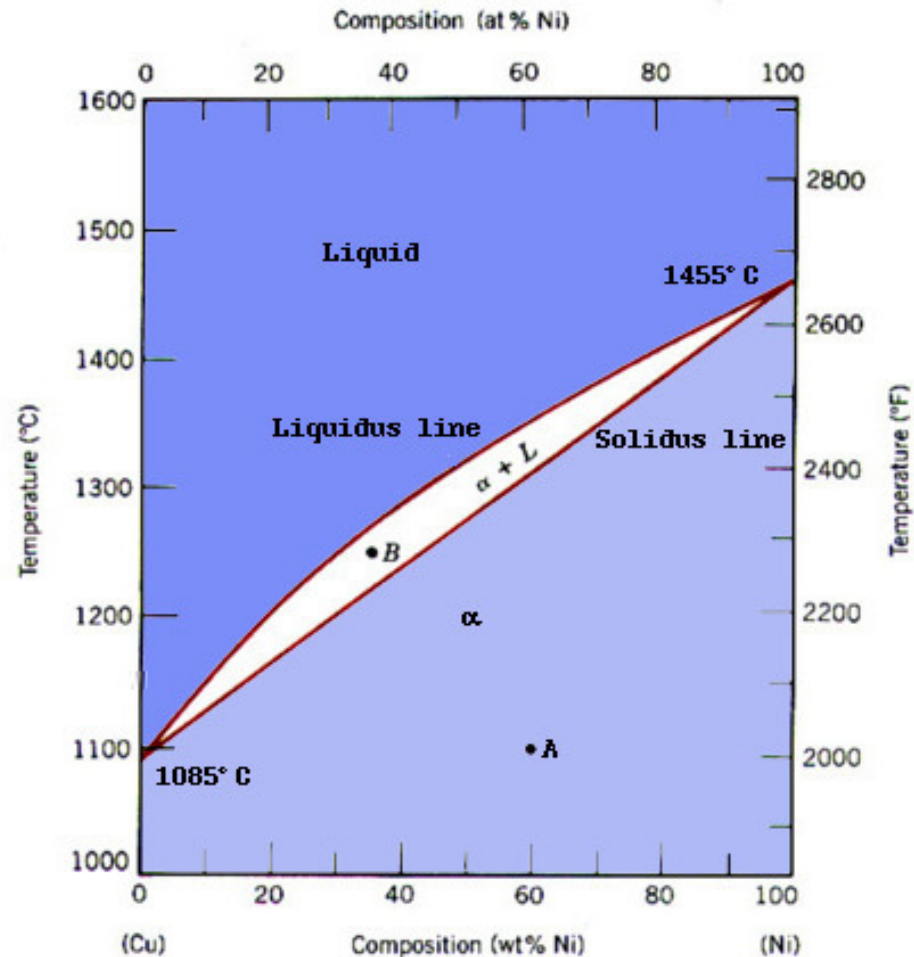


Redistribuição de Soluto na Solidificação de Ligas

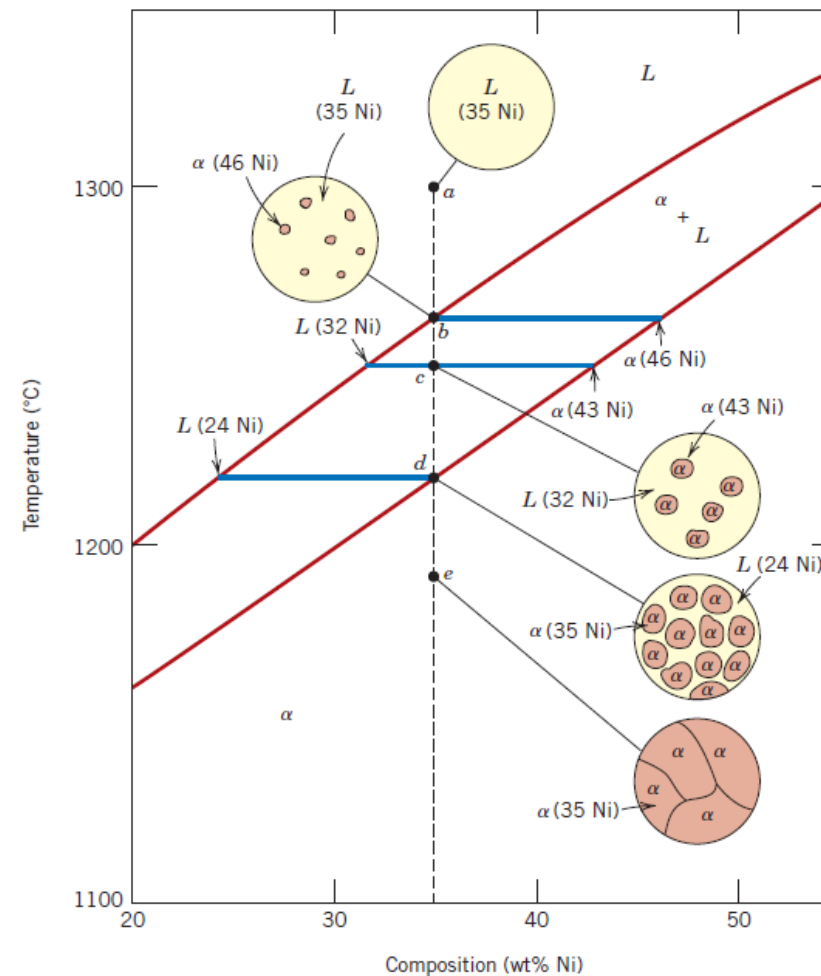
O diagrama de fases Cu-Ni



Redistribuição de Soluto na Solidificação de Ligas

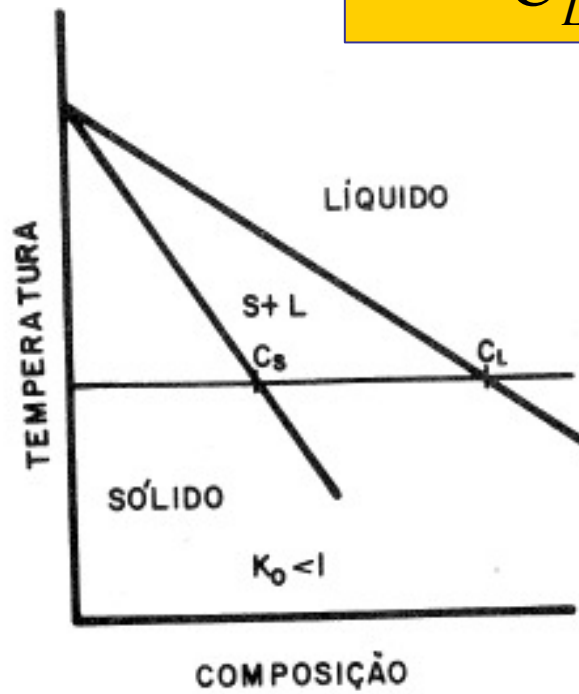
Figure 9.4
Schematic representation of the development of microstructure during the equilibrium solidification of a 35 wt% Ni–65 wt% Cu alloy.

Solidificação no Equilíbrio

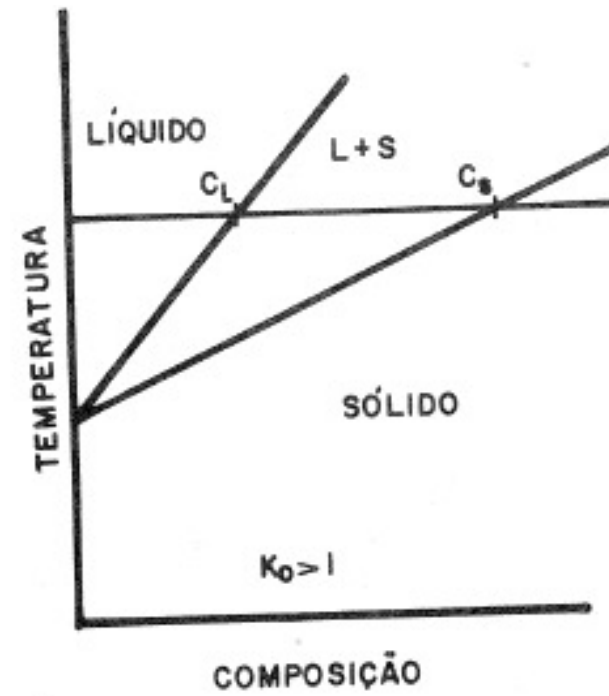


Coeficiente de distribuição

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



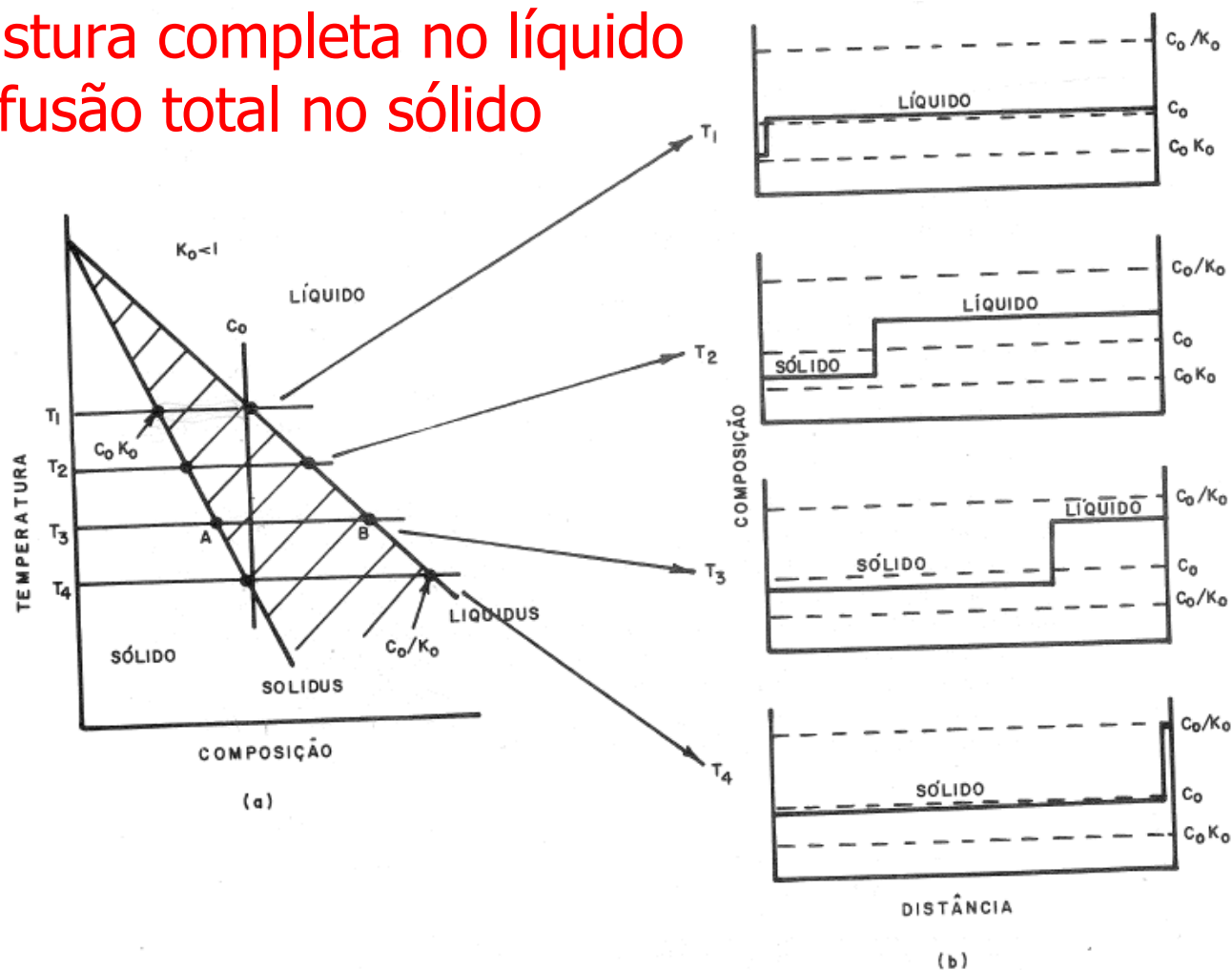
(a)



(b)

Solidificação no Equilíbrio

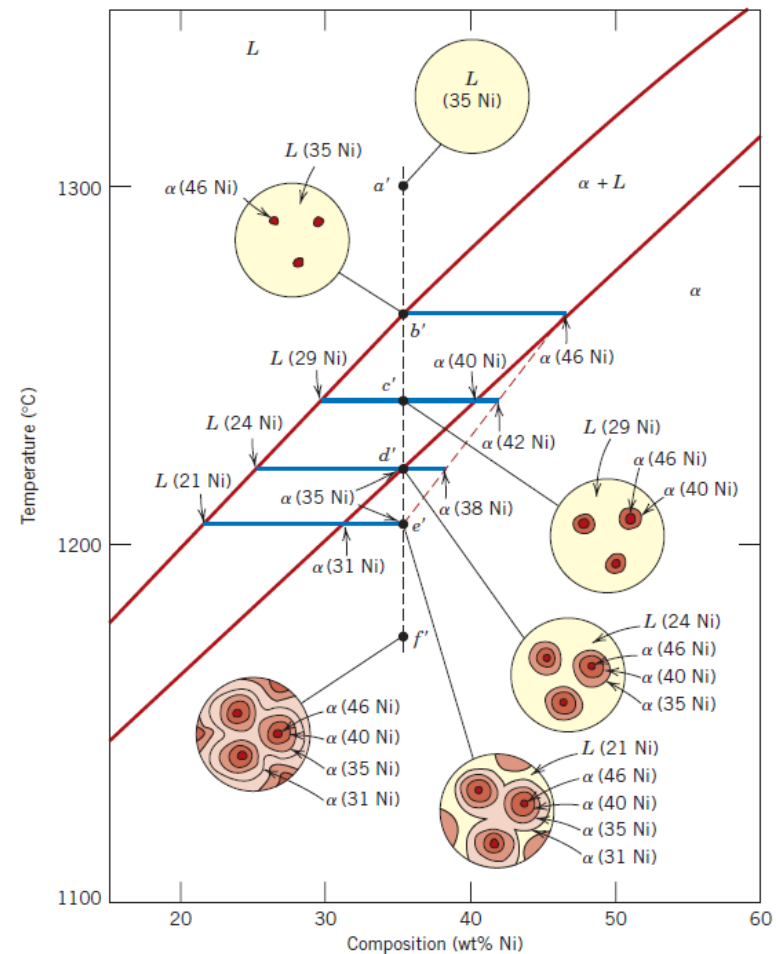
- Mistura completa no líquido
- Difusão total no sólido



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

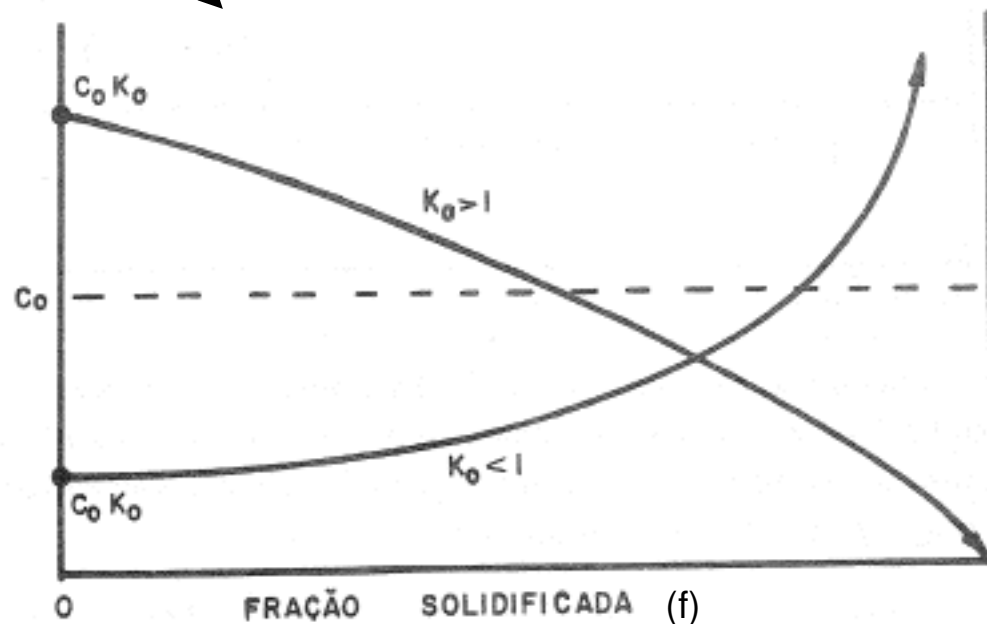
Mistura Completa no Líquido

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

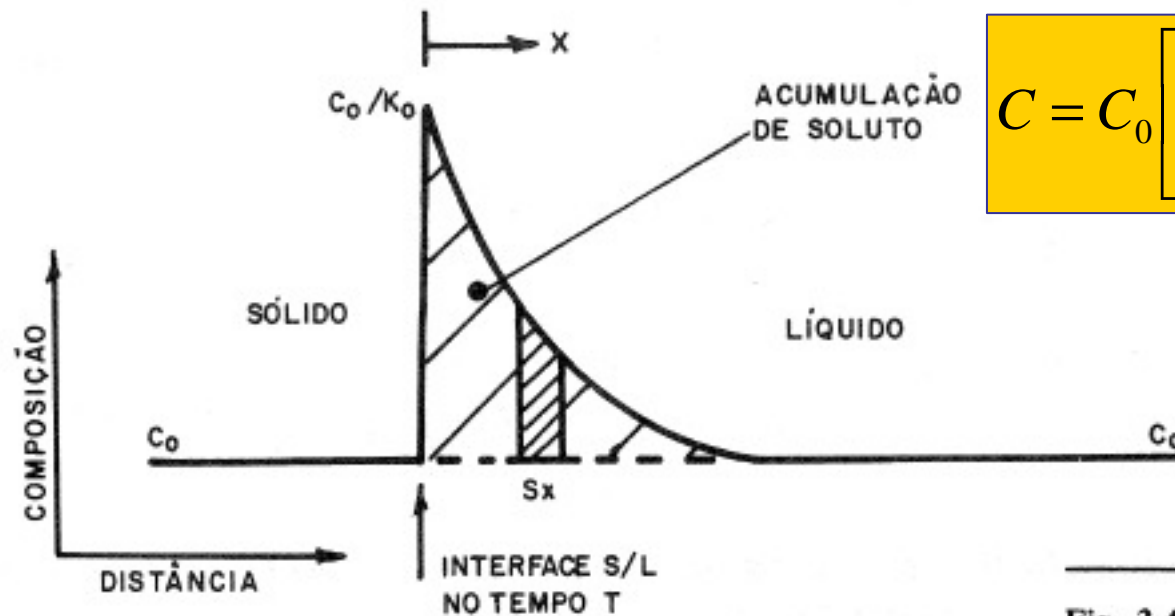
Equação de Scheil

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

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



Somente Difusão no Líquido

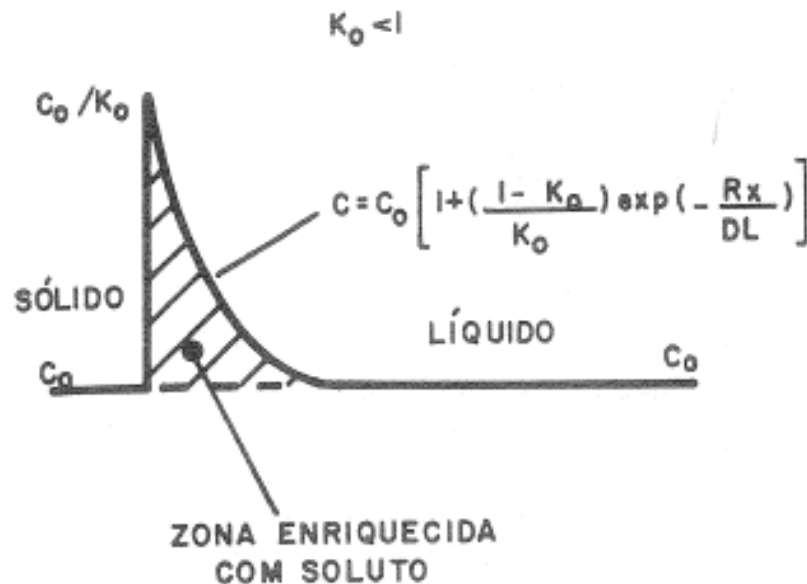


$$C = C_0 \left[1 + \left(\frac{1-k_0}{k_0} \right) \exp\left(-\frac{R.x}{D_L} \right) \right]$$

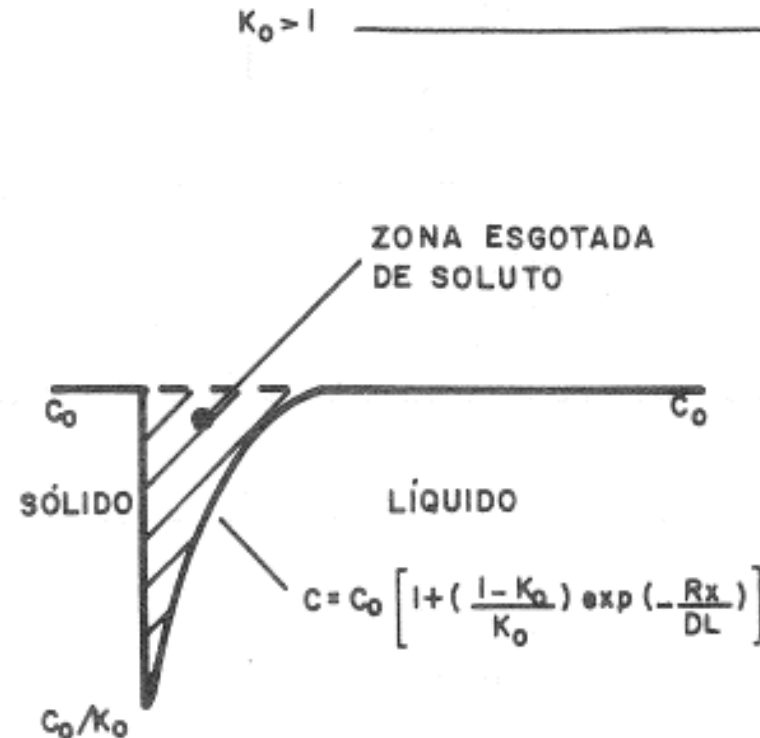
Fig. 3.4 Representação esquemática do acúmulo de soluto na interface de regime permanente, durante o crescimento, com mistura do soluto no líquido somente por difusão.

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

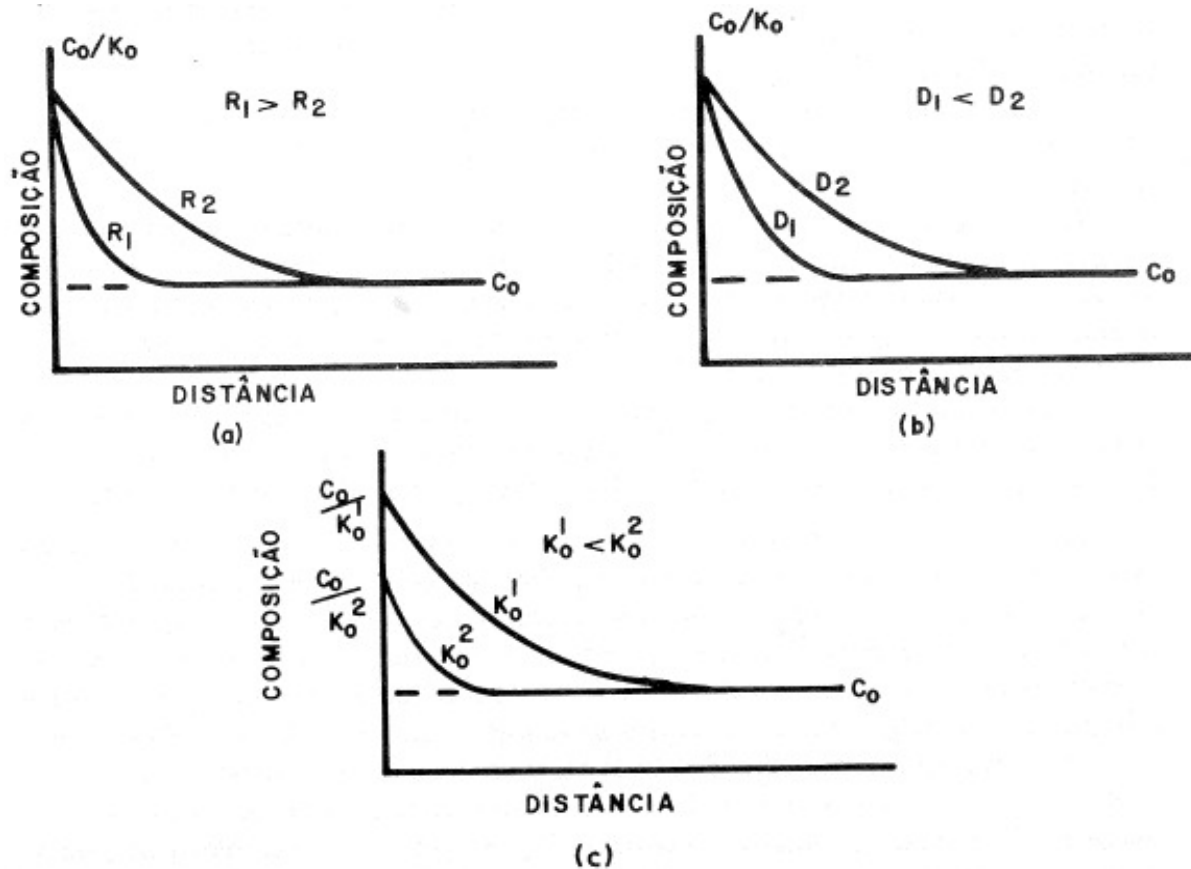
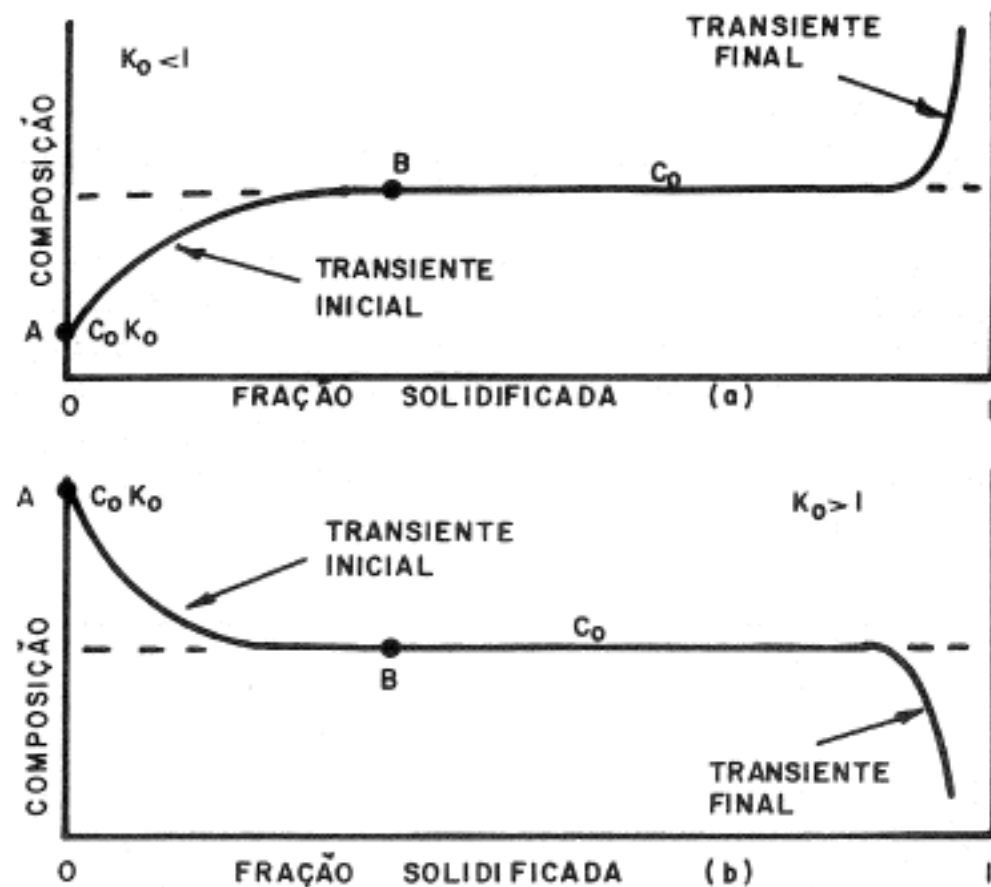


Fig. 3.6 Variações na concentração de soluto a partir da interface em crescimento ($k_0 < 1$), dadas por variações nos seguintes parâmetros de crescimento: (a) velocidade de crescimento; (b) difusividade; (c) coeficiente de distribuição.

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)

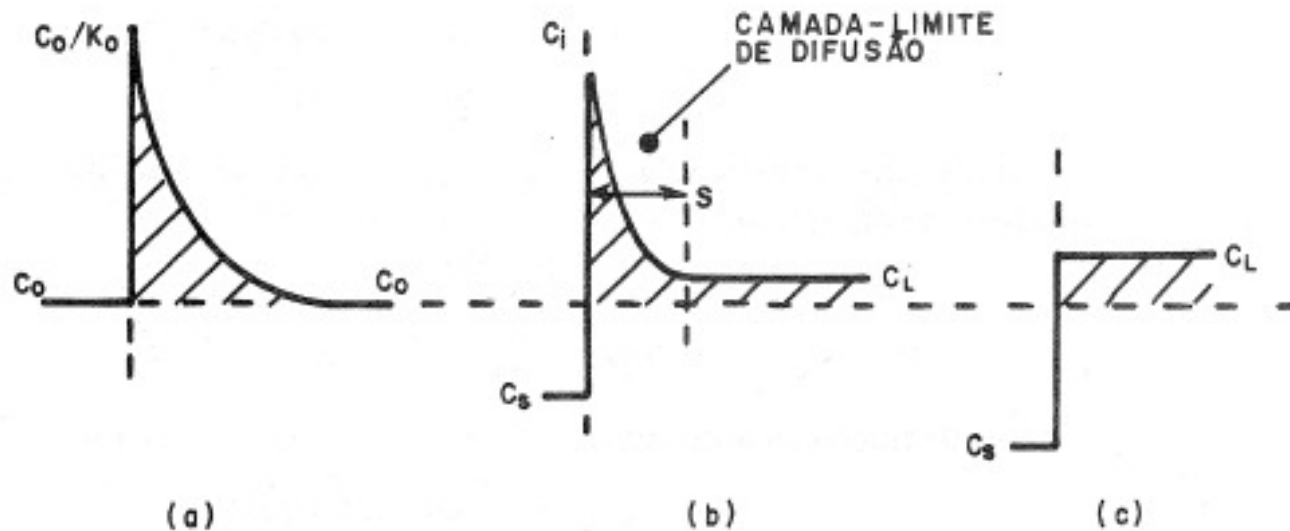


Fig. 3.9 Efeito das condições de mistura na camada de soluto junto à interface sólido/líquido ($k_0 < 1$): (a) não há mistura, considerando-se somente difusão; (b) mistura parcial; (c) mistura total.



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

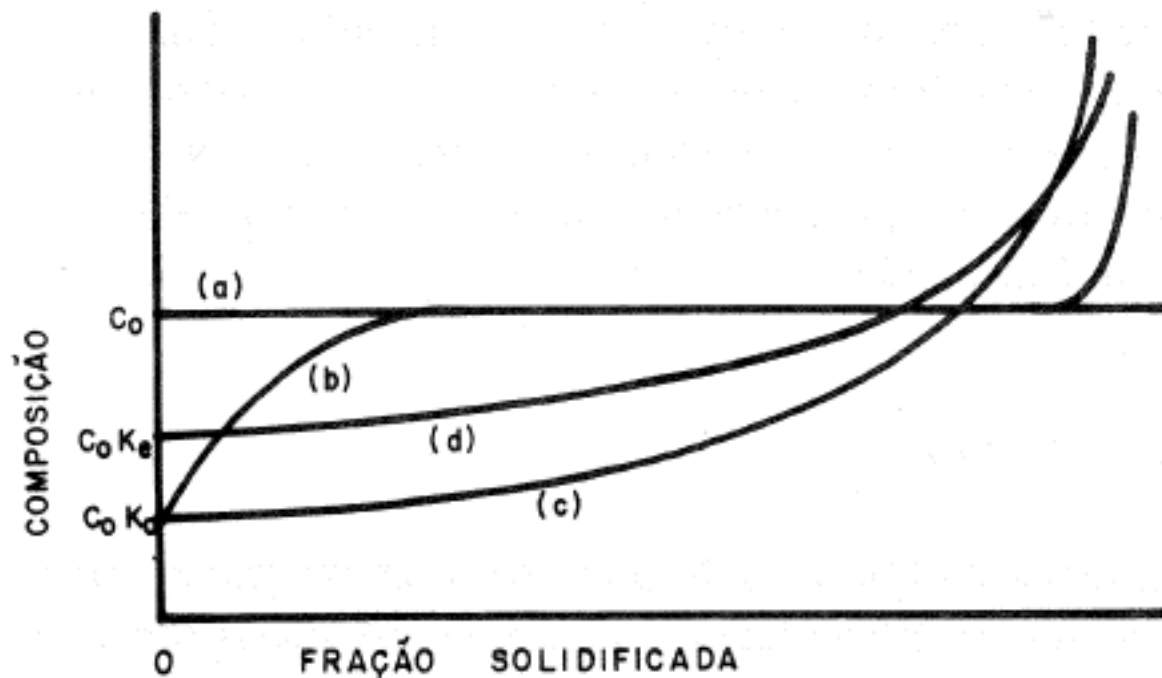


Fig. 3.10 Distribuição de soluto numa barra solidificada a partir de um líquido de concentração inicial C_0 com $k_0 < 1$, para: (a) resfriamento em equi-

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

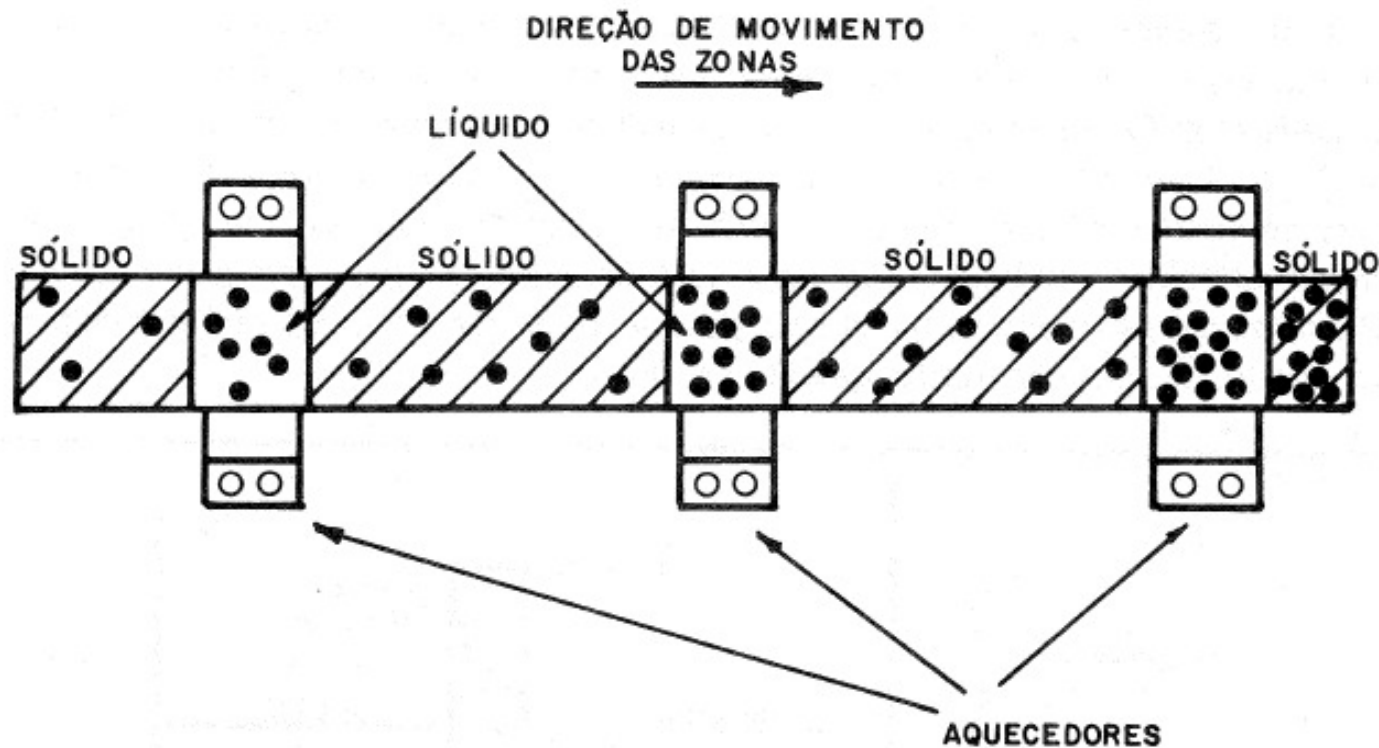
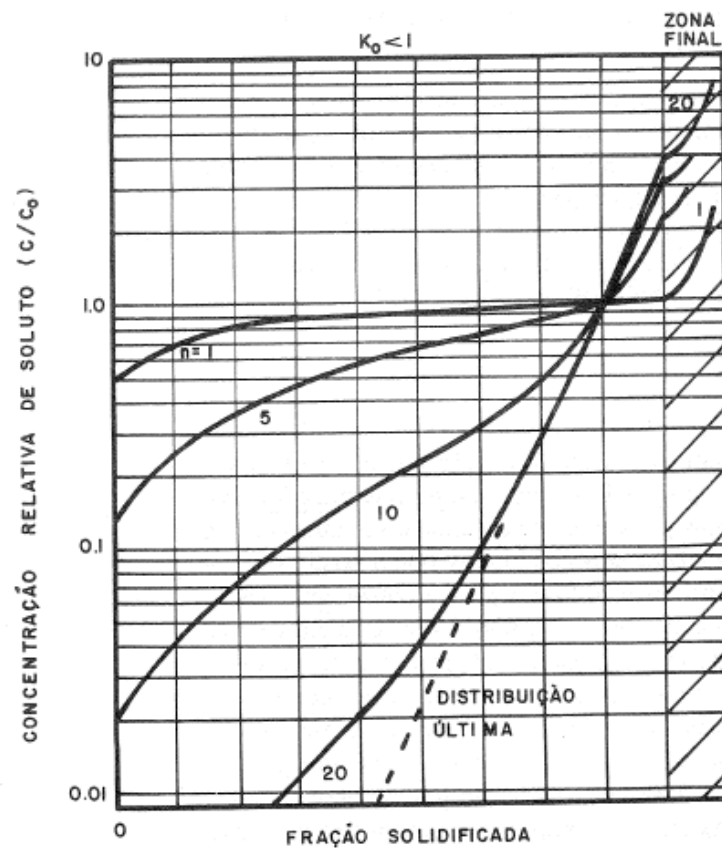
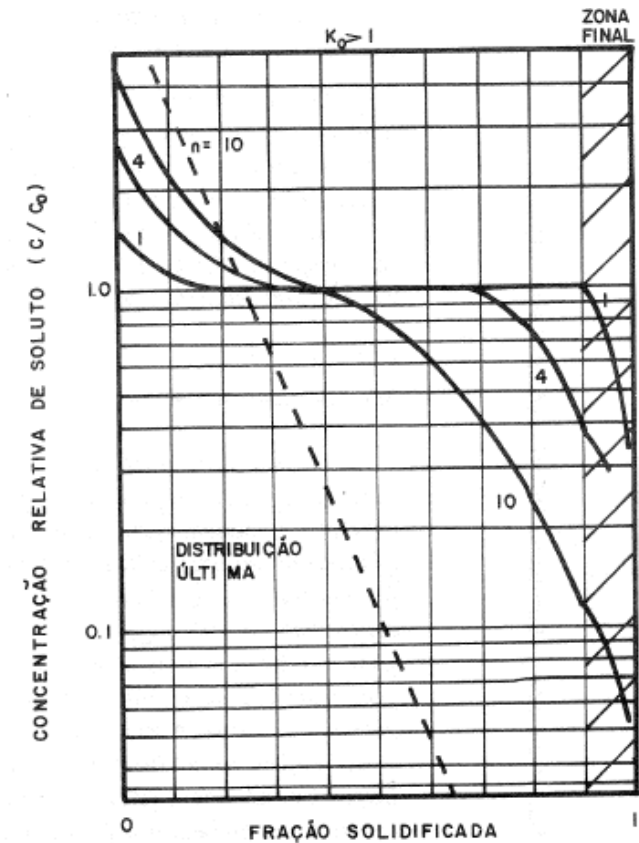


Fig. 3.12 Diagrama esquemático do refino zonal de uma barra, usando-se três zonas fundidas, e mostrando a direção de movimento do soluto ($k_0 < 1$).

Refino por Fusão Zonal



(a)

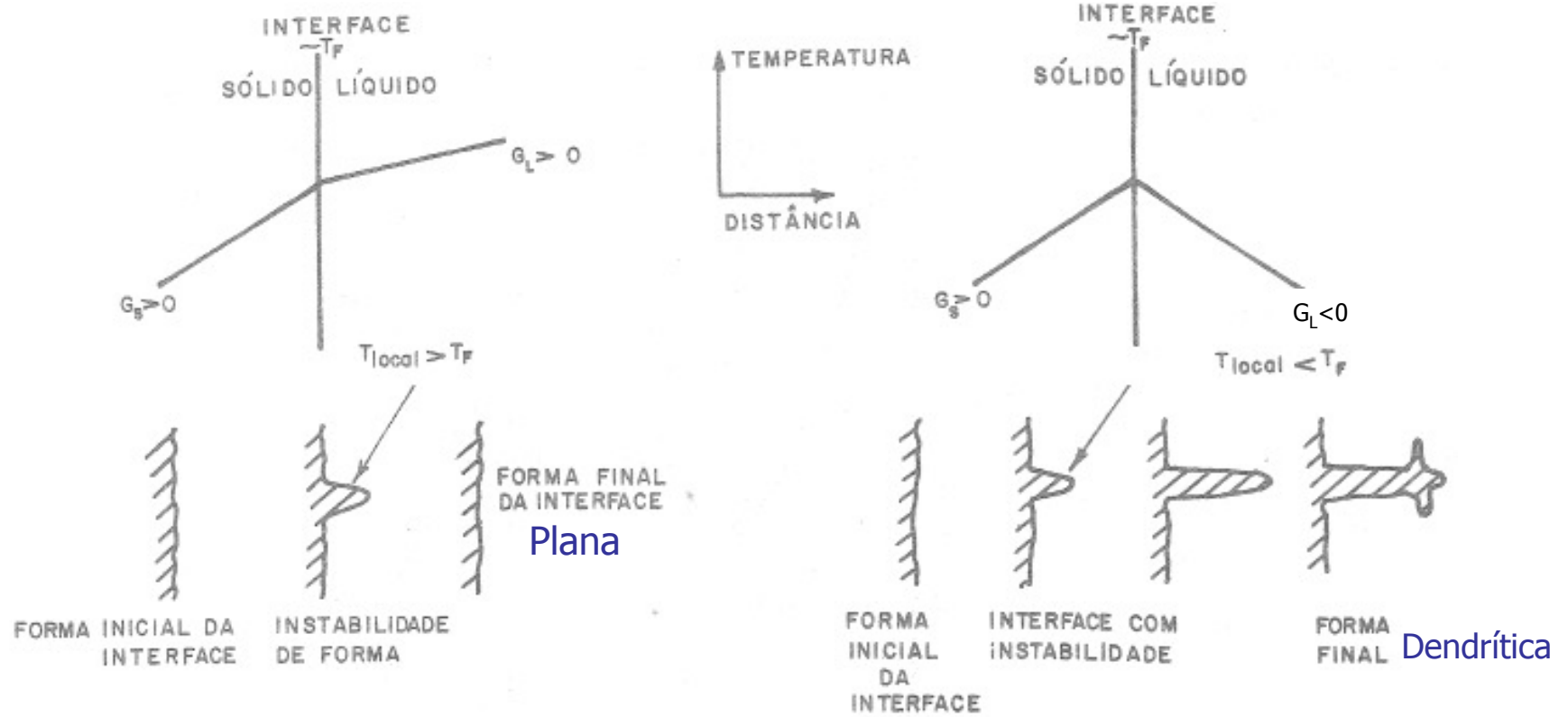


(b)

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

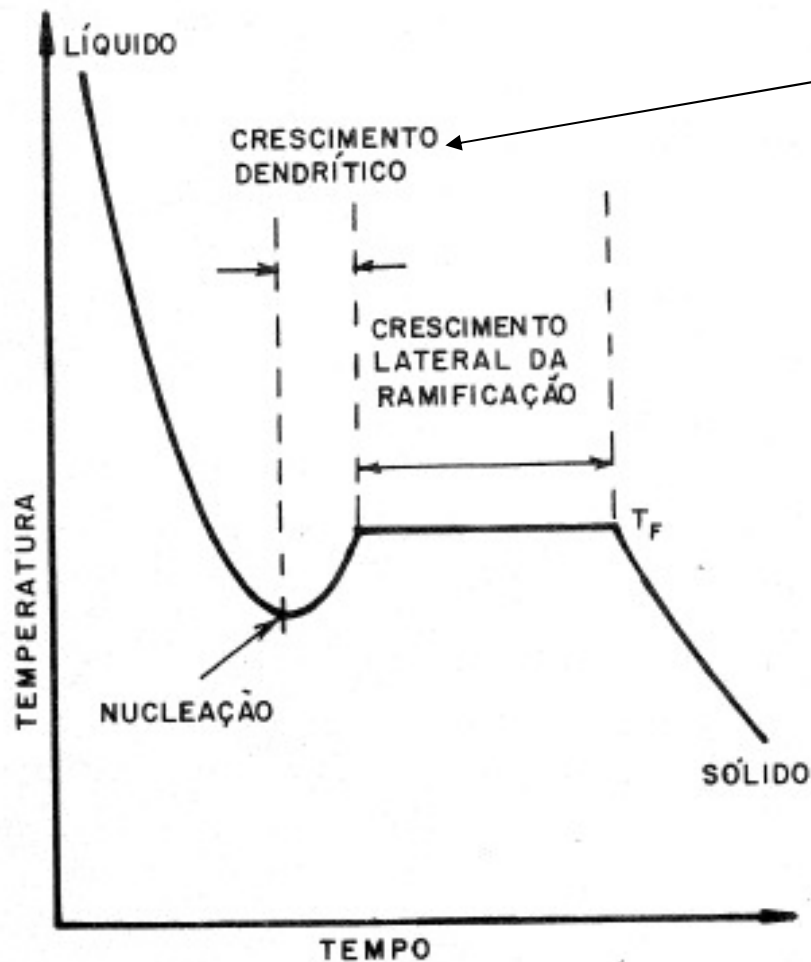
O caso de metais puros



Sem S.R. à frente da interface

Com S.R. à frente da interface

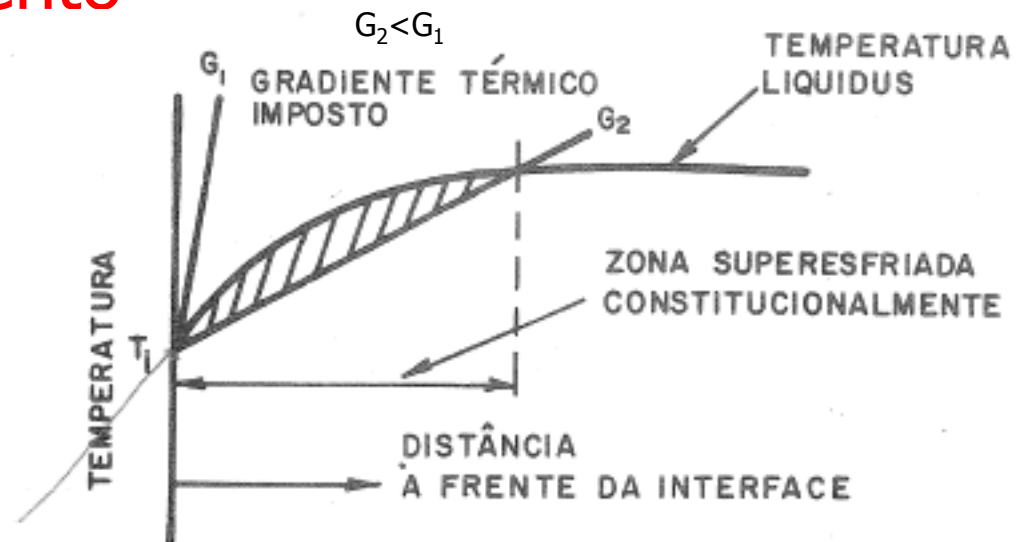
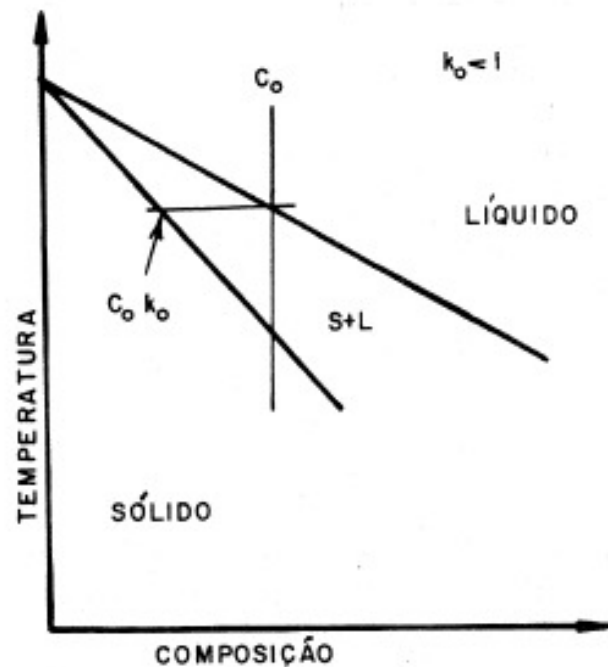
Crescimento dendrítico devido ao super-resfriamento térmico em metais puros



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

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

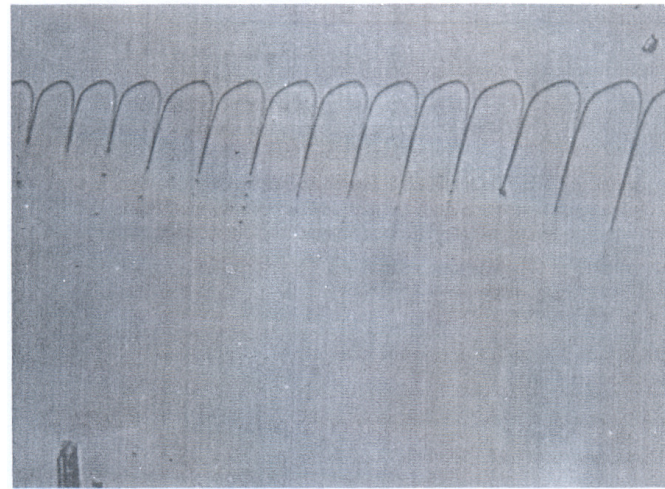
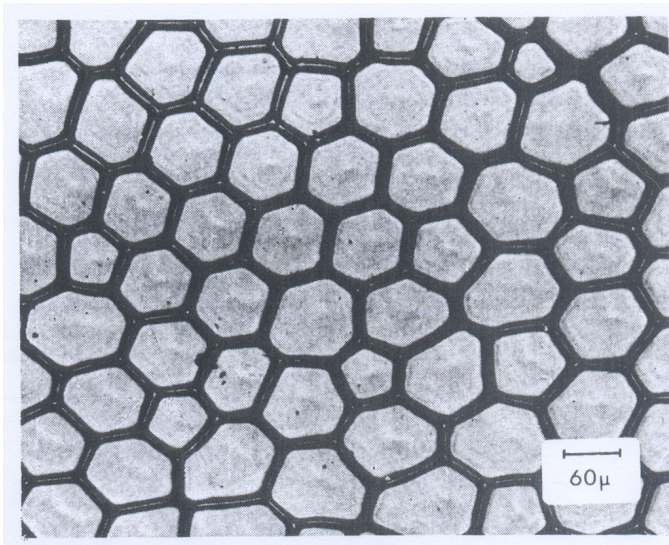
- Baixo gradiente térmico (G) no líquido
- Altas velocidades (R) de crescimento
- Linhas liquidus abruptas (m elevado)
- Altos teores de soluto na liga (C_0)
- Baixa difusividade no líquido (D_L)
- k_0 bem pequeno ou bem grande



Conseqüência do super-resfriamento constitucional

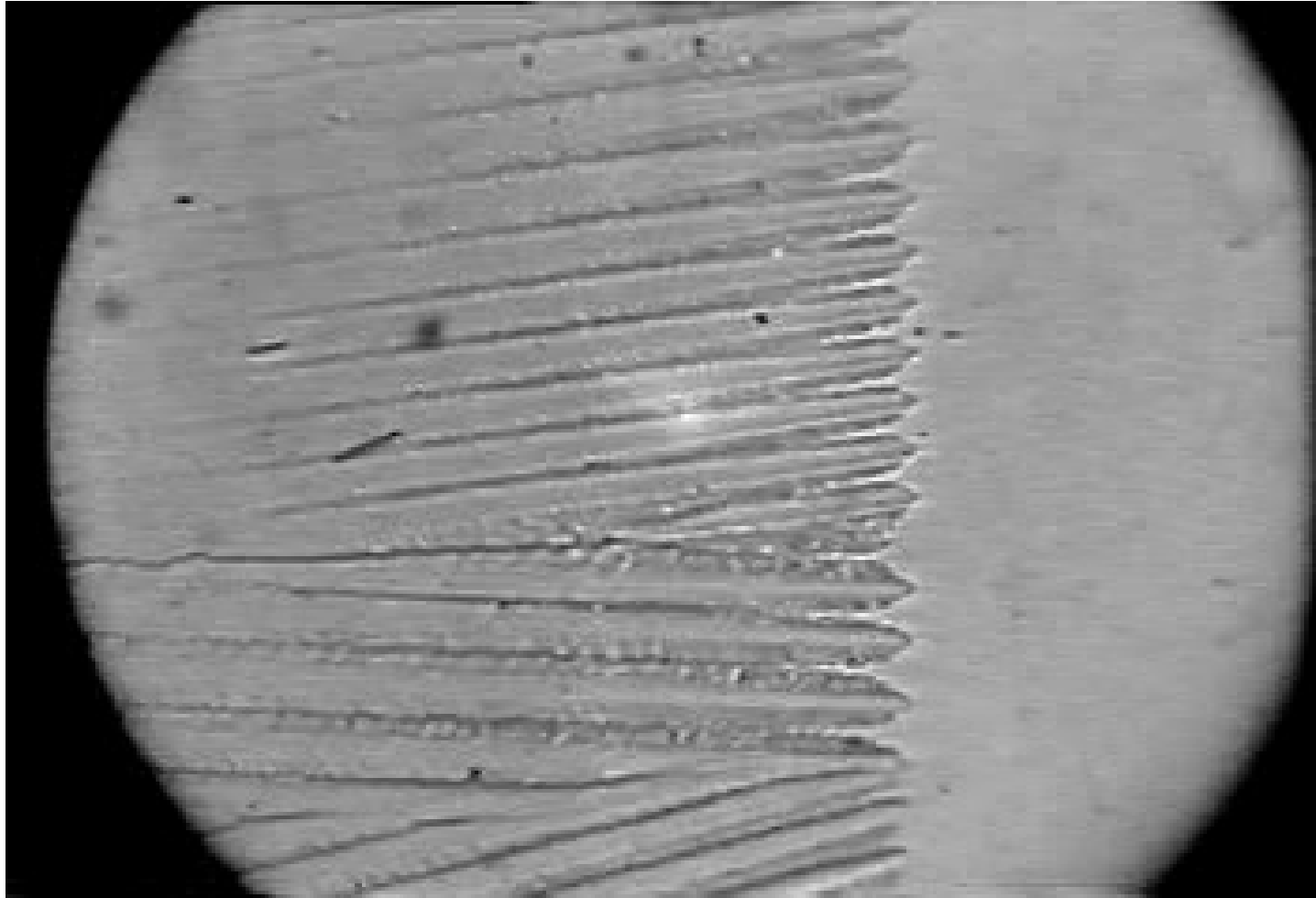
- Degeneração da interface plana de crescimento
 - Baixo super-resfriamento
 - Crescimento Celular
 - Alto super-resfriamento
 - Crescimento Dendrítico

Crescimento Celular

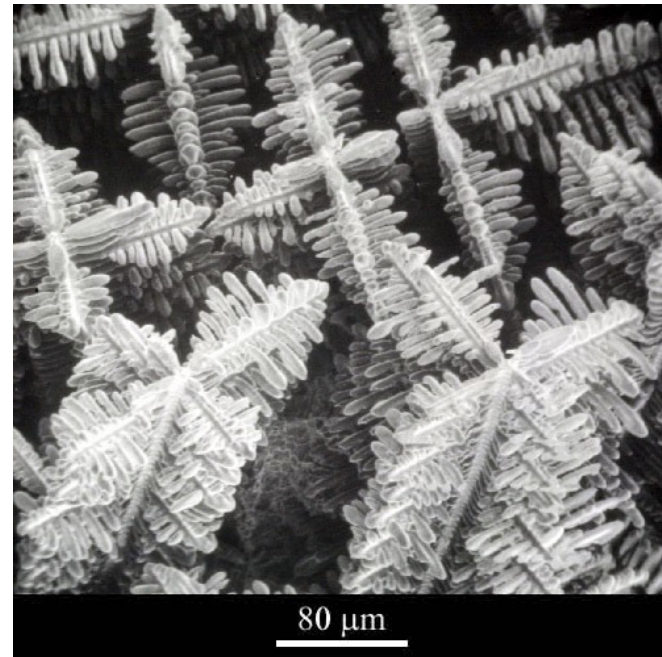
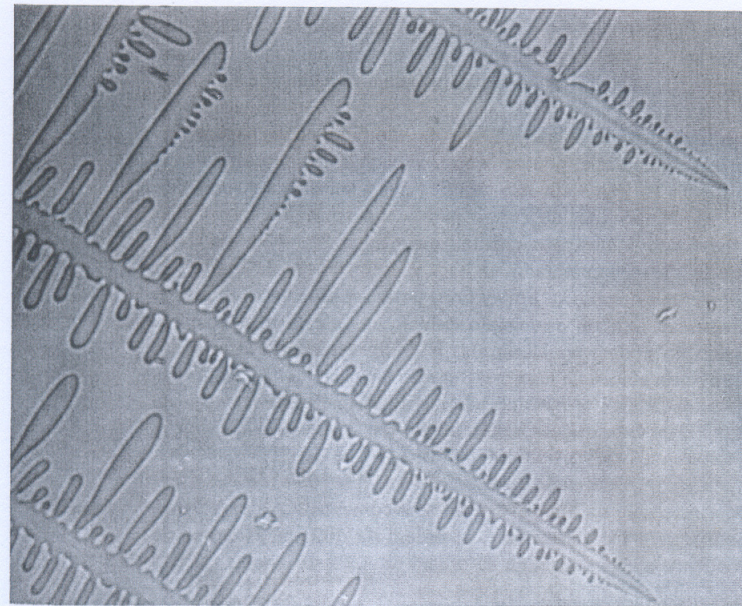




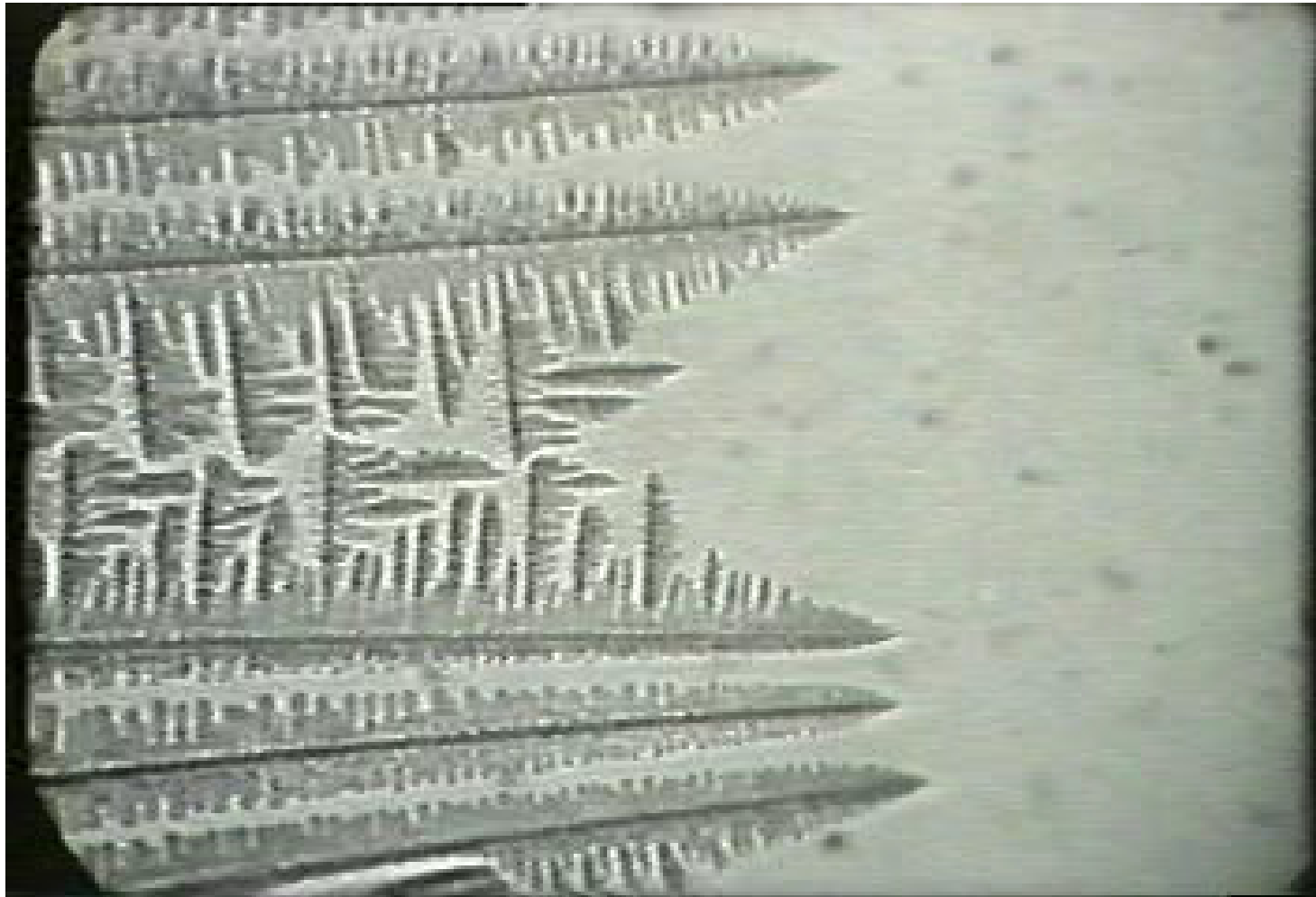
Crescimento Celular



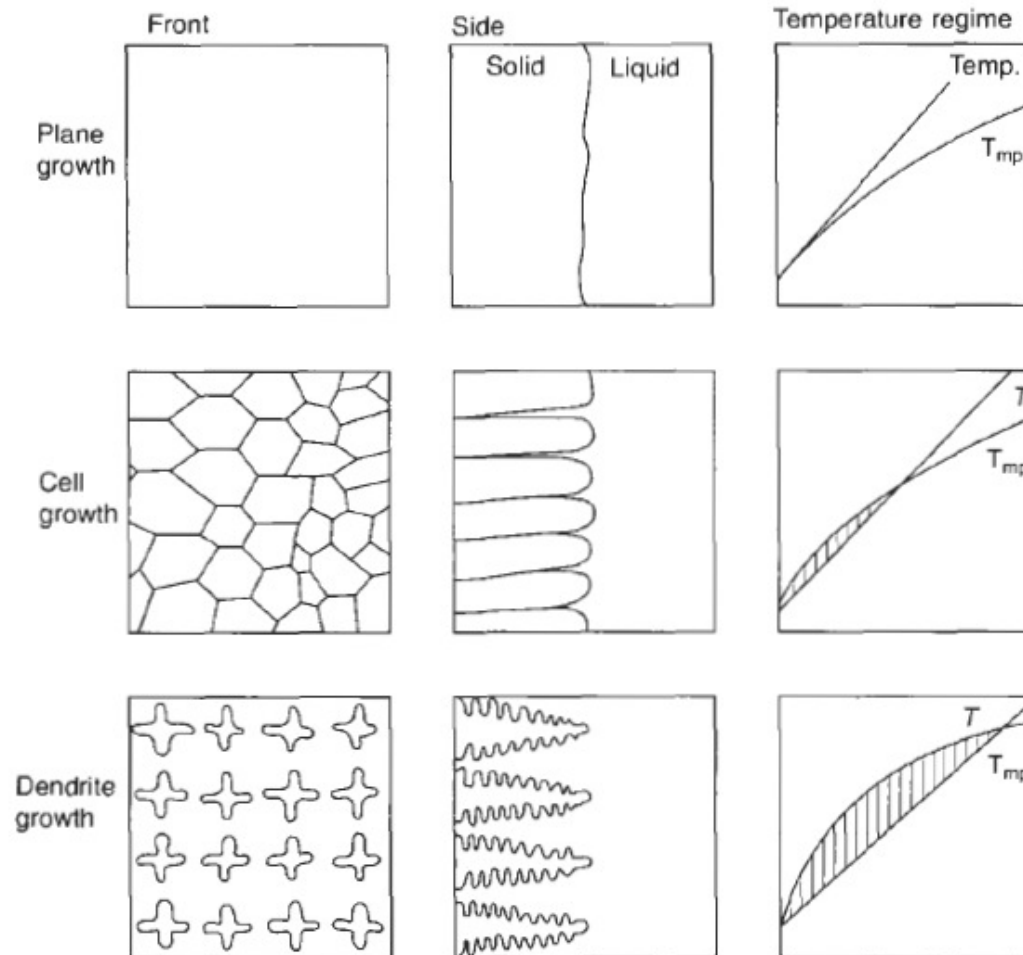
Crescimento Dendrítico



Crescimento Dendrítico

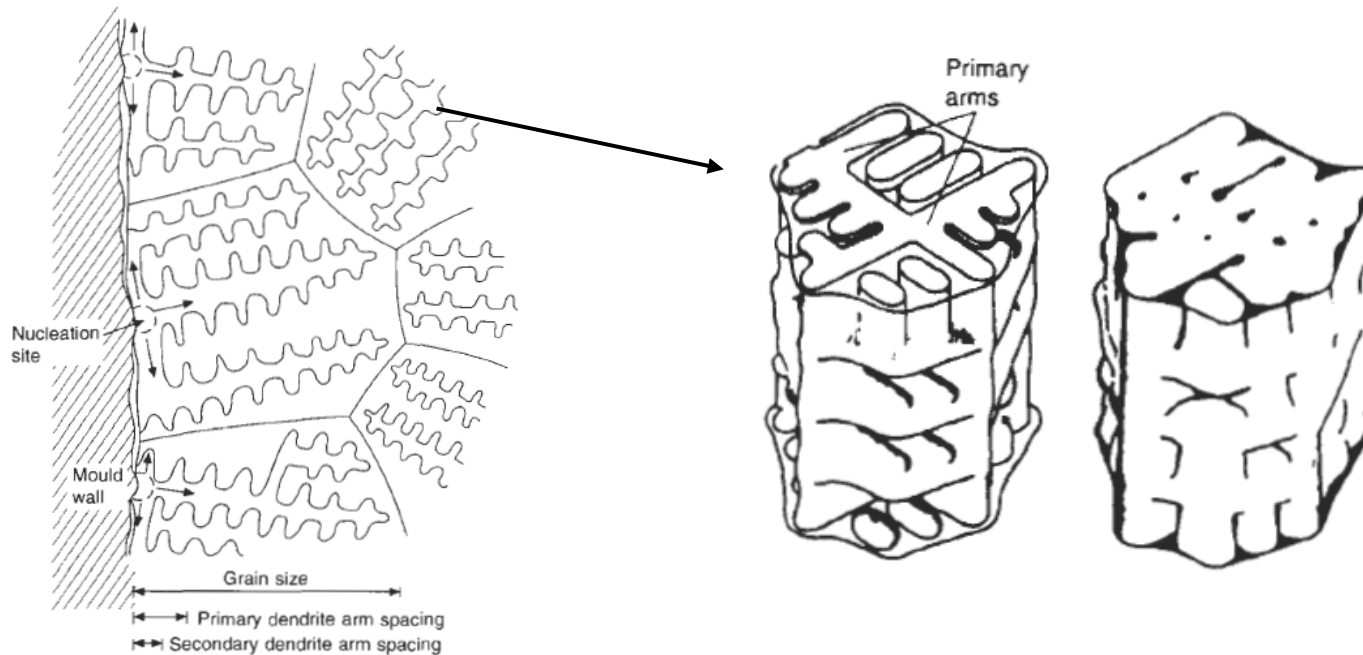


Comparação final entre as morfologias da interface



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

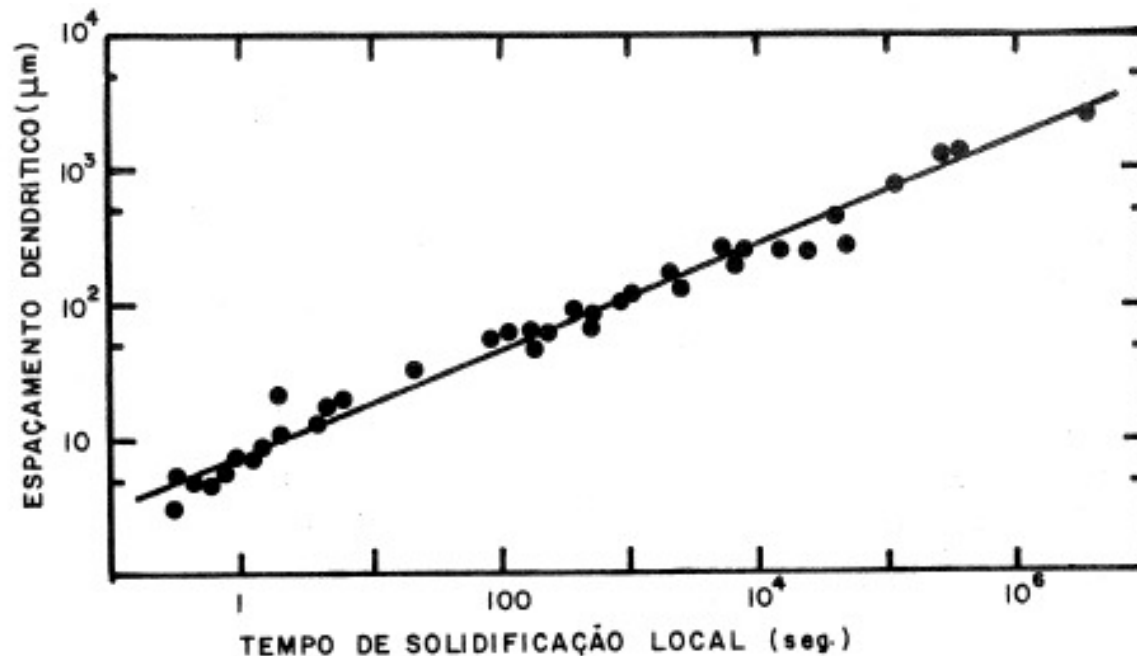


Fig. 4.13 *Variação no espaçamento entre as ramificações dendríticas, em função do tempo de solidificação local: (a) em alumínio-4,5% cobre; (b) em alumínio-10% cobre.*



Microssegregação

- Celular
- Dendrítica
- Em contorno de grão

Microsegregação Celular

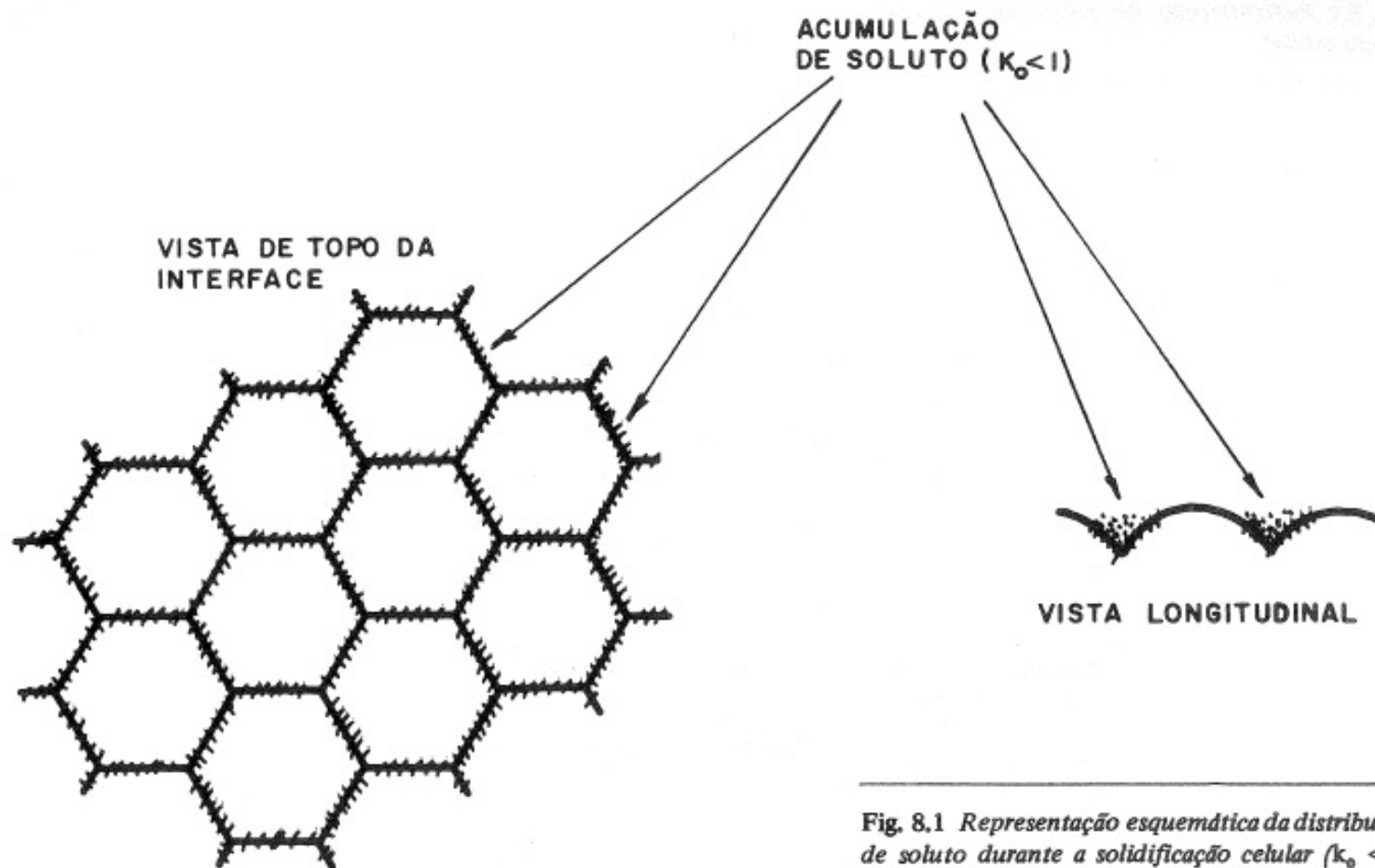


Fig. 8.1 Representação esquemática da distribuição de soluto durante a solidificação celular ($k_0 < 1$).

Microsegregação Dendrítica

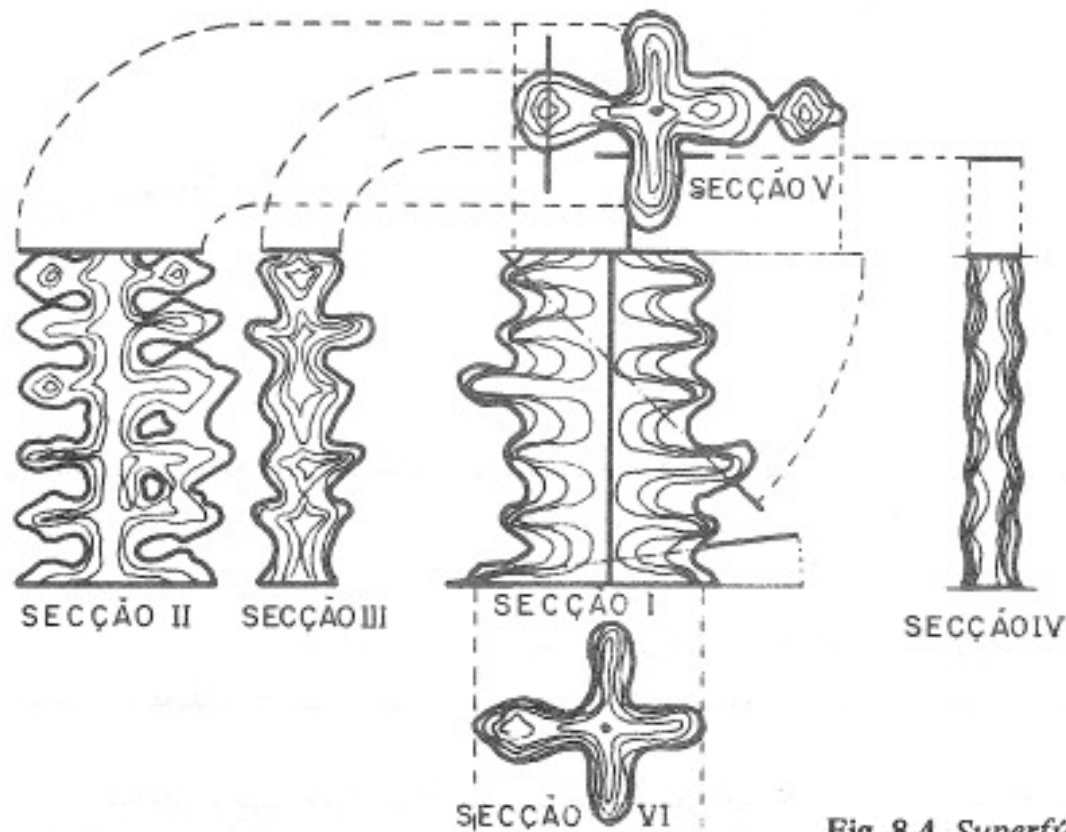
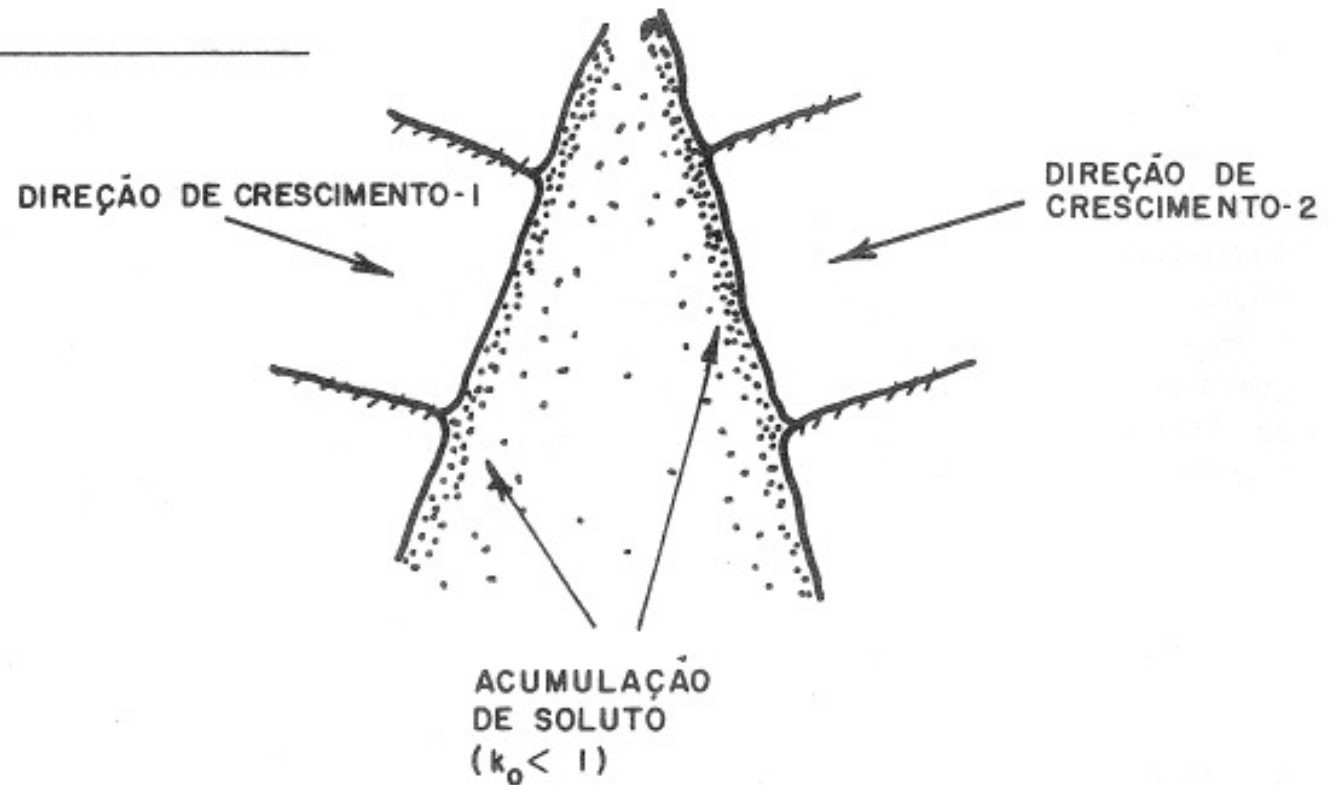


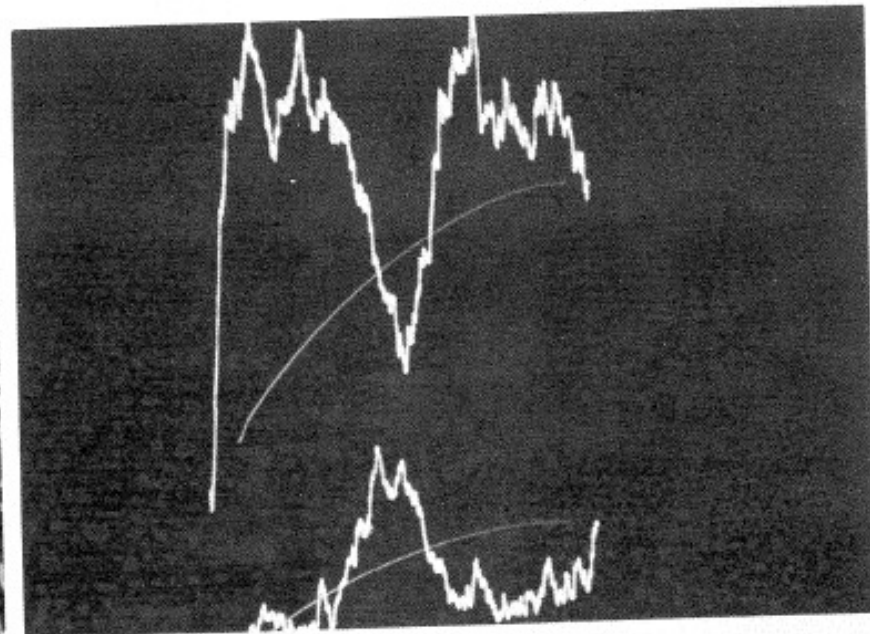
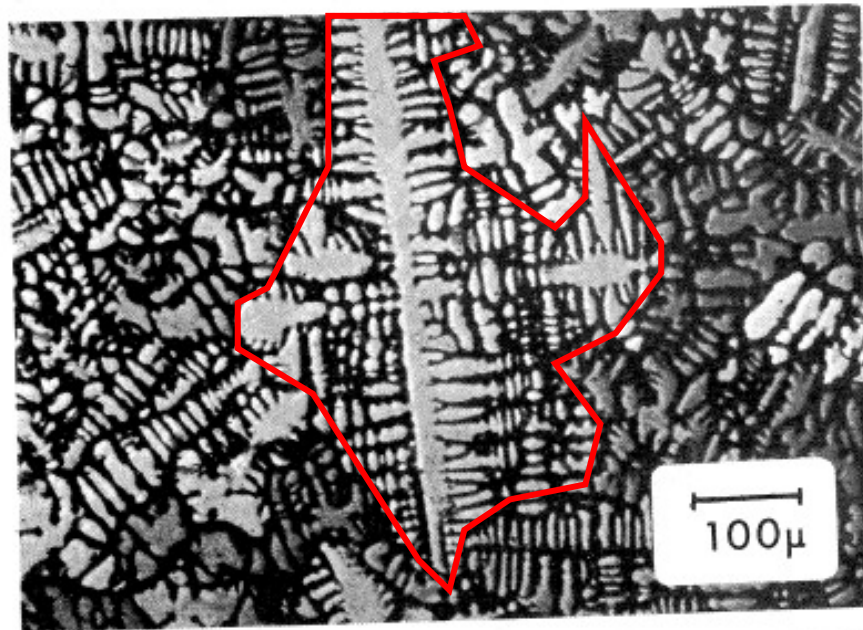
Fig. 8.4 Superfície de mesma concentração num crescimento dendrítico colunar (aço de baixa liga).

Microsssegragação em Contorno de Grão

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



Exemplo de Microsegregação Dendrítica

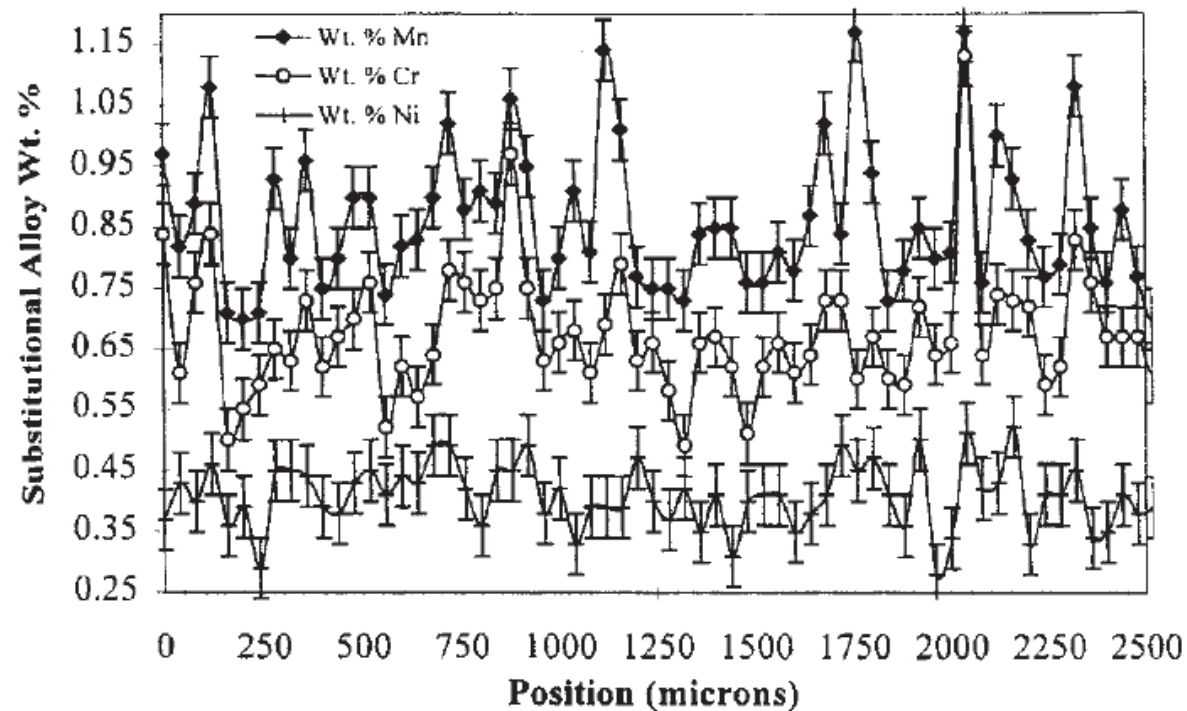


(a)

(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

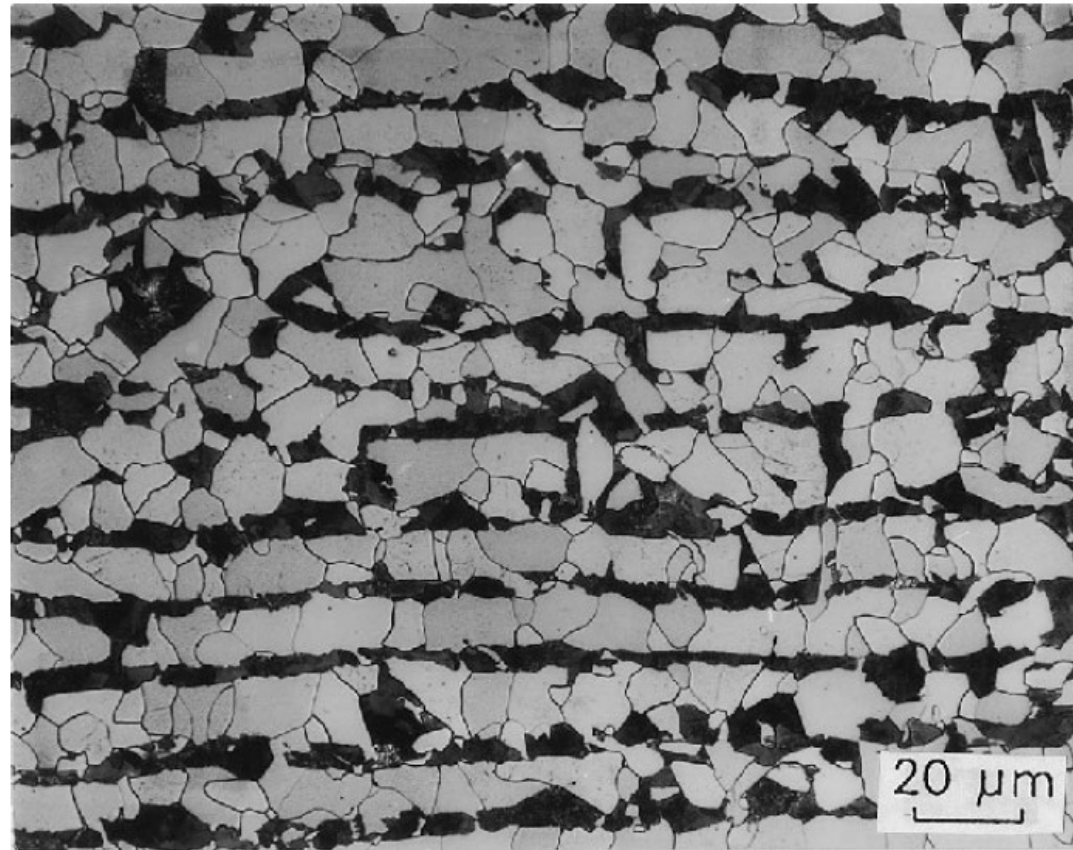
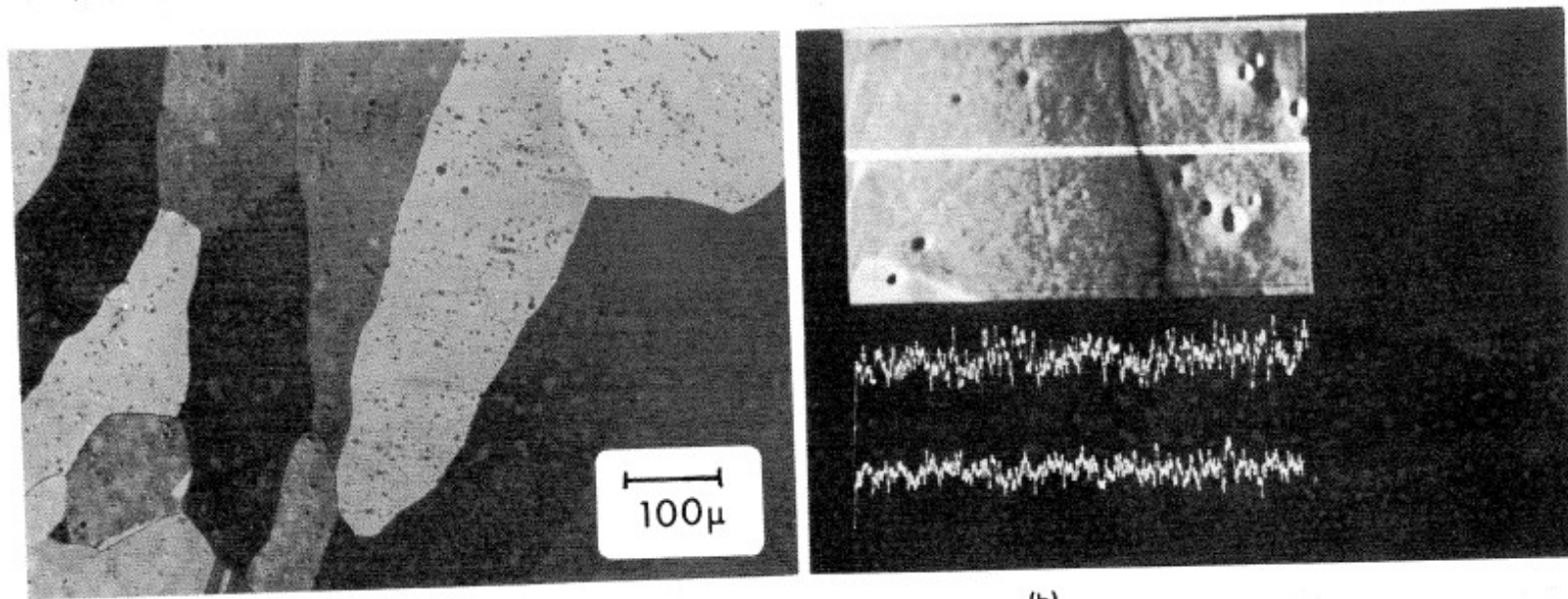


Fig. 13—Ferrite (light) and pearlite (dark) bands in 1020 steel hot-rolled plate. Nital etch, light micrograph.

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