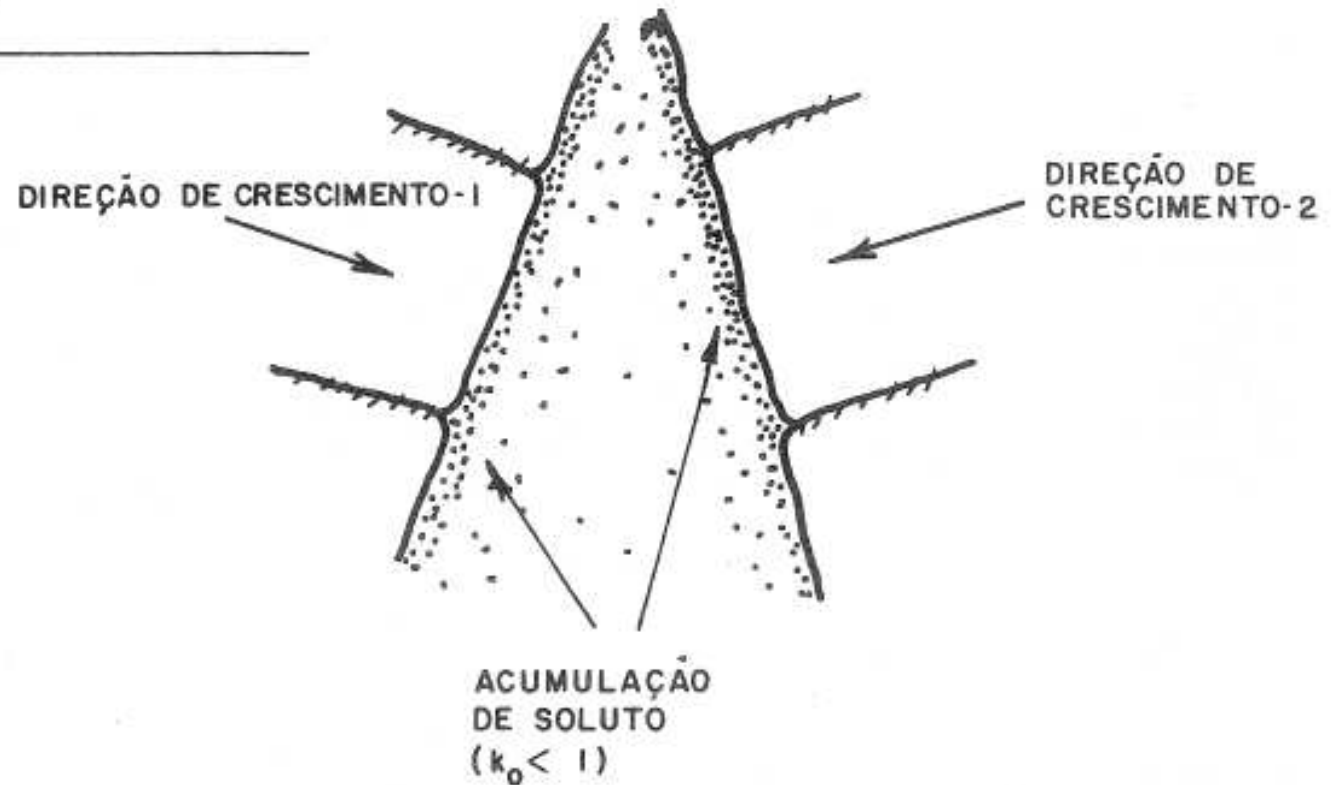


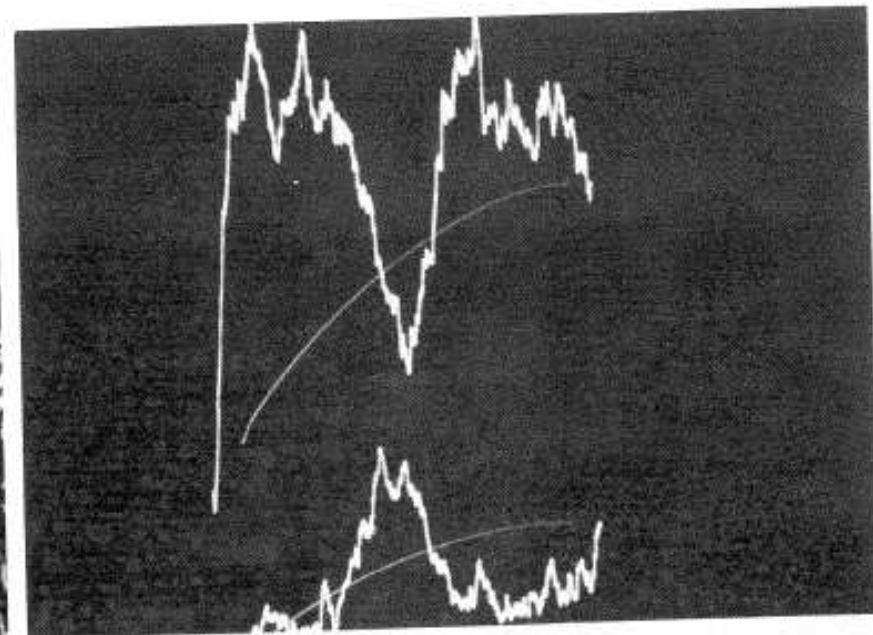
Fig. 8.4 Superfície de mesma concentração num crescimento dendrítico colunar (aço de baixa liga).

Microssegragação em Contorno de Grão

Fig. 8.7 Esquema de formação de um contorno de grão por confronto frontal.



Exemplo de Microsegregação Dendrítica

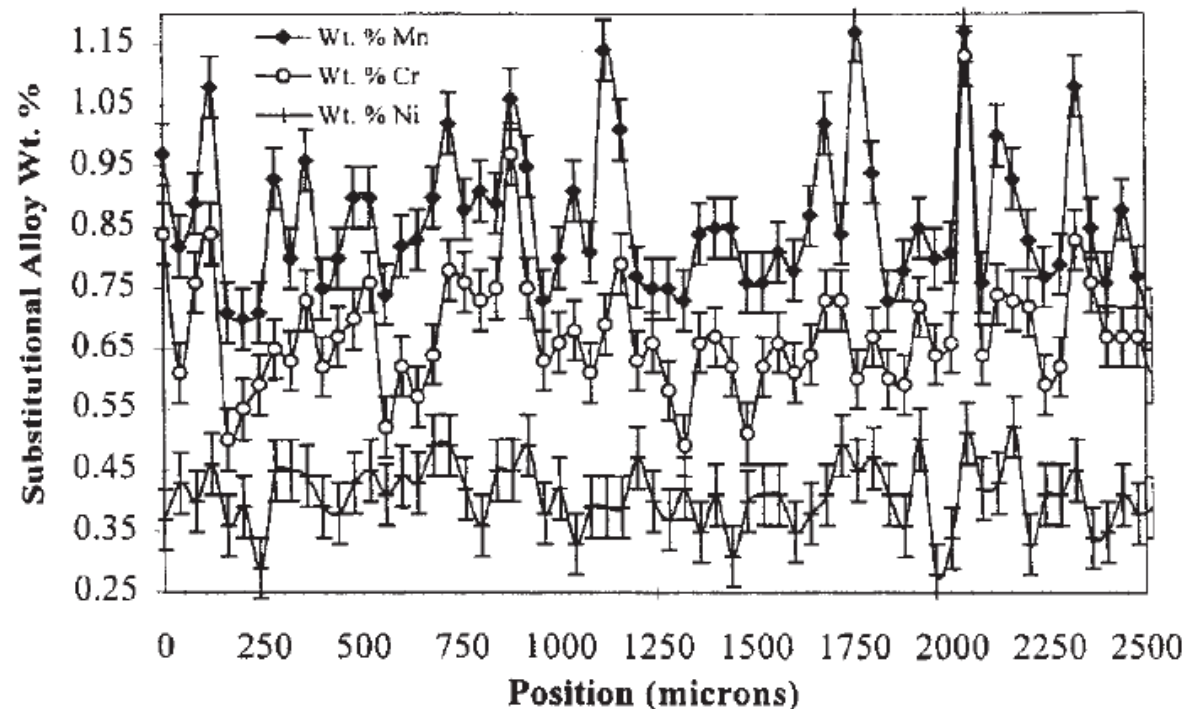


(a)

(b)

Fig. 4.9 Coring em cupro-níquel fundido com resfriamento rápido ($k_0 < 1$): (a) estrutura fundida; (b) varredura de microsonda eletrônica entre duas ramificações dendríticas. A natureza qualitativa da segregação é mostrada como um máximo e um mínimo, respectivamente para cobre e níquel.

Algumas conseqüências



- Alteração da temperabilidade do aço ao longo da microestrutura (mesmo após processamento termomecânico)

Fig. 12—Variations in Mn, Cr, and Ni across a hot-rolled bar of 8617H steel, 26.19 mm in diameter and containing by heat analysis 0.82 pct Mn, 0.52 pct Cr, and 0.44 pct Ni. WDS SEM analysis.

Algumas conseqüências

- Bandeamento em aços ao carbono

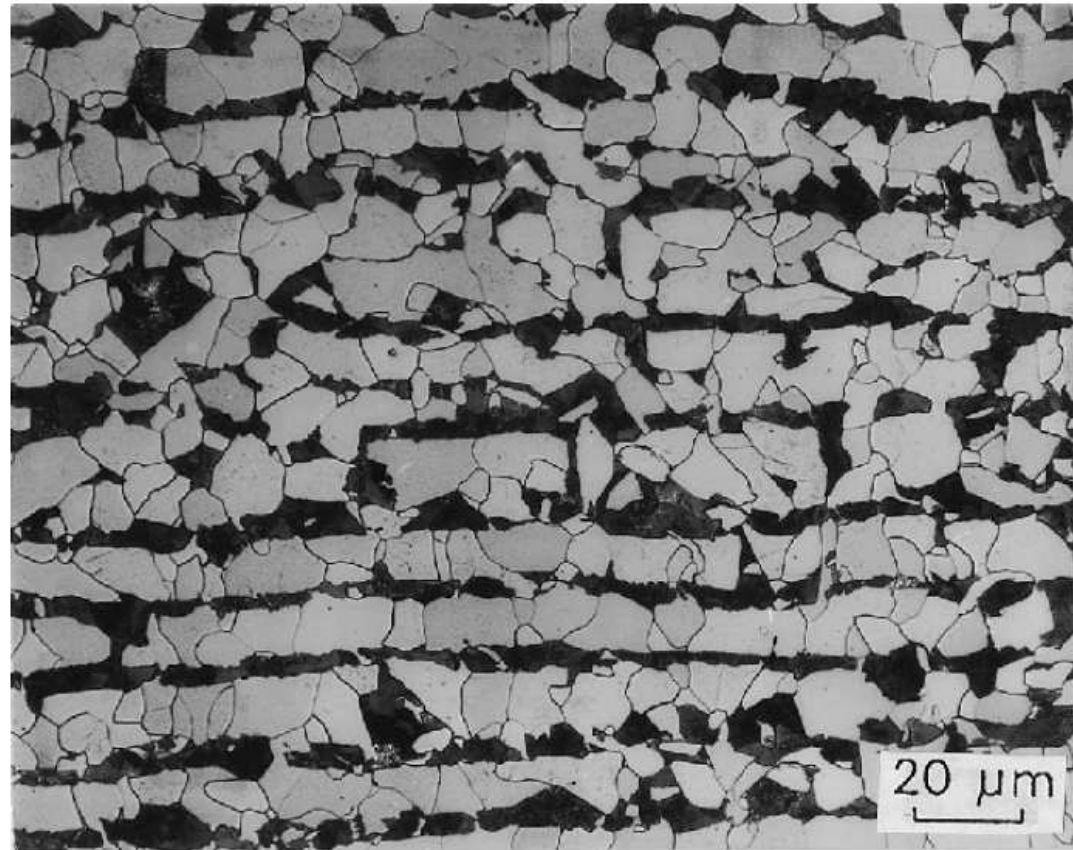
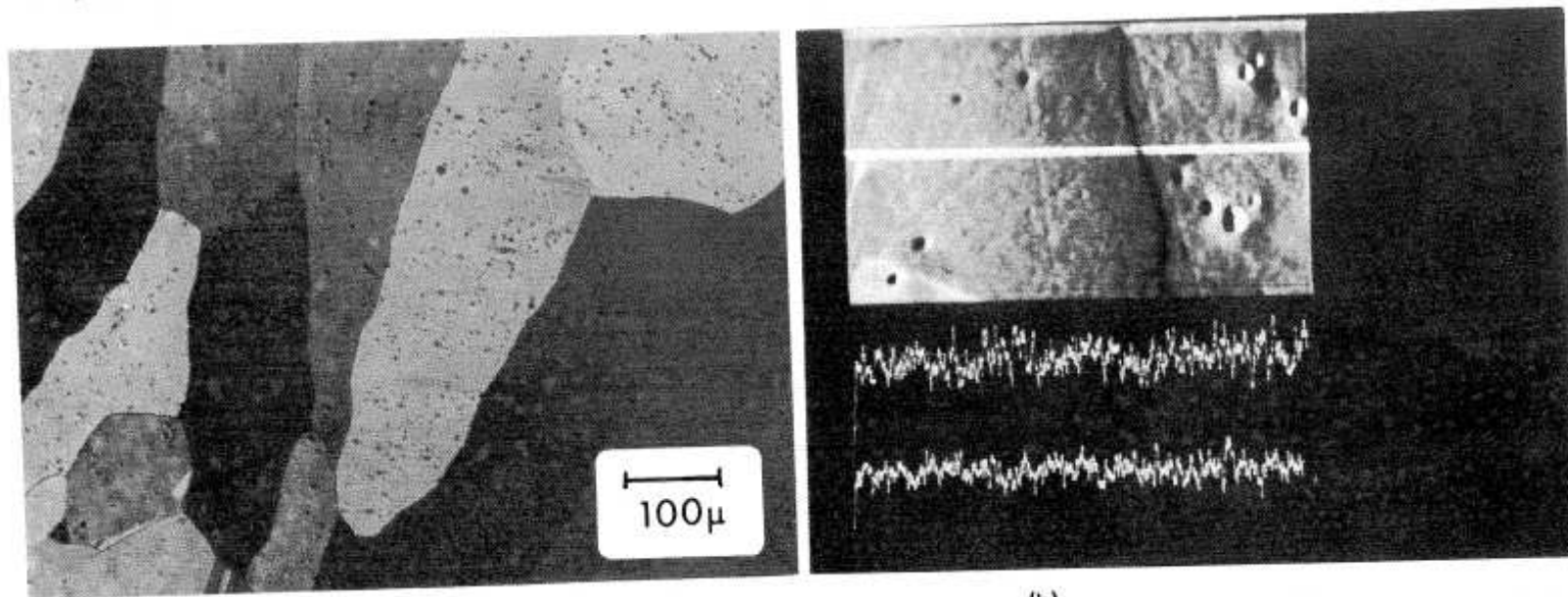


Fig. 13—Ferrite (light) and pearlite (dark) bands in 1020 steel hot-rolled plate. Nital etch, light micrograph.

Eliminando a Microsegregação

- Tratamento Térmico de Homogeneização



(a)

(b)

Fig. 4.10 Estrutura da Fig. 4.9 após homogeneização: (a) estrutura granular. (As pequenas partículas escuras são impurezas intermetálicas); (b) varredura de microsonda eletrônica, através do contorno de grão. (O contorno é uma linha escura na imagem eletrônica e a varredura corresponde a uma linha branca na imagem eletrônica.)



Macrossegragação Normal

- Ocorre quando os grãos crescem com interface planar ou quase planar numa única direção
- O soluto é segregado a **longas distâncias**



Outras formas de Macrossegregação

- Por gravidade
 - Dendritas livres primárias que se decantam
 - [Filme](#)
- Inversa
 - Por fluxo de líquido rico em soluto nos canais interdendríticos devido à contração do sólido ou diferenças de densidade no líquido



Lista de símbolos

k_0 – coeficiente de distribuição

C_S – concentração de soluto no sólido

C_L – concentração de soluto no líquido

C_0 – concentração de soluto na liga

f – fração solidificada

R – velocidade de avanço da interface sólido/líquido

D_L – difusividade no líquido

k_E – coeficiente de distribuição efetivo

S – espessura da camada limite de difusão

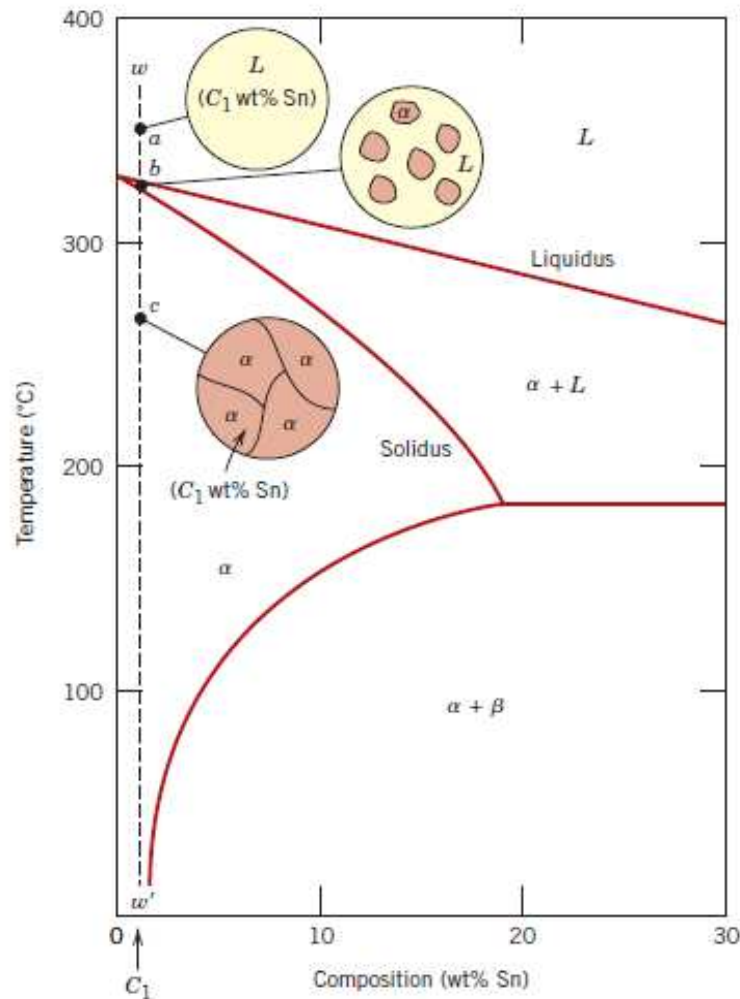
G_S – gradiente térmico no sólido

G_L – gradiente térmico no líquido

m – inclinação da linha liquidus (convencionalmente com sinal contrário)

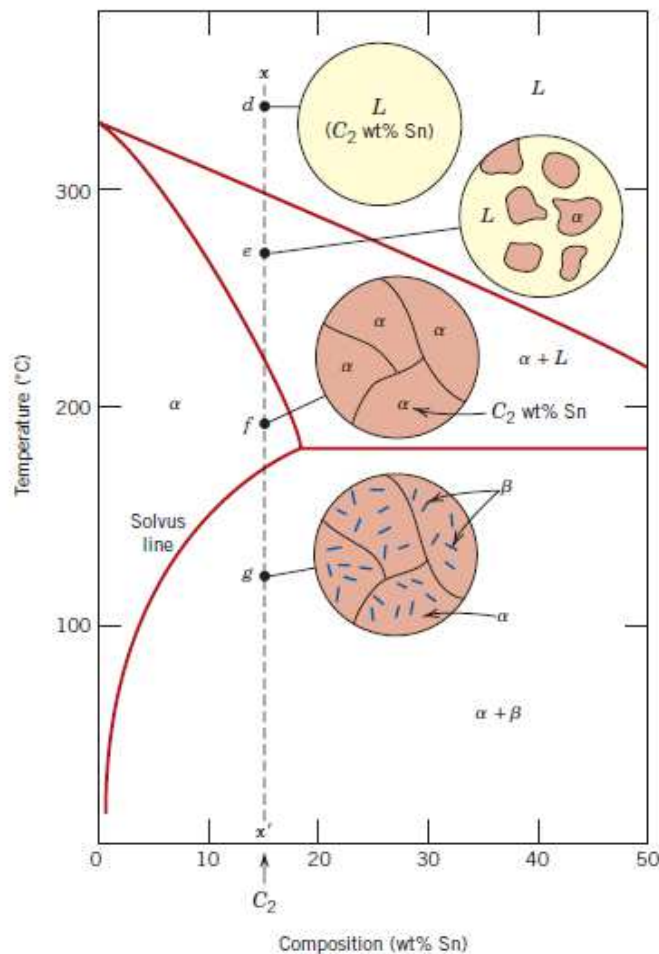
λ – espaçamento entre os braços dendríticos

Formação da Microestrutura



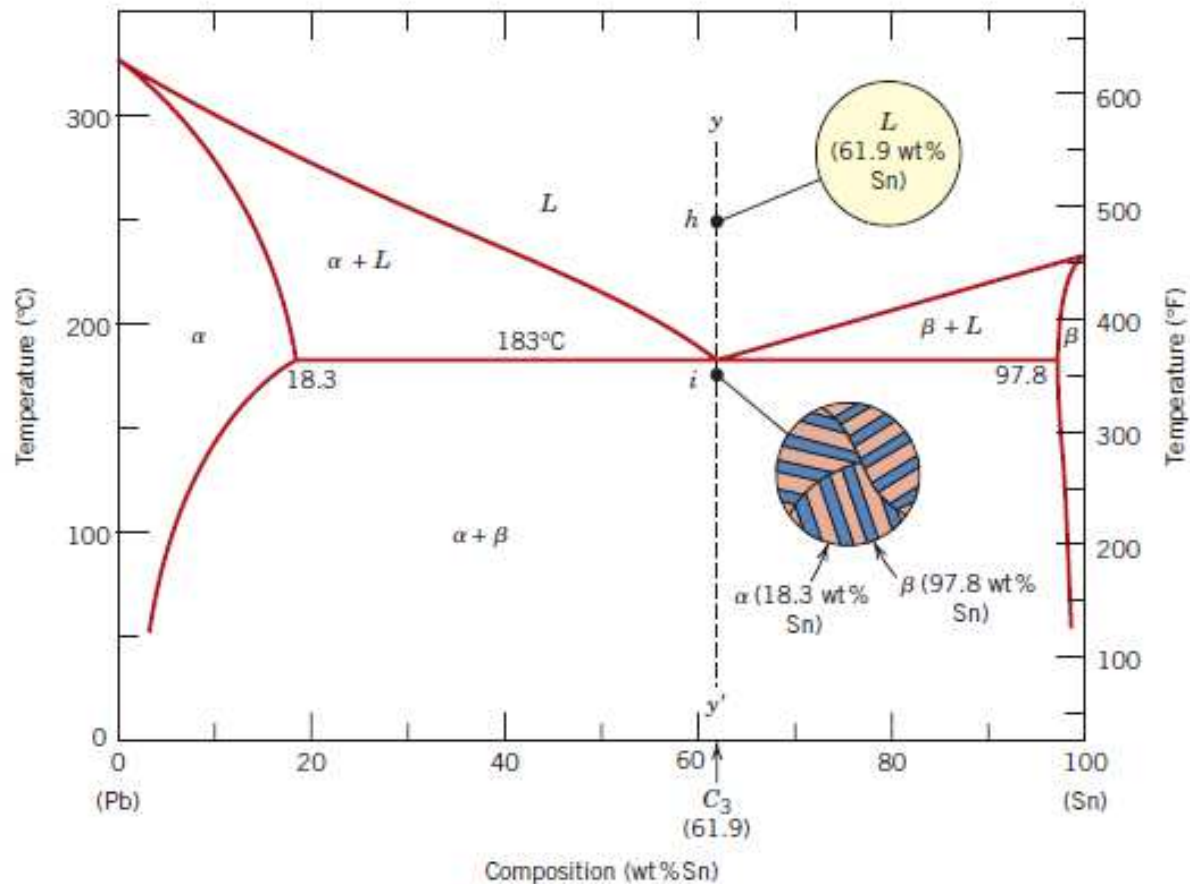
Liga Monofásica

Formação da Microestrutura



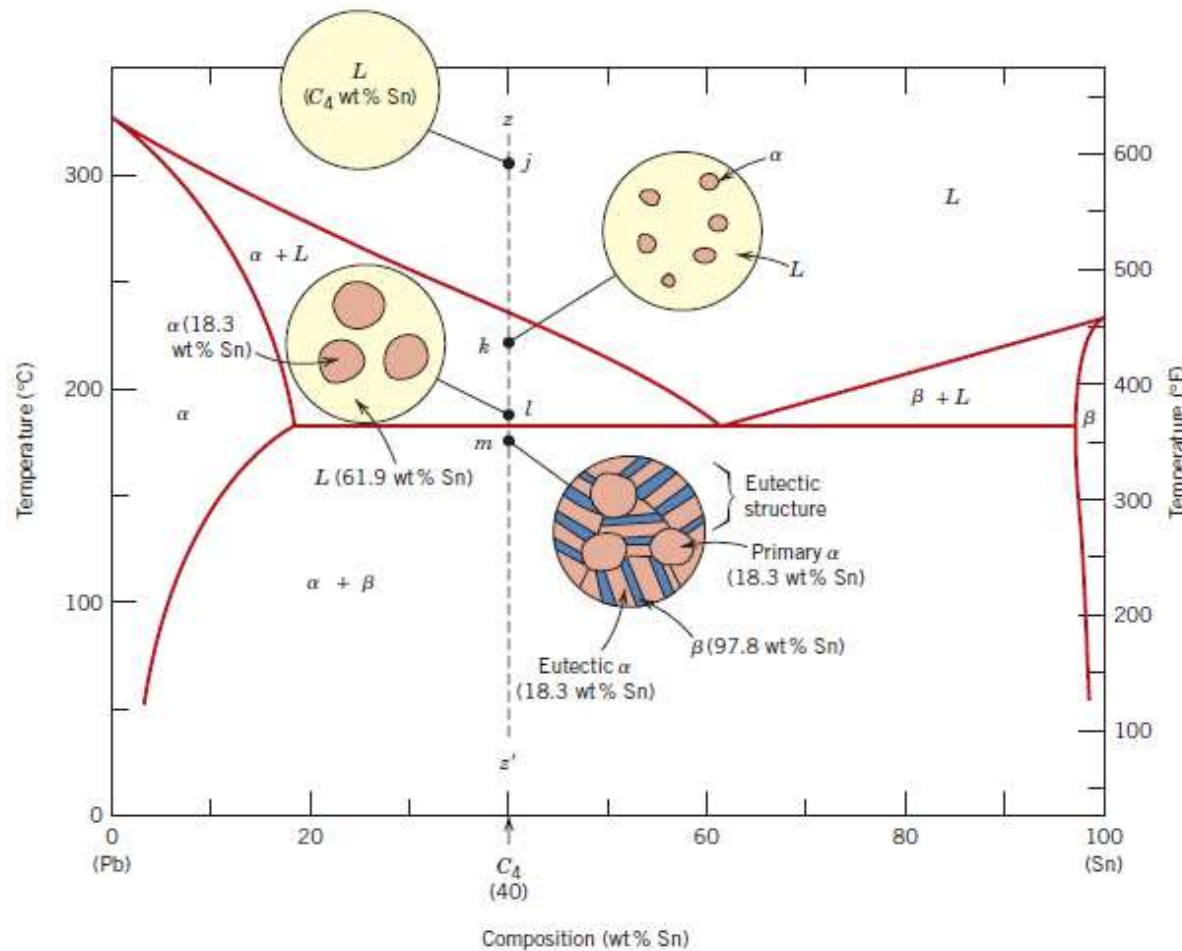
Liga Bifásica
c/ precipitação da segunda
fase no estado sólido

Formação da Microestrutura



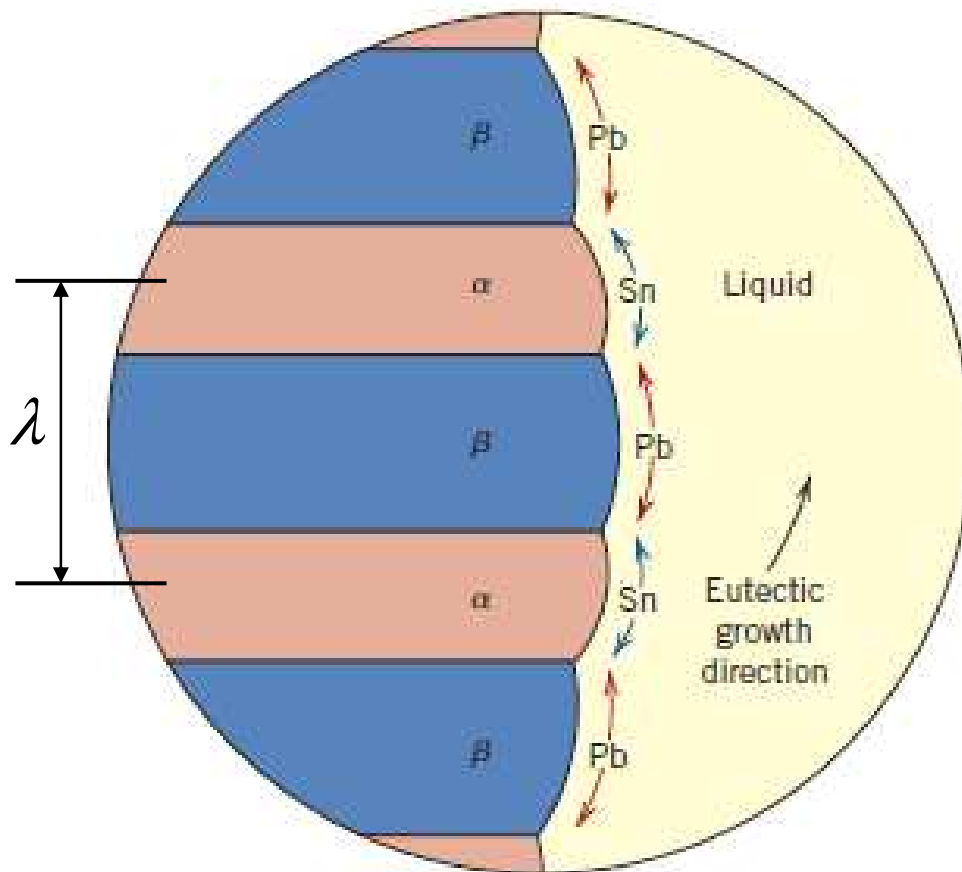
Liga Bifásica
Eutética

Formação da Microestrutura



Liga Bifásica
Hipoeutética

Crescimento do Eutético



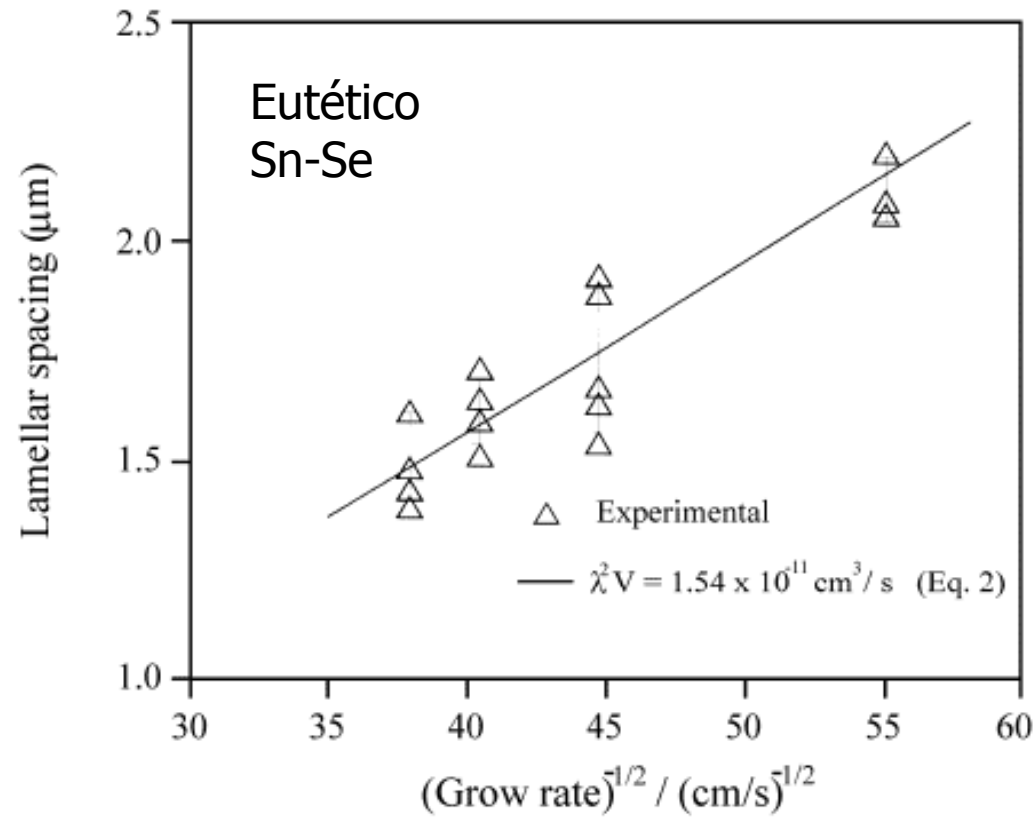
líquido $\rightarrow \alpha + \beta$

- Crescimento Cooperativo controlado pela difusão
- Espaçamento lamelar depende da velocidade de crescimento

$$\lambda \propto \frac{1}{\sqrt{R}}$$

Espaçamento Lamelar X Velocidade de Crescimento

$$\lambda \propto \frac{1}{\sqrt{R}}$$





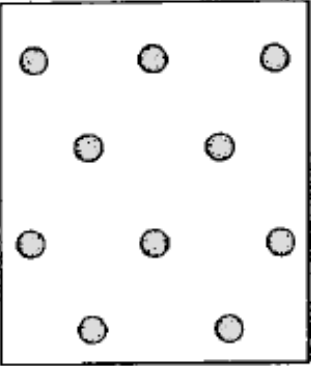
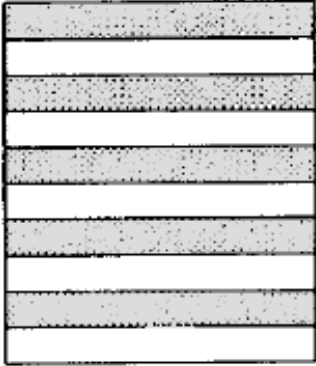
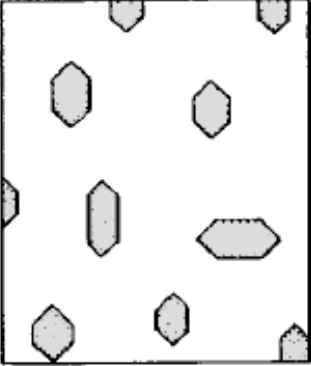
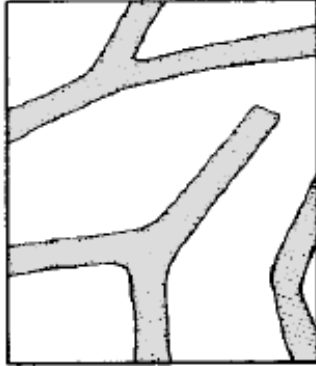
Morfologia do Eutético

- Depende de:
 - Fração volumétrica das fases
 - Interface dos cristais (facetada ou não-facetada)
 - Velocidade de crescimento

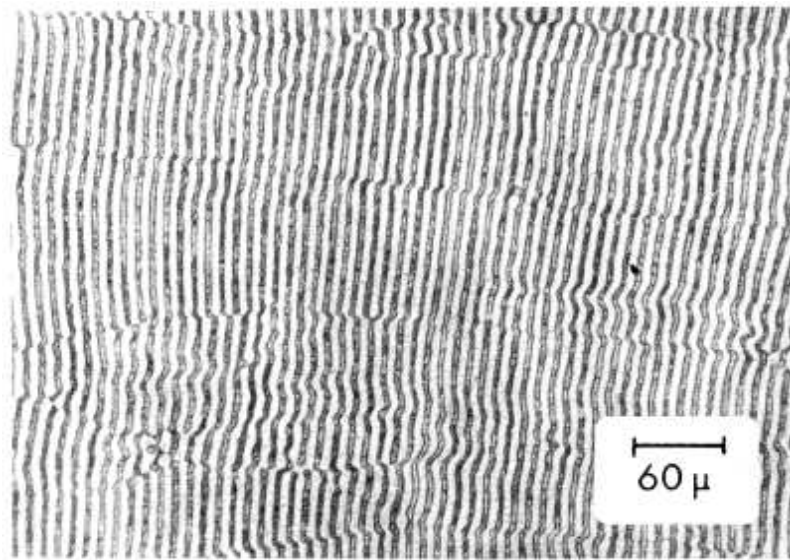
Morfologia do Eutético

Branco – fase α
(não facetada)

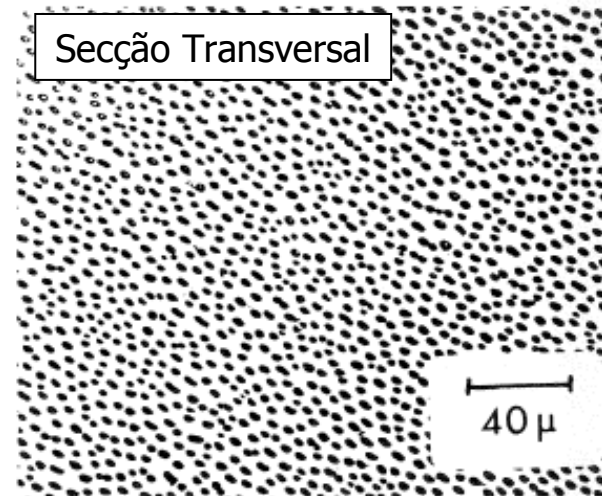
Cinza – fase β

	Pequena fração de β	Alta fração de β
β não facetada		
β facetada		

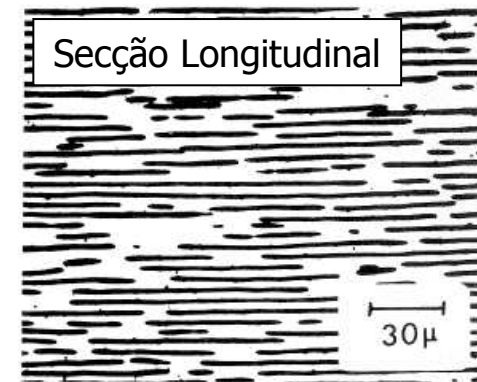
Morfologia do Eutético



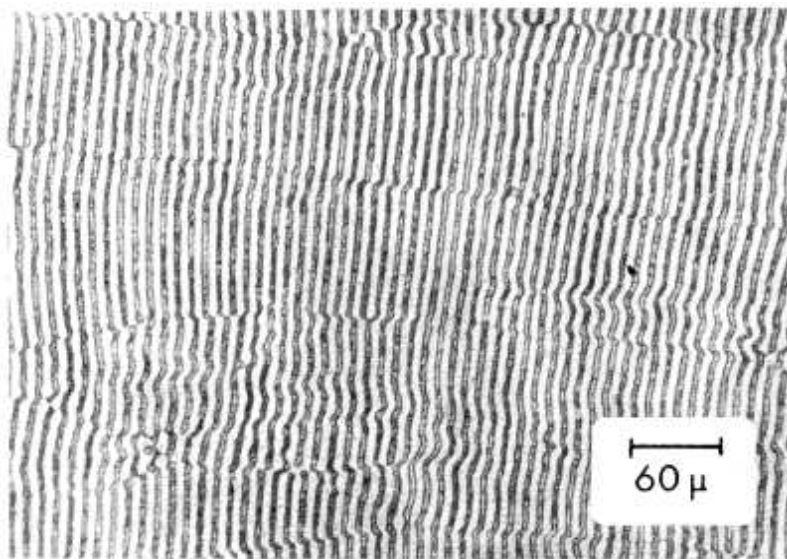
Pb-Sn
lamelar



Al-Al₃Ni
fibroso



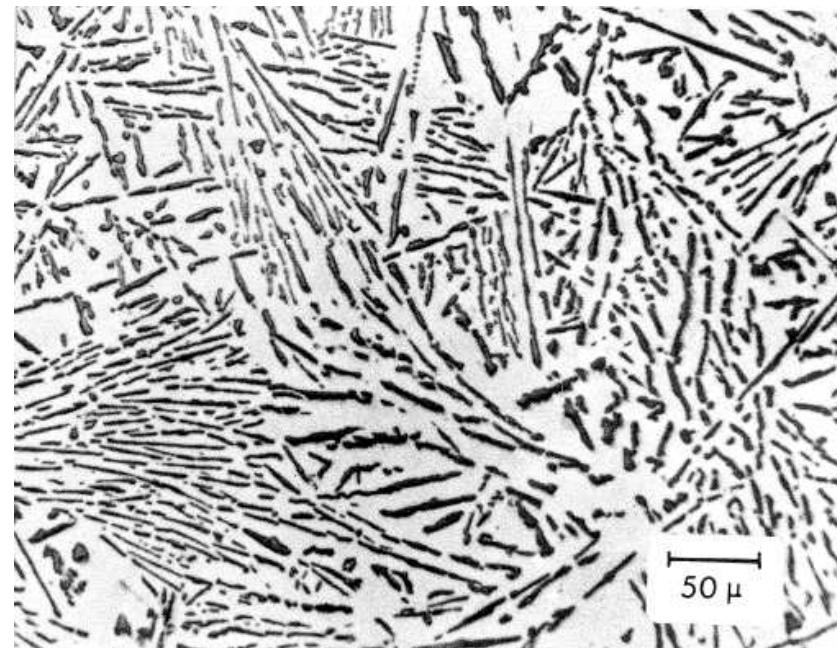
Morfologia do Eutético



Pb-Sn

Pb – não facetada

Sn – não facetada

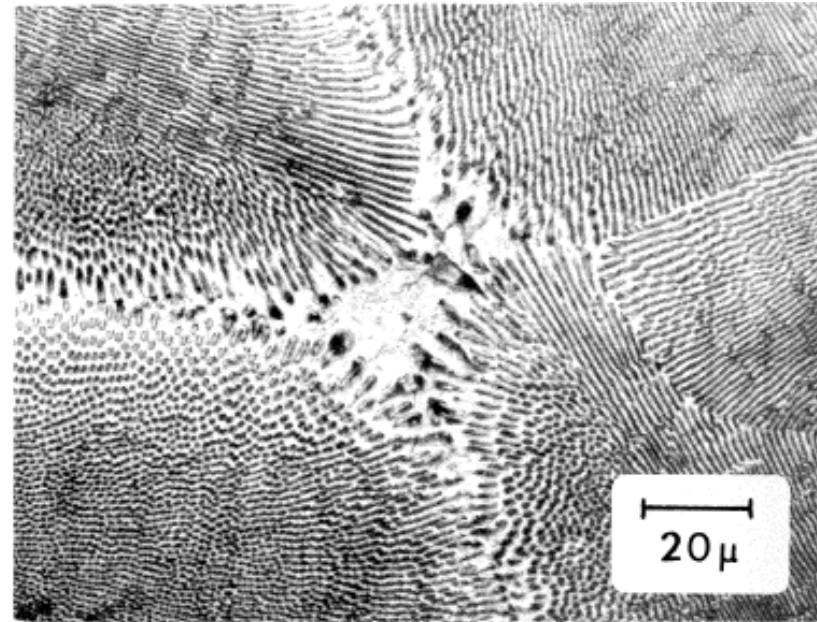
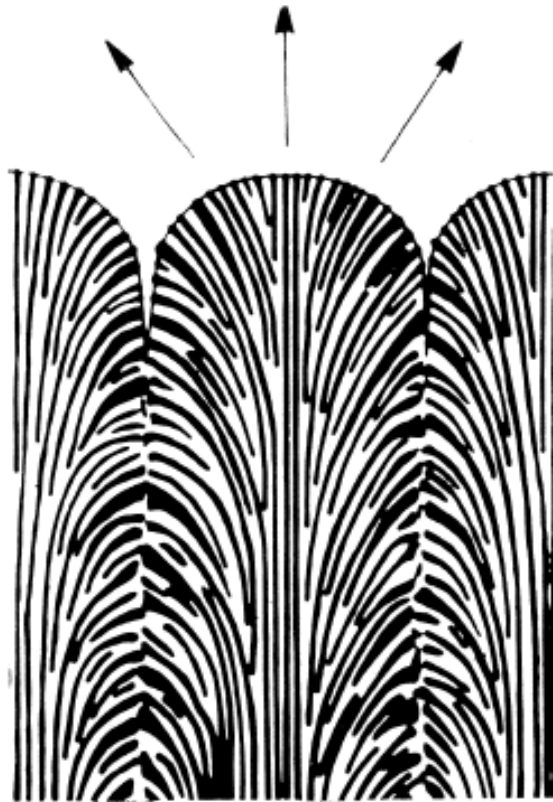


Al-Si

Al – não facetada

Si – facetada

Crescimento de eutético na presença de impurezas



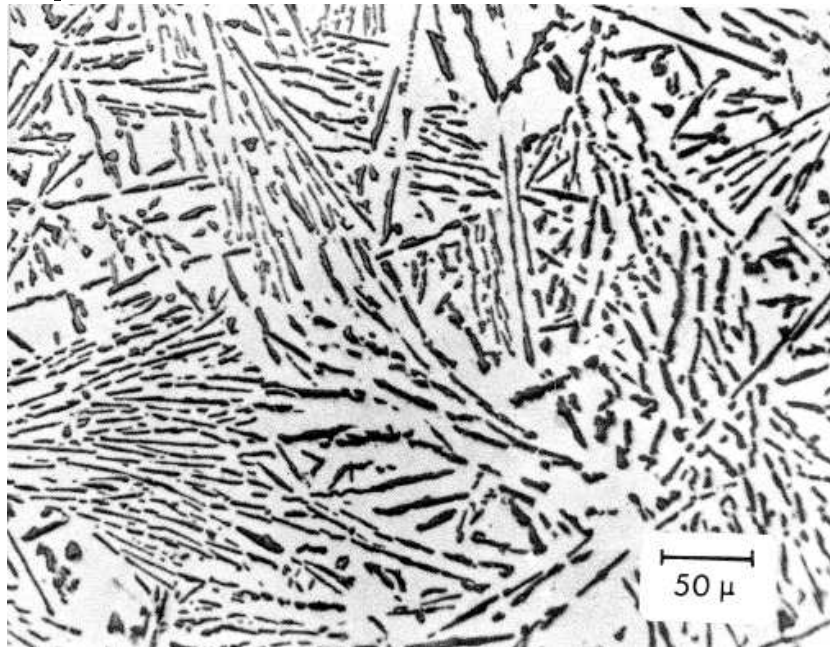
Pb-Cd c/ impurezas



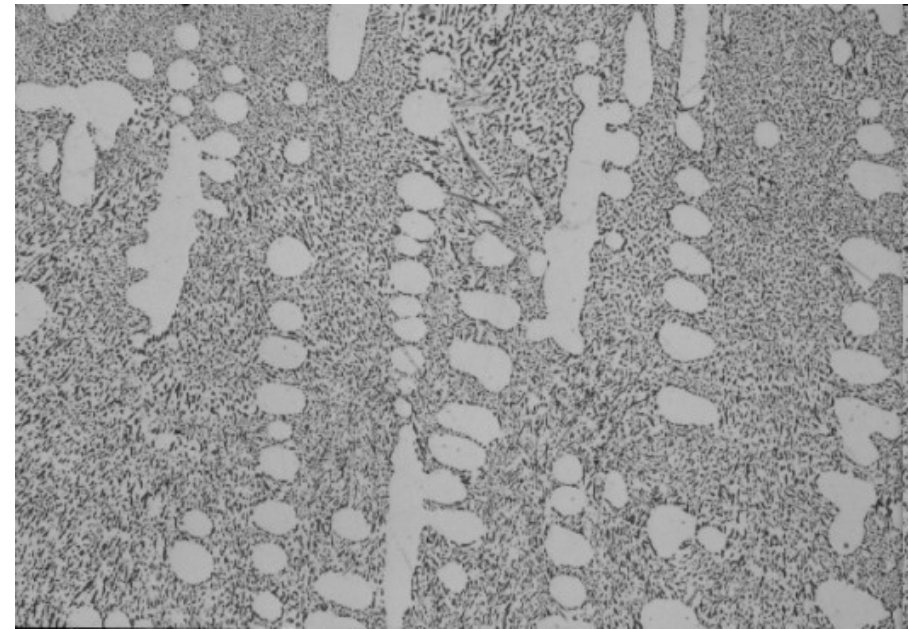
Morfologia do Eutético

- Filme (Resumo)
- http://mechse.illinois.edu/research/dantzig/solidification.org/Movies/Hunt/Jackson_Hunt_Eutectics_Smaller.gif

Modificação da Morfologia do Eutético

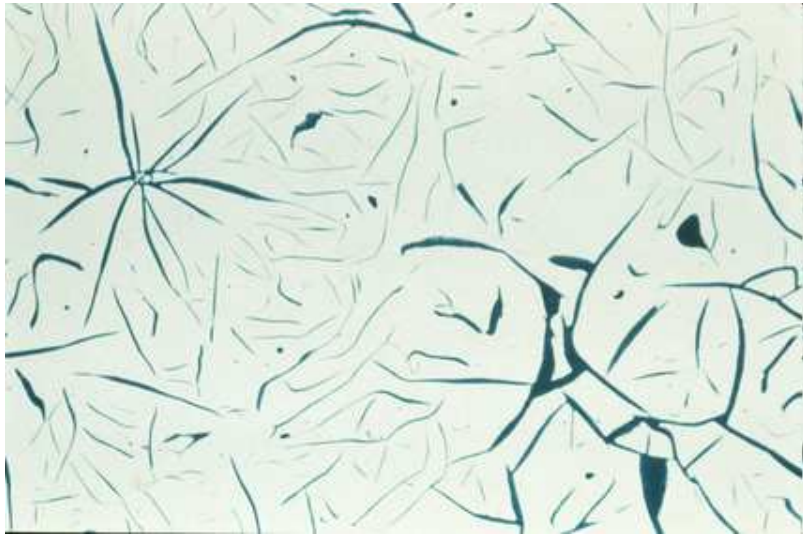


Al-Si

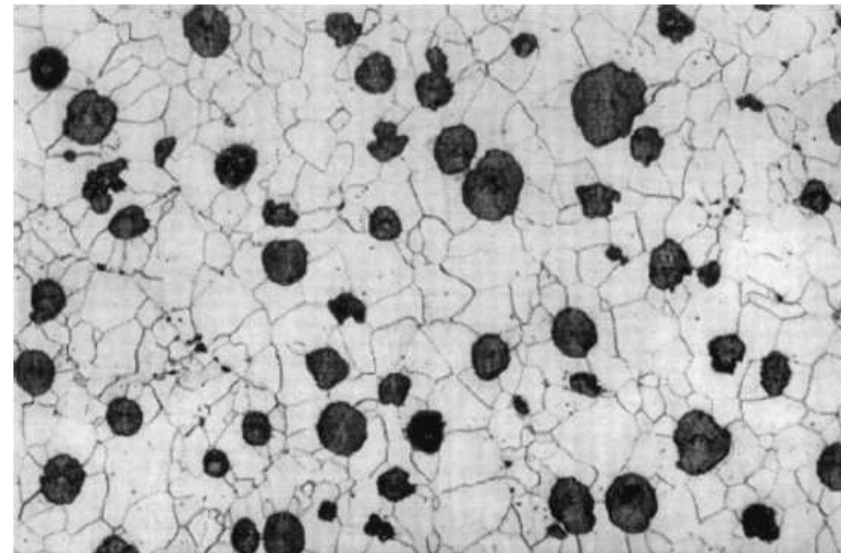


Al-Si
Modificado com Na, Sr ou Ca
0,01%

Modificação da Morfologia do Eutético



Fe-C
(FoFo Cinzento)



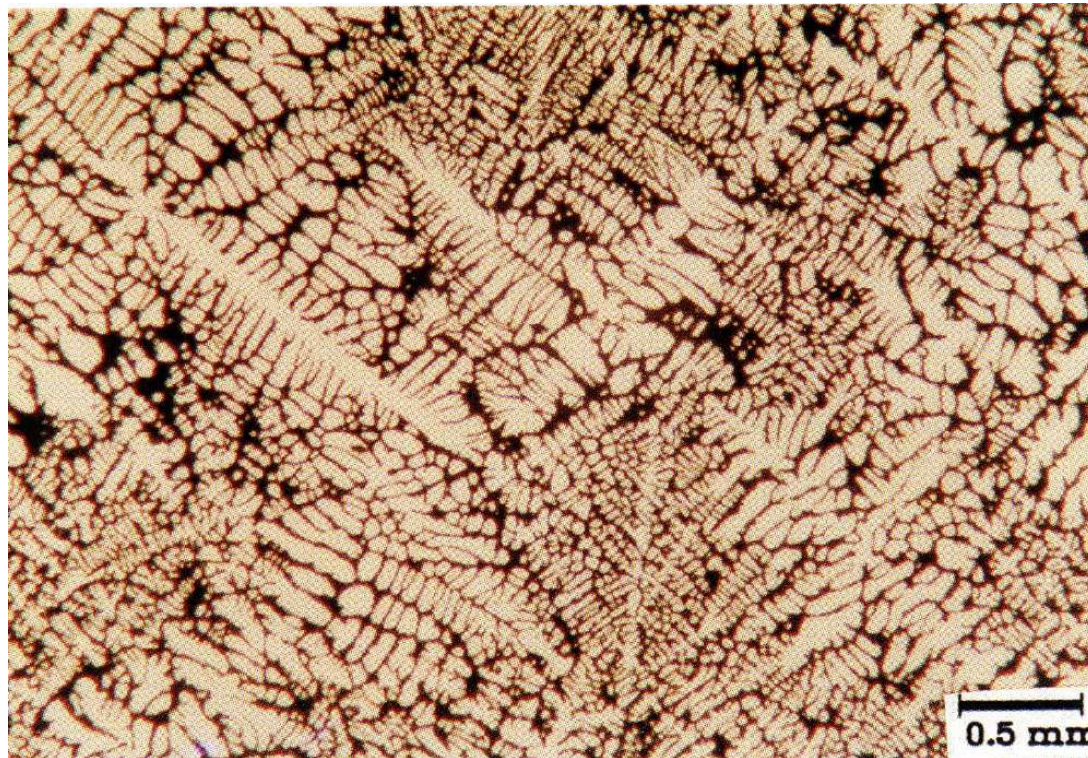
Fe-C
Modificado com Mg (0,04%)
ou Ce (0,04%)
(FoFo Nodular)



Porosidades

- Interdendríticas
- Evolução de gases

Microporosidades Interdendríticas

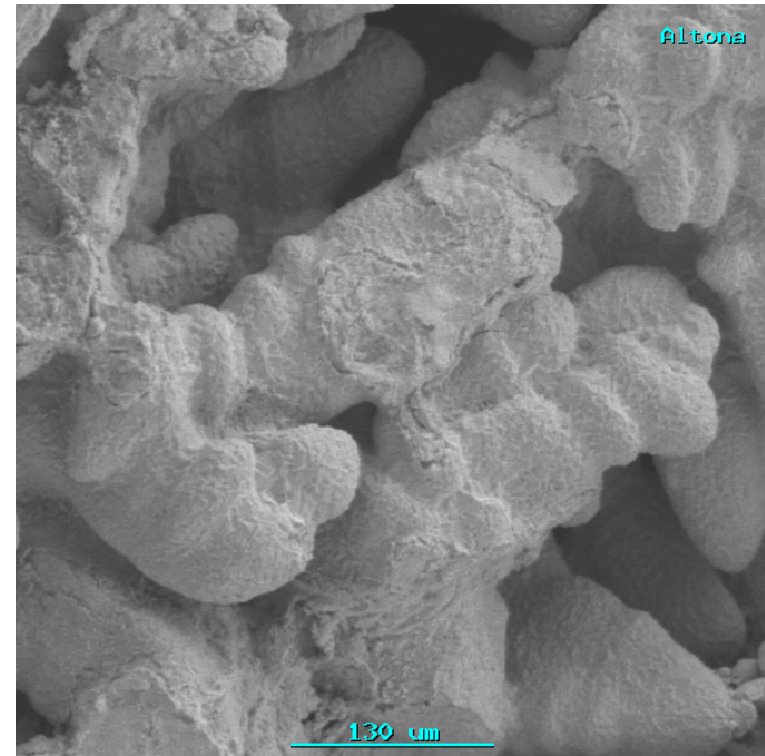
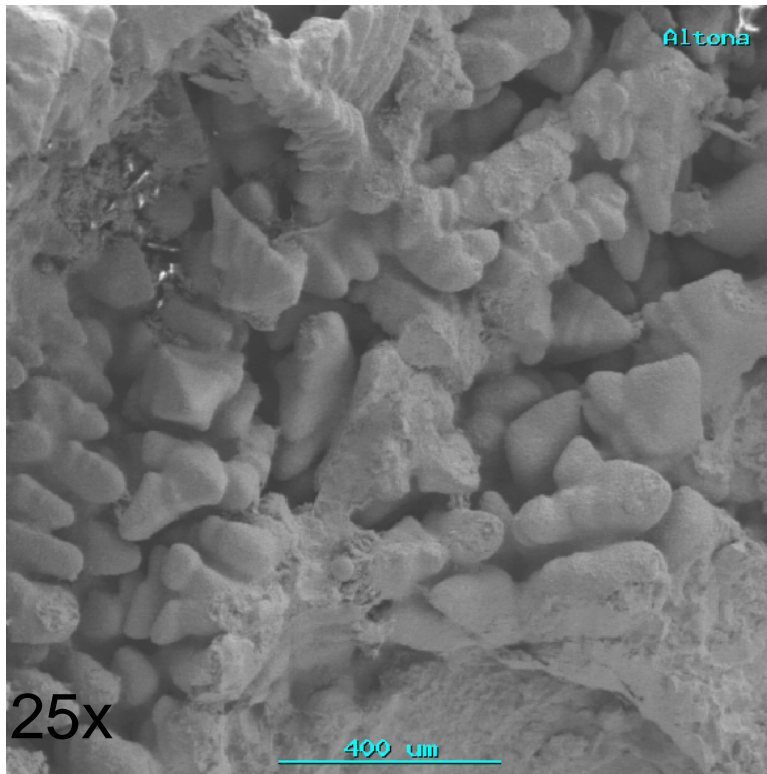


Liga de Al

Falta de líquido para suprir a contração interdendrítica

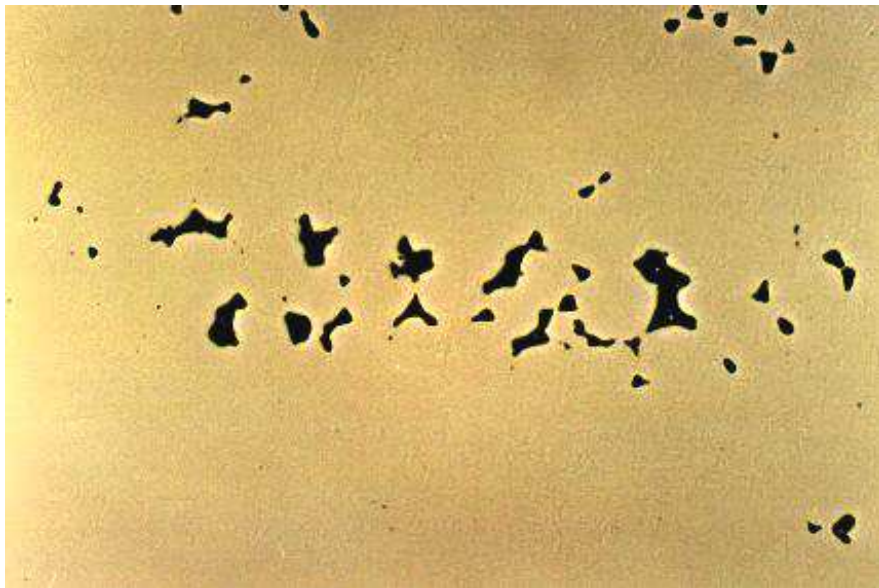
Microporosidades Interdendríticas

Aço ao carbono



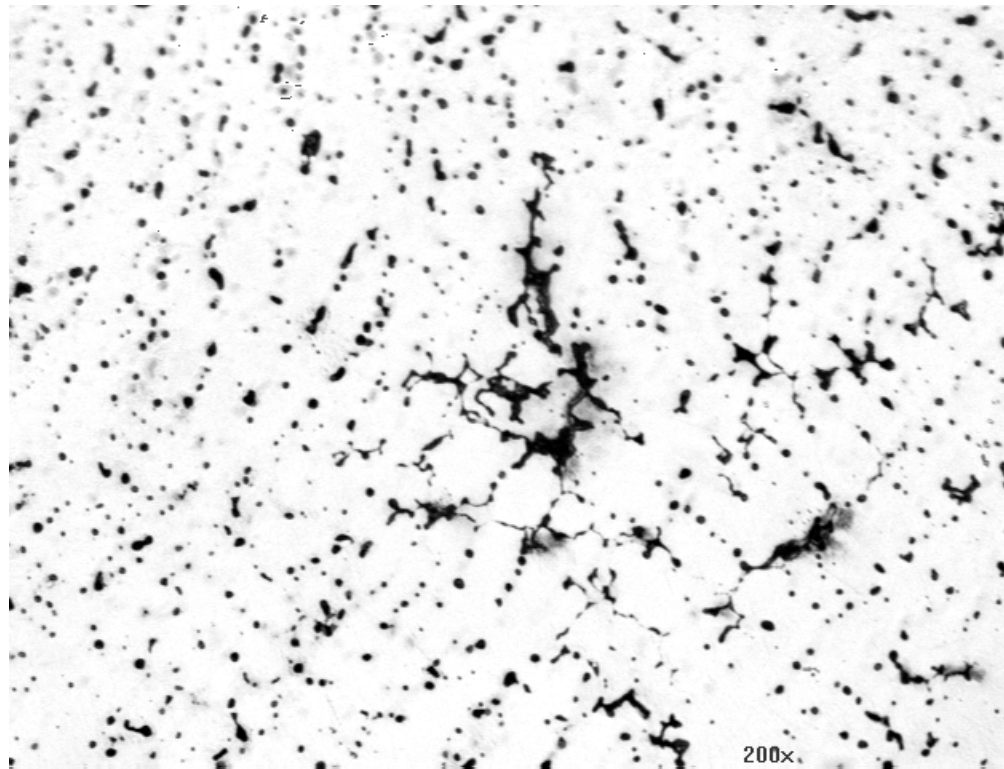
Microporosidades Interdendríticas

Aço ao carbono



Microporosidades Interdendríticas

Bronze 85-5-5-5



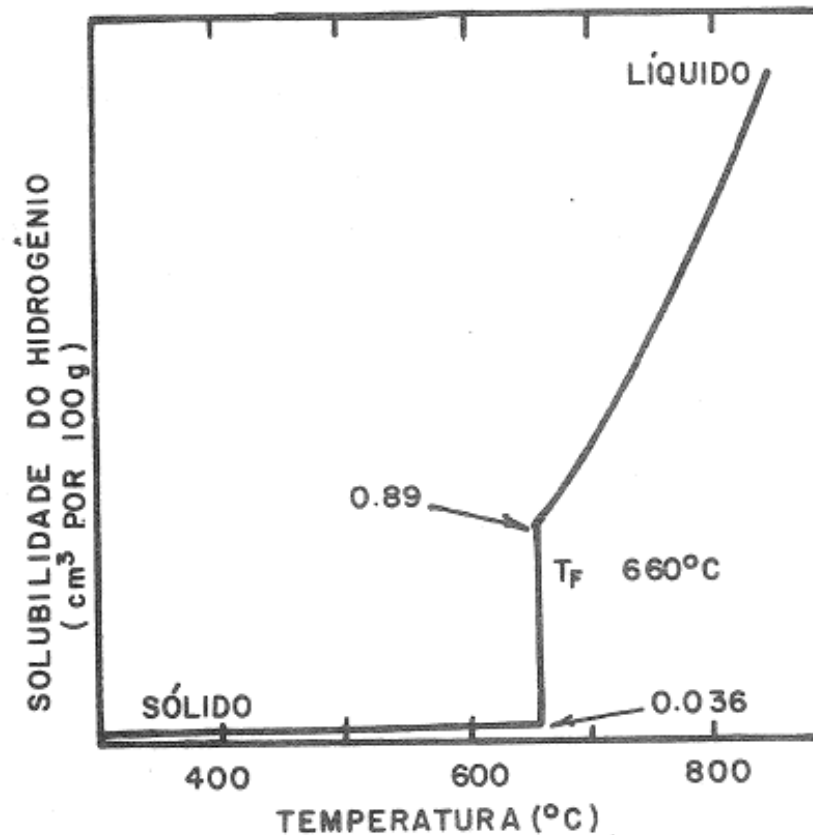
Porosidades Interdendríticas

Liga Al- 8%Si + 3,5%Cu

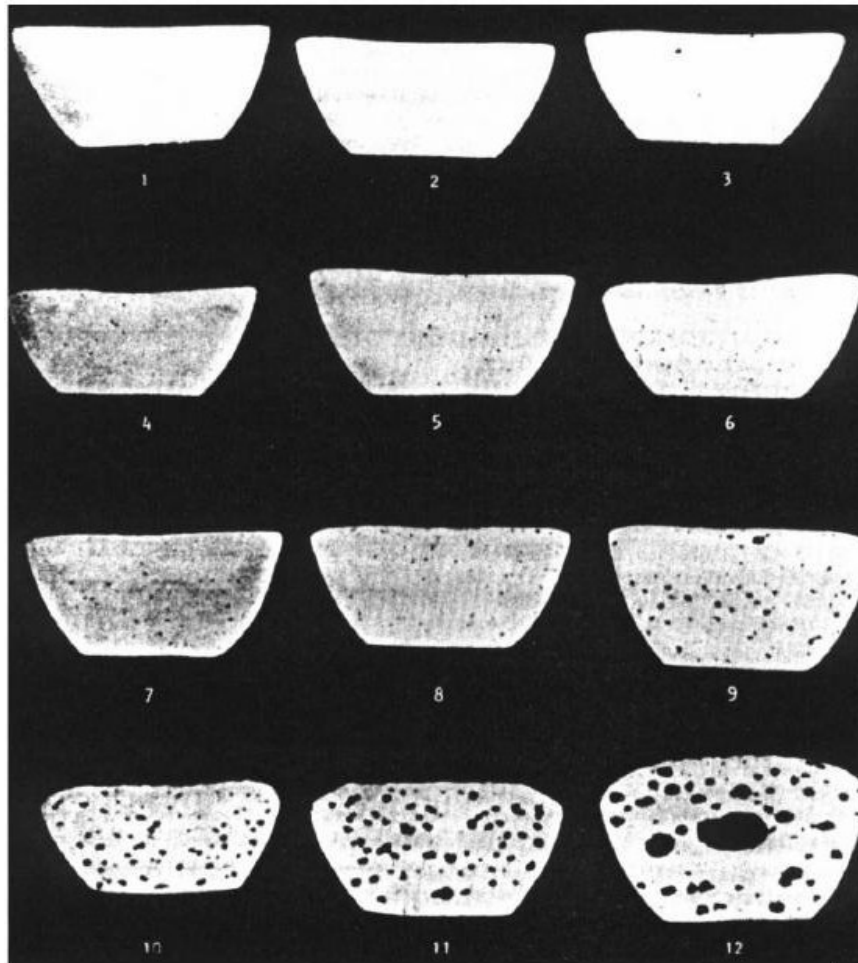


Evolução de Gases

- Exemplo: H em Al



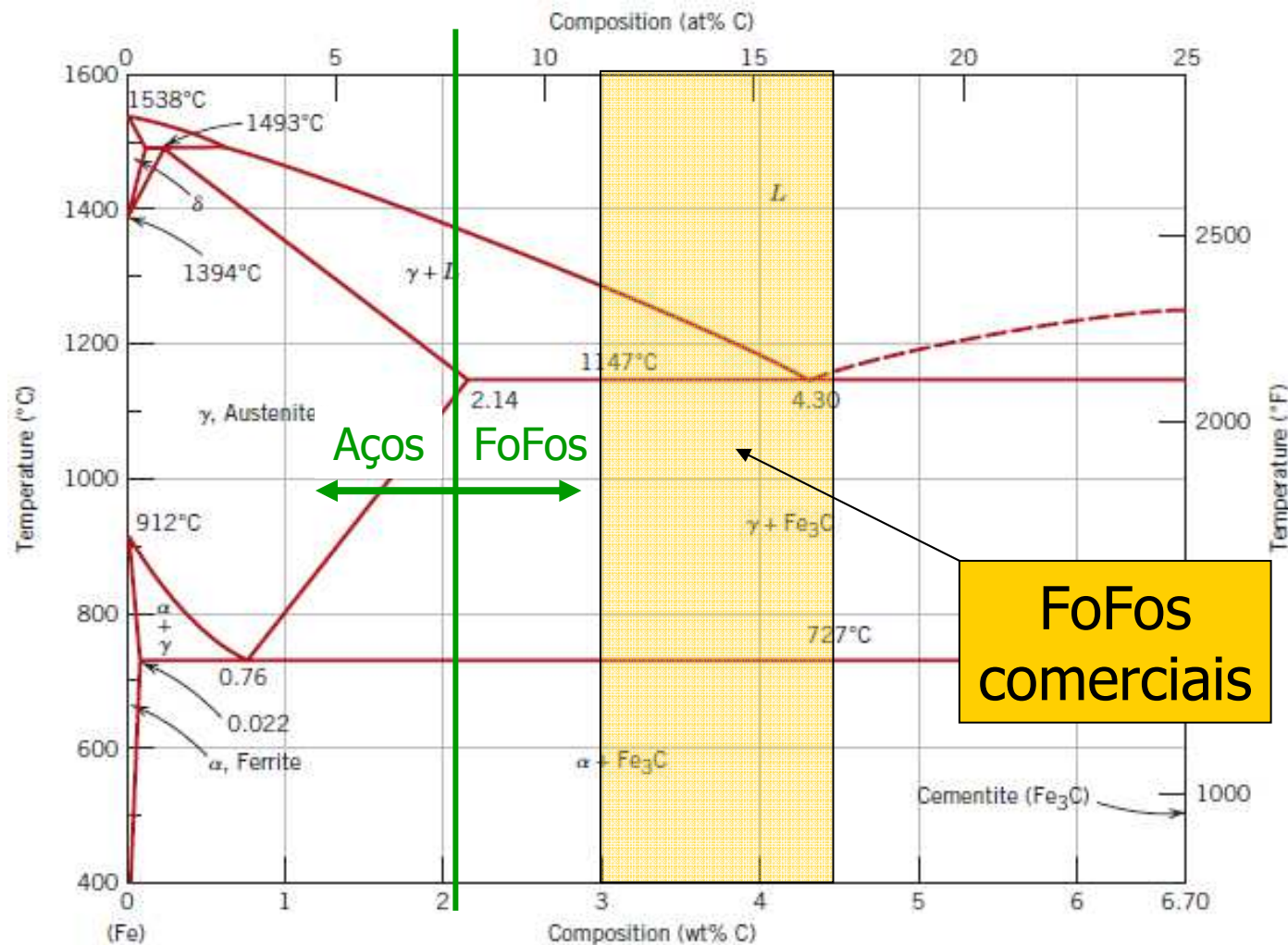
Porosidade devido à evolução de gases



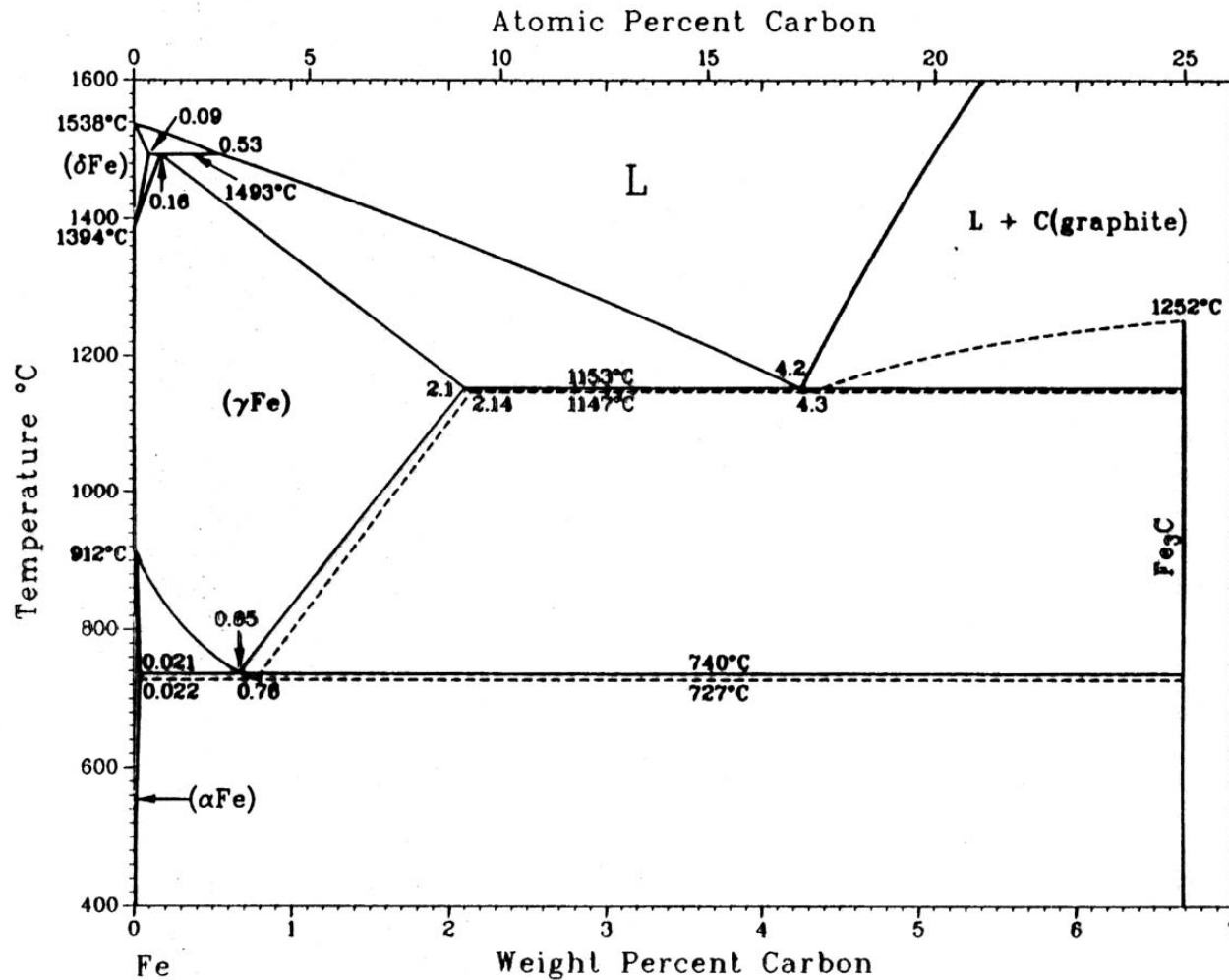
H em Al

Amostras obtidas sob pressão reduzida empregadas na avaliação da quantidade de hidrogênio dissolvido em banhos de alumínio. As intensidades de 1 a 12 representam teores crescentes de H.

Microestruturas dos FoFos



Microestruturas dos FoFos

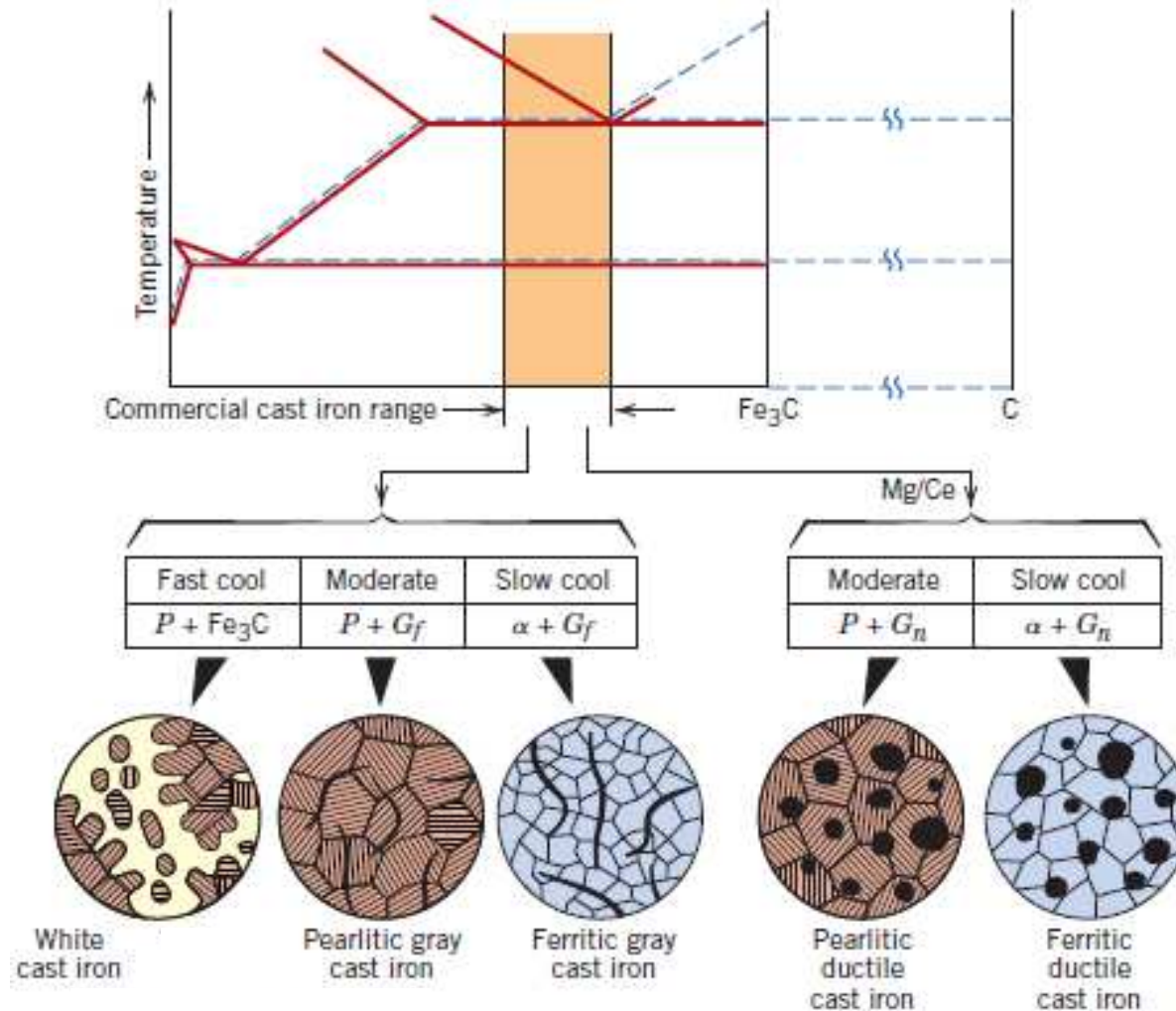




Microestruturas dos FoFos

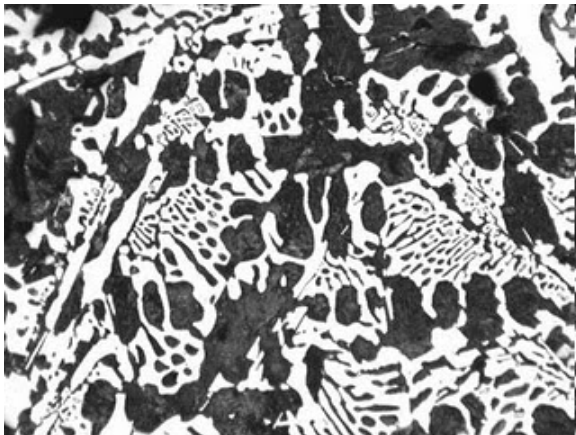
- A Cementita é uma fase metaestável
 - Resfriamento:
 - Mais lento: Grafita
 - Mais rápido: Cementita
 - Presença de Si:
 - Teor de Si acima de 1%: favorece a Grafita

Microestruturas dos FoFos

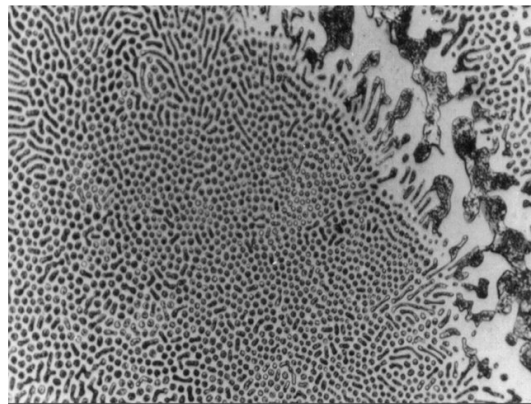


FoFo branco

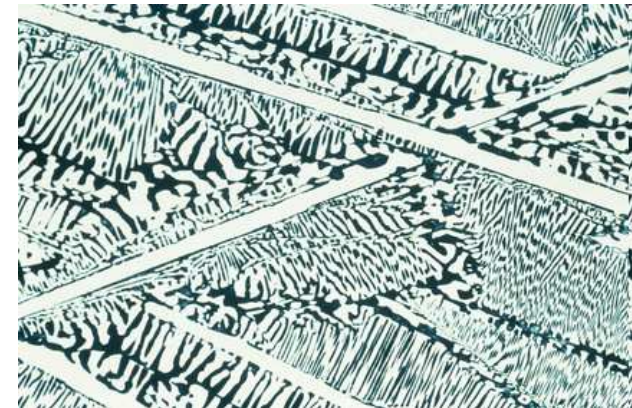
- Resfriamento rápido; ou moderado com Si < 1%



Hipoeutético
CE < 4,3%



Eutético
CE ~ 4,3%
(Ledeburita)

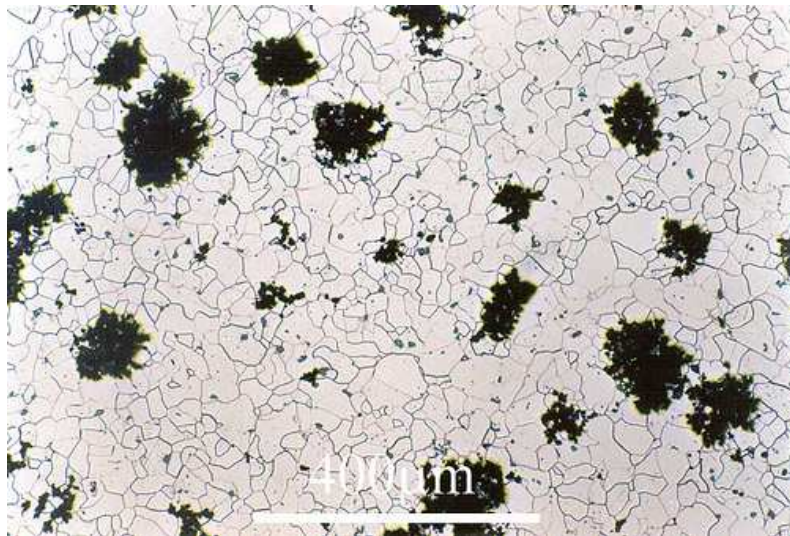


Hipereutético
CE > 4,3%

$$CE = \%C + \%Si/3$$

ToTo do FoFo branco

- Tratamento Térmico de Maleabilização
 - ~ 700°C por 30 h ou mais



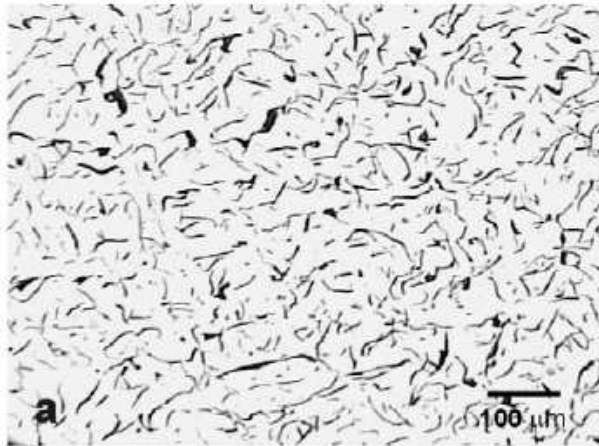
Ferrítico
(resfriamento lento)



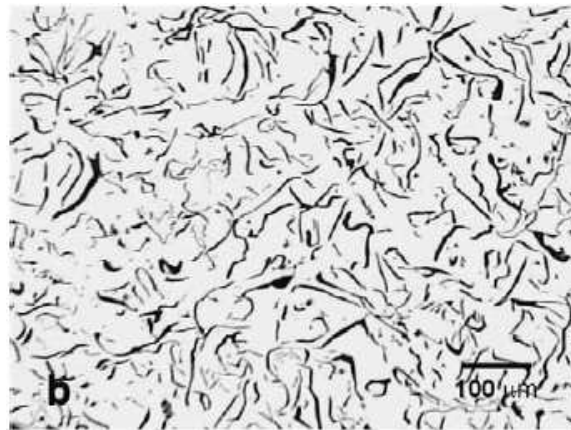
Perlítico
(resfriamento rápido)



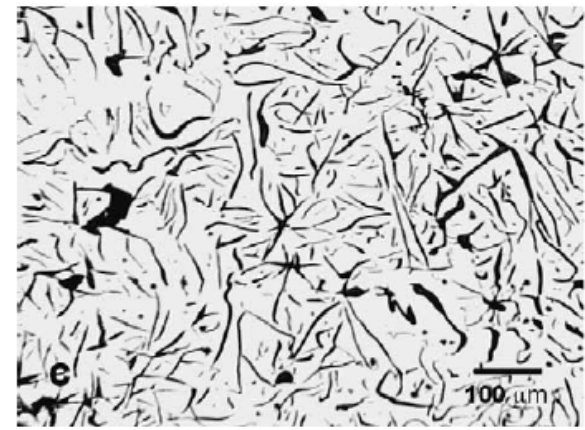
FoFo Cinzento



Hipoeutético
 $CE < 4,3\%$



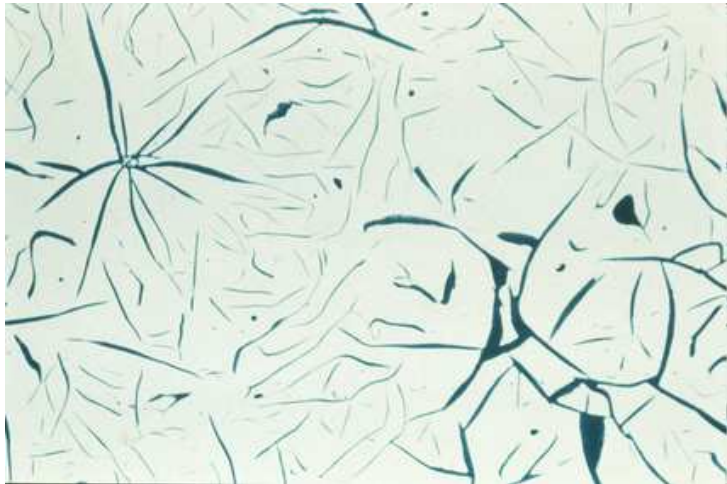
Eutético
 $CE \sim 4,3\%$



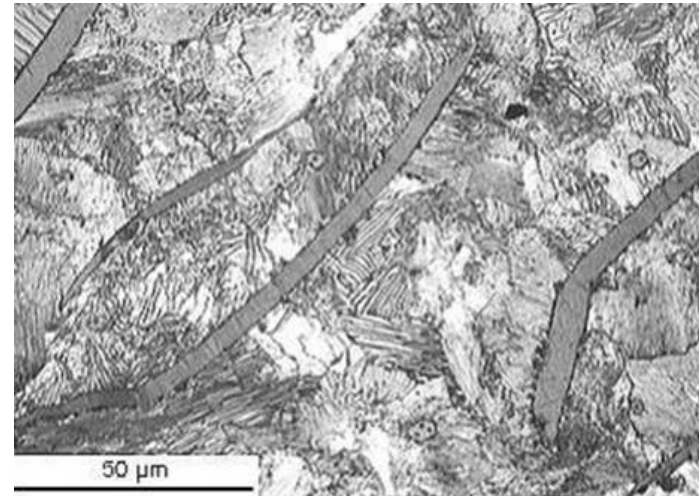
Hipereutético
 $CE > 4,3\%$



FoFo Cinzento



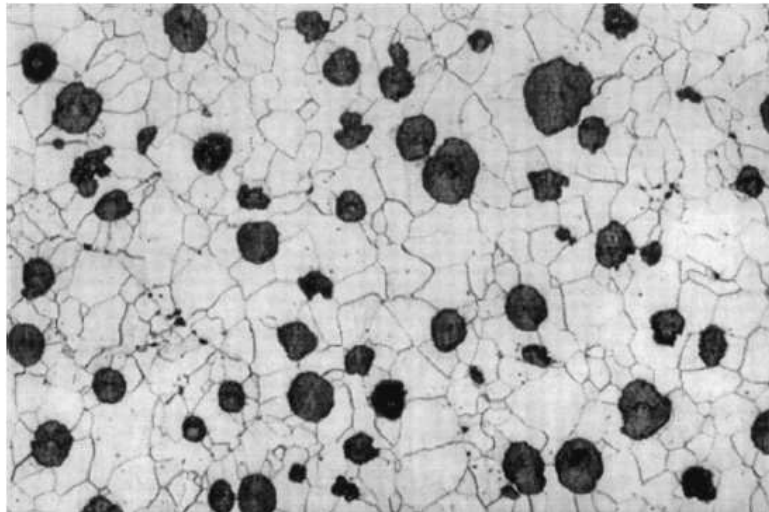
Ferrítico
(resfriamento lento)



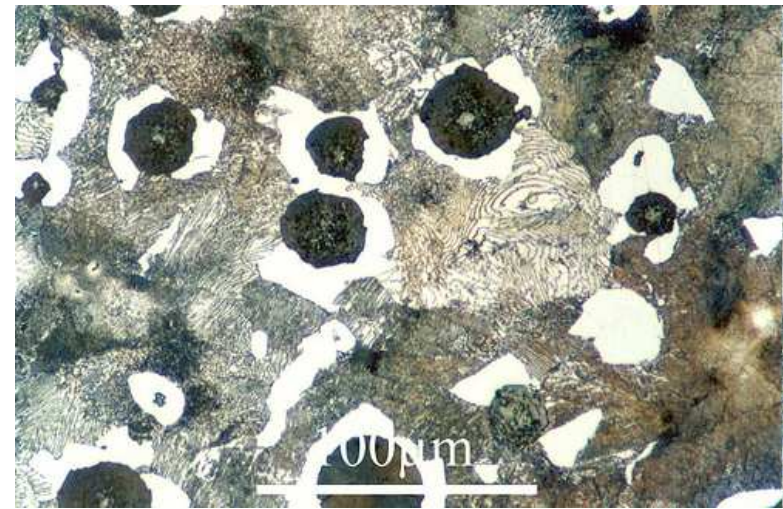
Perlítico
(resfriamento moderado)



FoFo Nodular



Ferrítico
(resfriamento lento)



Perlítico
(resfriamento moderado)



Designação dos FoFos Cinzentos (segundo ABNT)

Designação	Resistência à tração (MPa)
FC – 100	100
FC - 150	150
FC - 200	200
FC – 250	250
FC - 300	300
FC - 400	400



Designação dos FoFos Nodulares (segundo ABNT)

Designação	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)
FE 38017	380	17
FE 42012	420	12
FE 50007	500	7
FE 60003	600	3
FE 70002	700	2
FE 80002	800	2



Outras ligas fundidas

- Ligas de Aço fundidas
 - baixo carbono ($C < 0,2\%$)
 - médio carbono (C entre $0,2$ e $0,5\%$)
 - alto carbono ($C > 0,5\%$)
 - baixo teor de liga (teor total de liga inferior a 8%)
 - alto teor de liga (teor total de liga superior a 8%)



Outras ligas fundidas

- Ligas de Alumínio fundidas
 - 1xx.x alumínio, 99.0% mínimo;
 - 2xx.x Cu (4%...4.6%);
 - 3xx.x Si (5%...17%) com adições de Cu e/ou Mg
 - 4xx.x Si (5%...12%);
 - 5xx.x Mg (4%...10%);
 - 7xx.x Zn (6.2%...7.5%);
 - 8xx.x Sn;
 - 9xx.x outros



Outras ligas fundidas

■ Ligas de Cobre fundidas

Liga	Classificação UNS	Composição
Cobre comercialmente puro	C80100 - C81100	> 99% Cu
Ligas de alto teor de cobre	C81300 - C82800	> 94% Cu
Latões vermelhos ao chumbo	C83300 - C85800	Cu-Zn-Sn-Pb (75-89% Cu)
Latões amarelos ao chumbo	C85200 - C85800	Cu-Zn-Sn-Pb (57-74% Cu)
Bronzes ao chumbo e ao manganês	C86100 - C86800	Cu-Zn-Mn-Fe-Pb
Bronzes e latões ao silício	C87300 - C87900	Cu-Zn-Si
Bronzes ao estanho e ao chumbo	C90200 - C94500	Cu-Sn-Zn-Pb
Bronzes ao níquel e ao estanho	C94700 - C94900	Cu-Ni-Sn-Zn-Pb
Bronzes ao alumínio	C95200 - C95810	Cu-Al-Fe-Ni
Cobre-níquel	C96200 - C96800	Cu-Ni-Fe
Níquel prata	C97300 - C97800	Cu-Ni-Zn-Pb-Sn
Cobres ao chumbo	C98200 - C98800	Cu-Pb
Ligas especiais	C99300 - C99750	-