

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*



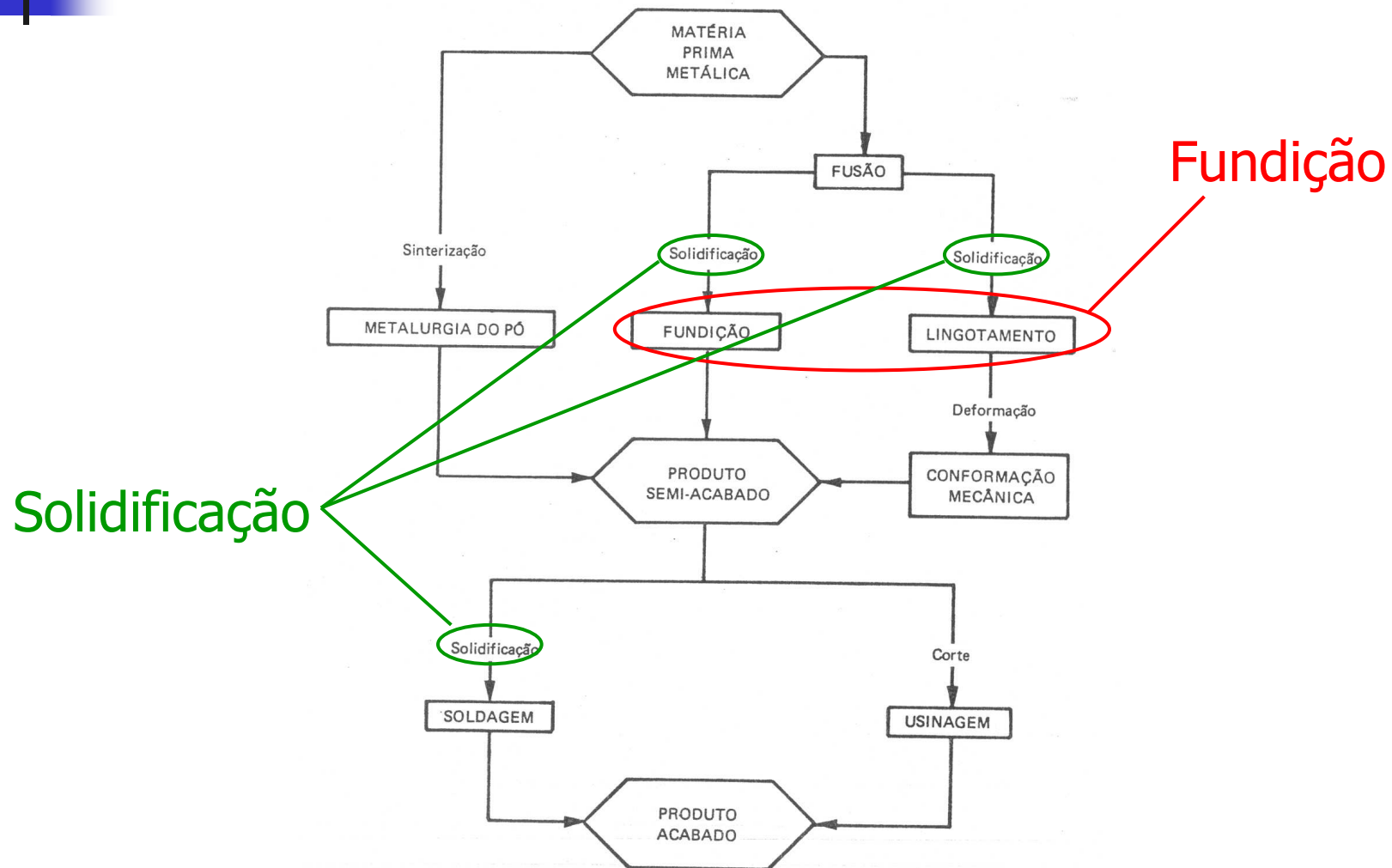
# Exemplos de Solidificação e Fundição

---

Exemplo de Solidificação

Exemplo de Fundição

# A fundição e a solidificação nas rotas de fabricação de metais



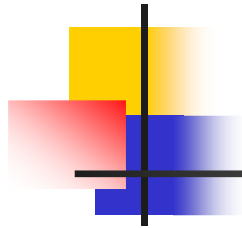
# Exemplo de produto fundido



# Exemplo de produto fundido

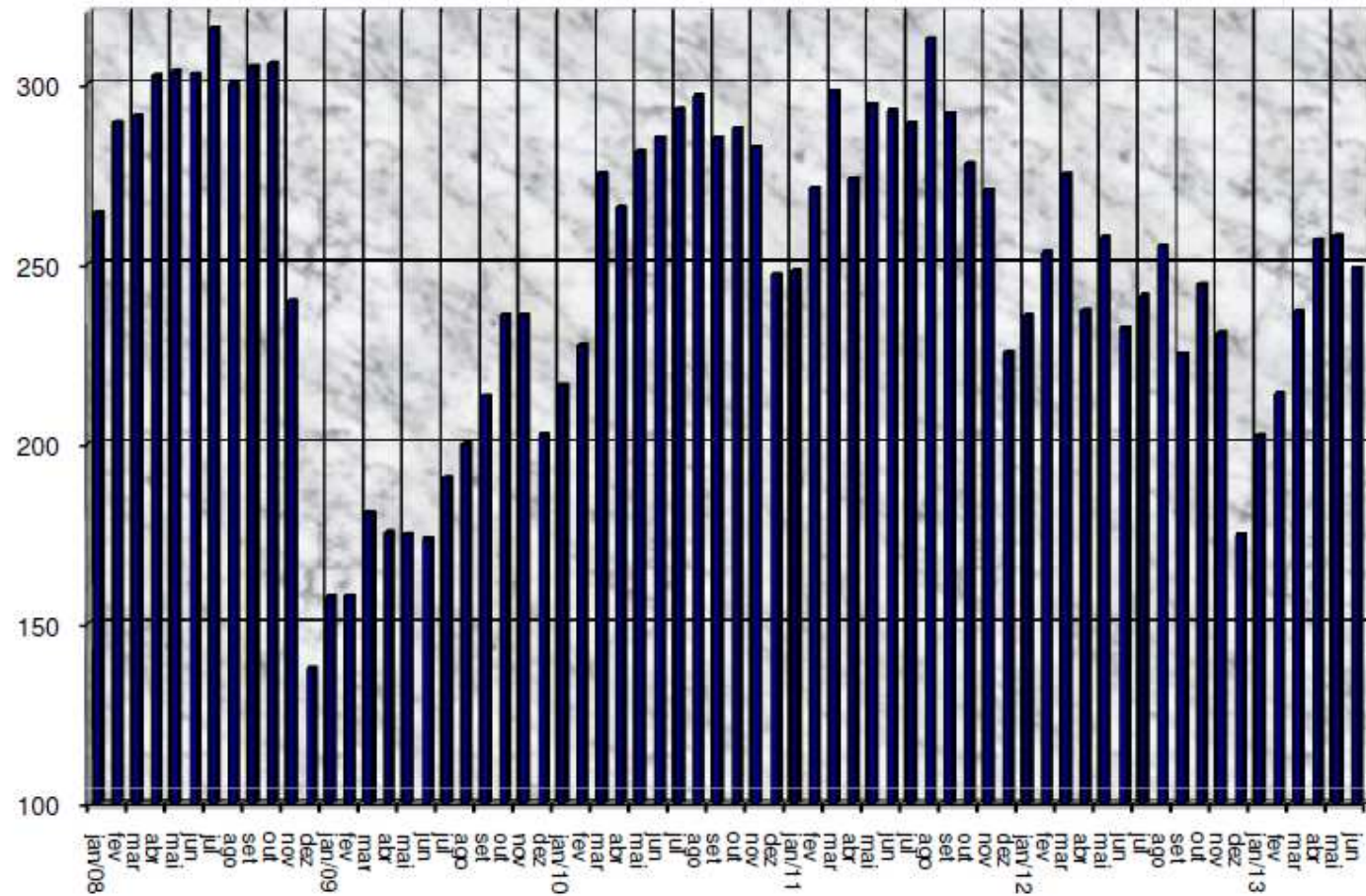






# Produção Brasileira

Milhares Toneladas





# Produção Brasileira

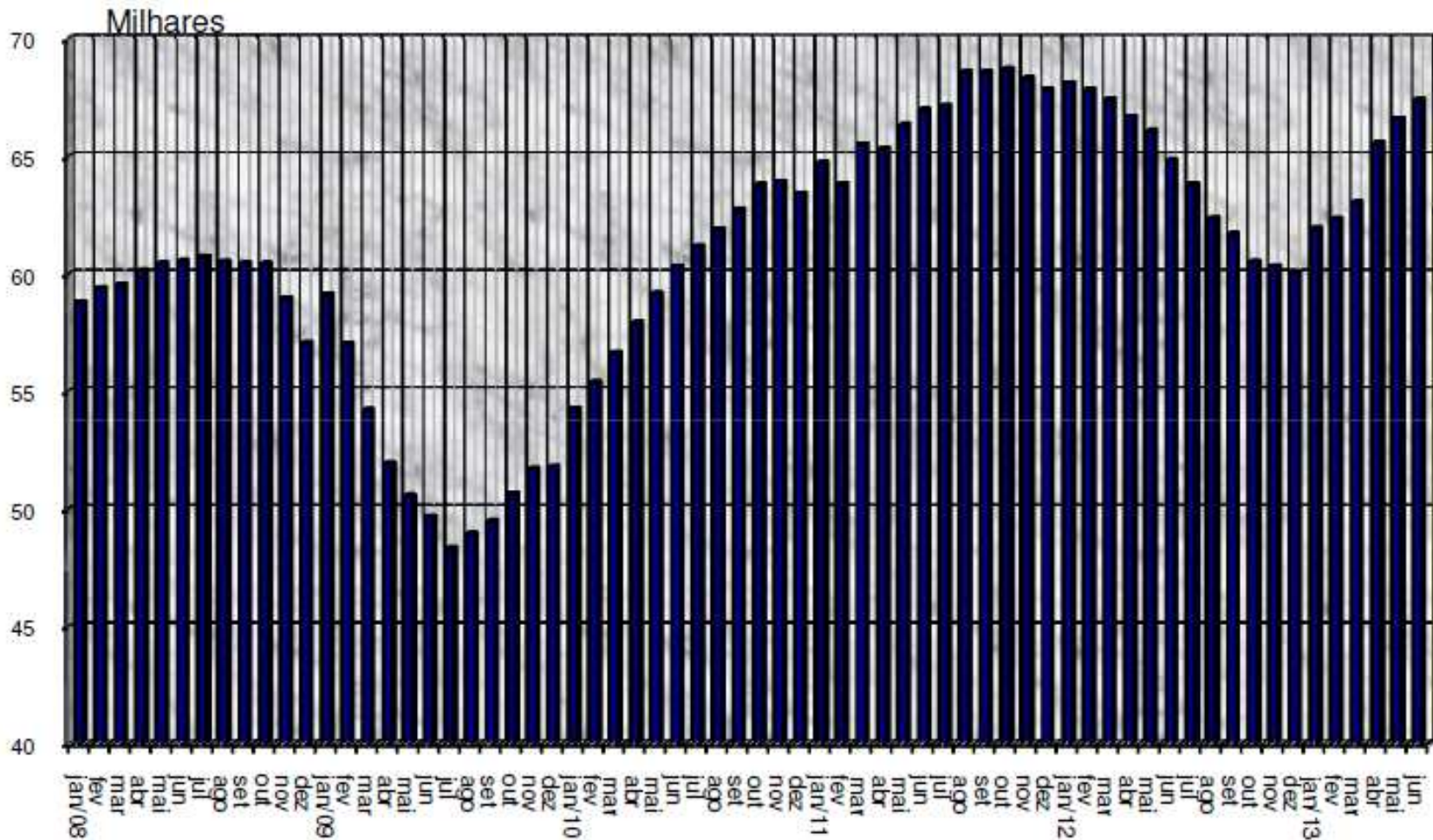
## I - PRODUÇÃO DE FUNDIDOS (t)

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*

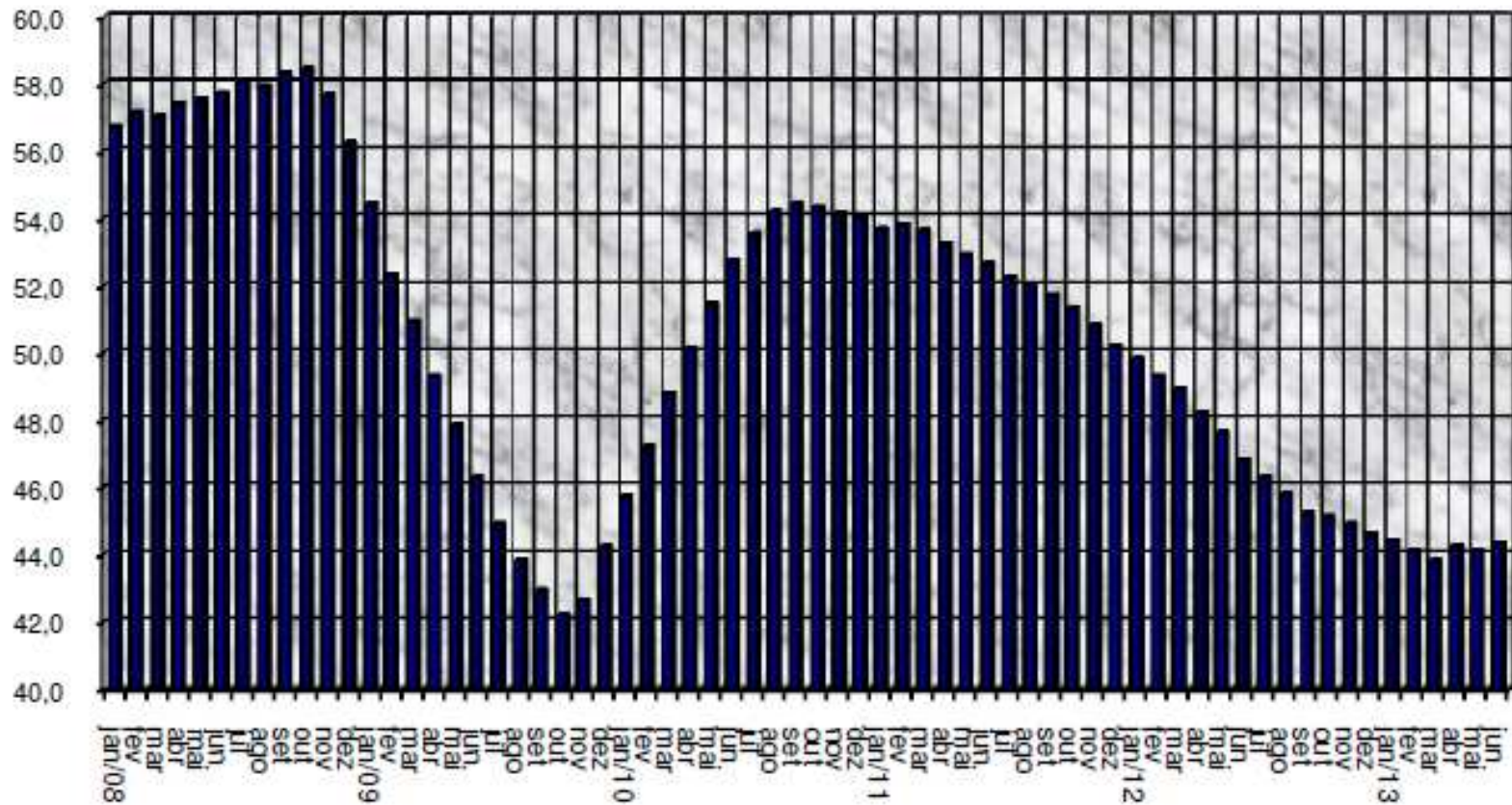


# Pessoal Empregado

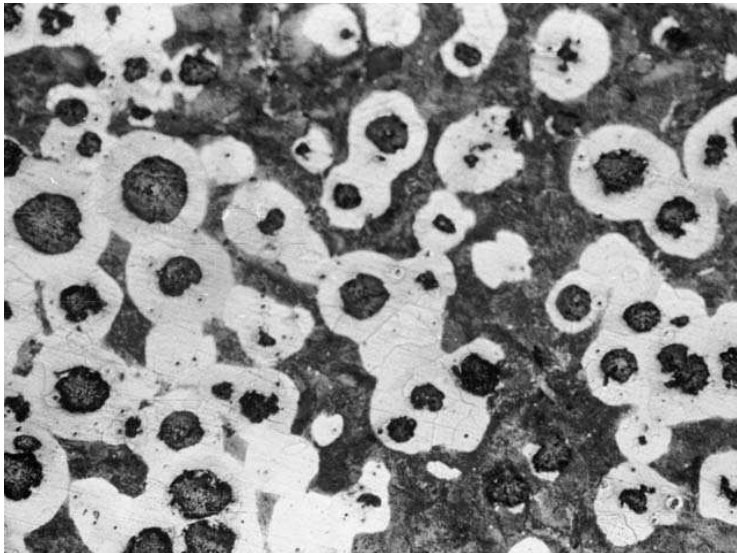


# Produtividade

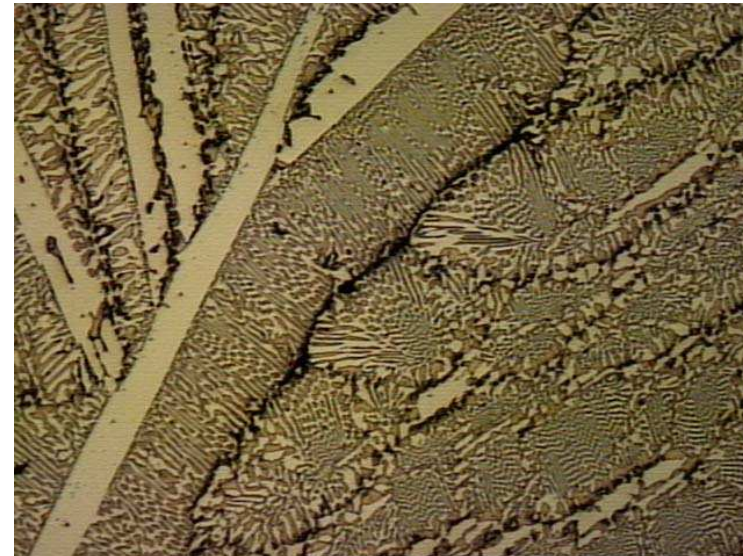
## PRODUTIVIDADE t/h ANO



# Exemplo de controle da microestrutura do fundido



FoFo nodular



FoFo branco

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



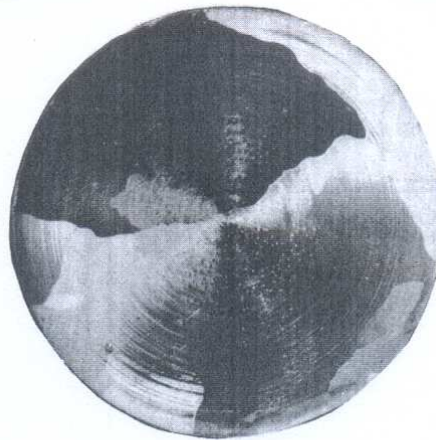
# Outro exemplo



(a)



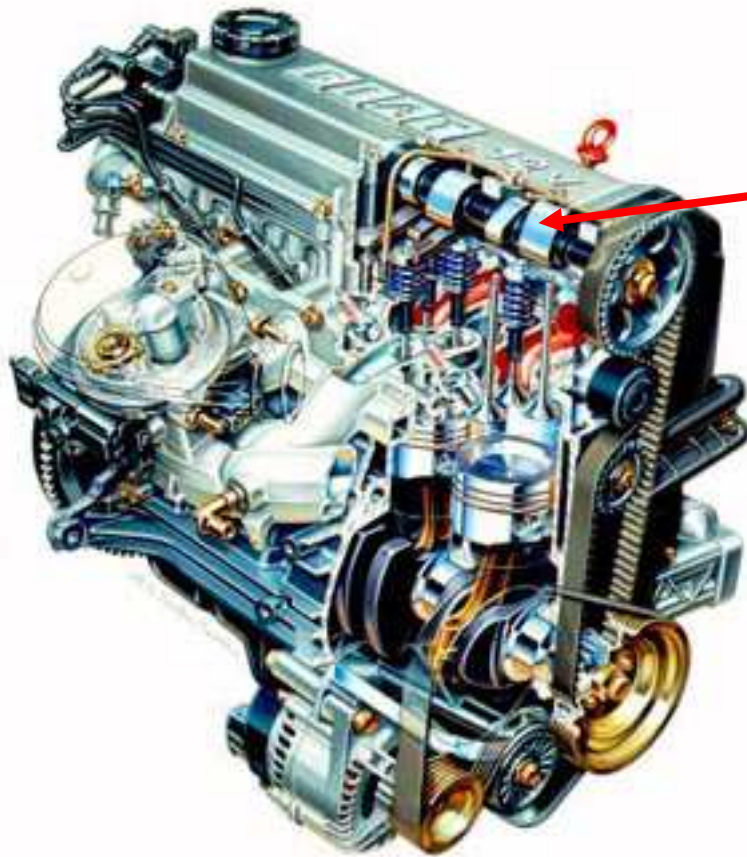
(b)



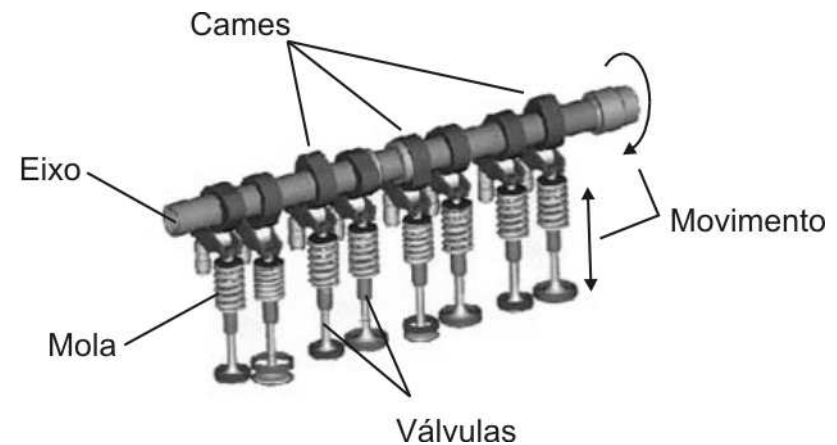
(c)

*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

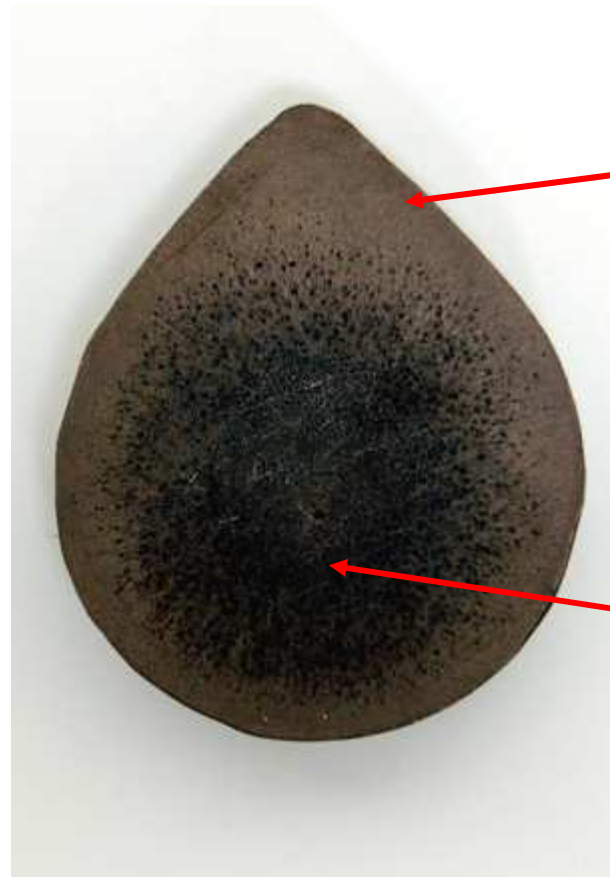


Eixo do comando de válvulas



# 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**

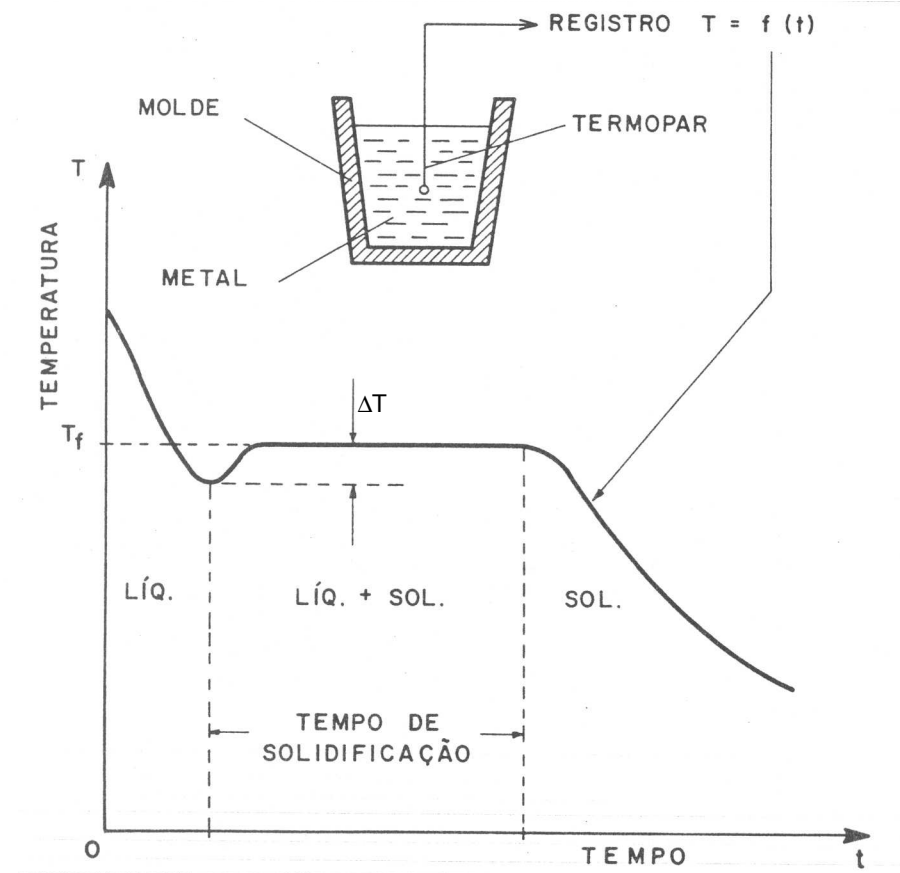
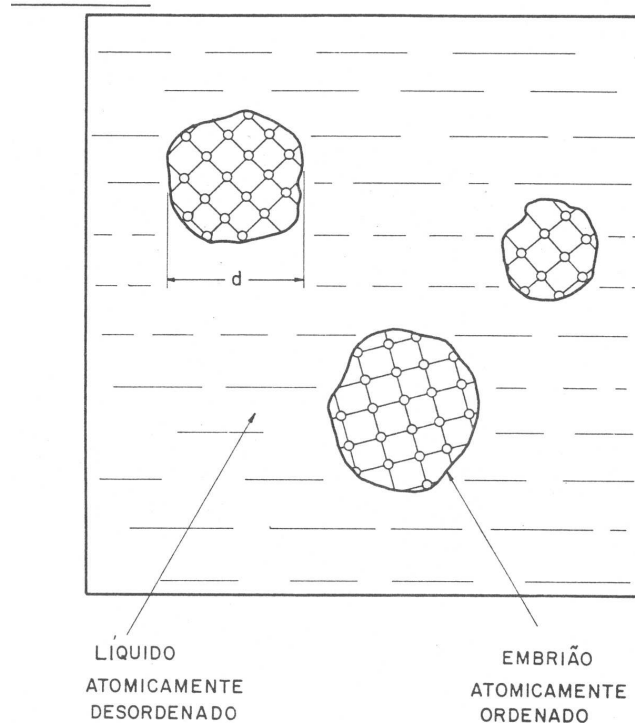


# Super-resfriamento Nucleação e Crescimento

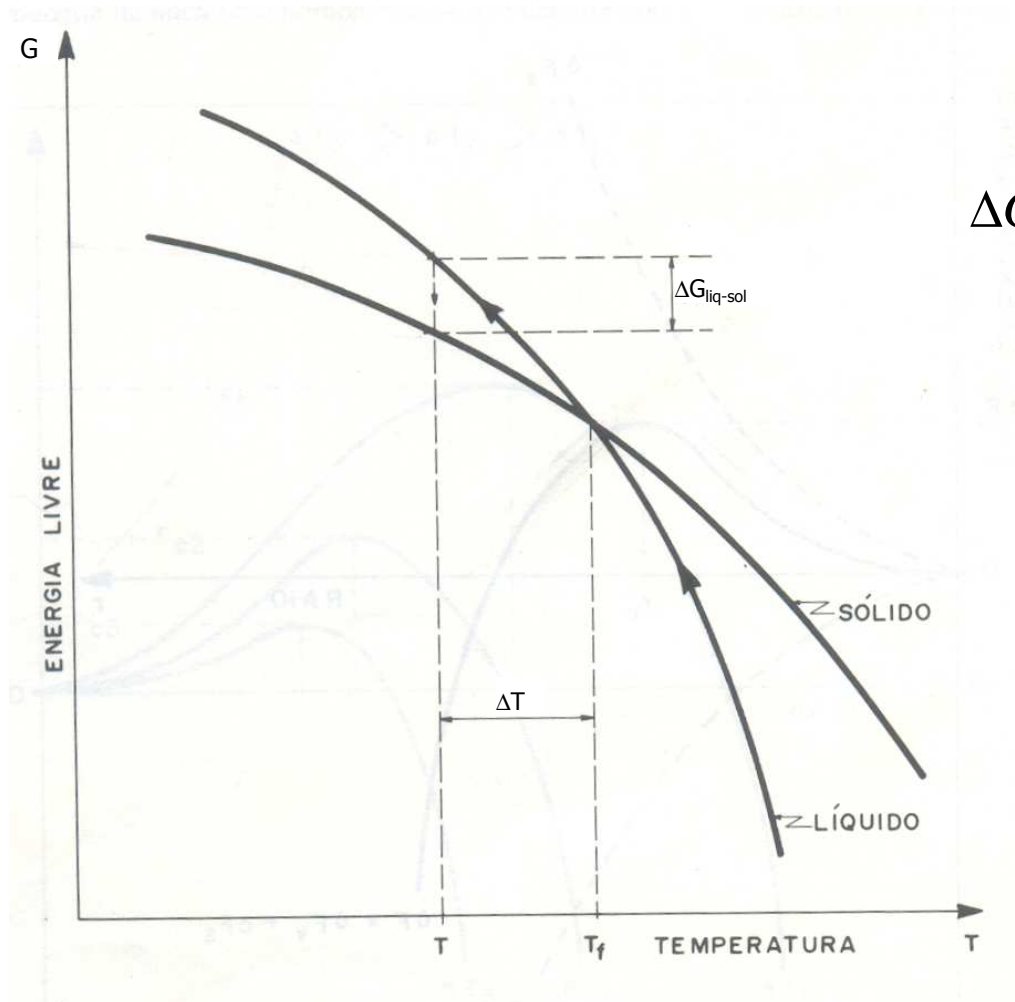
---

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

# Super-resfriamento Nucleação e Crescimento

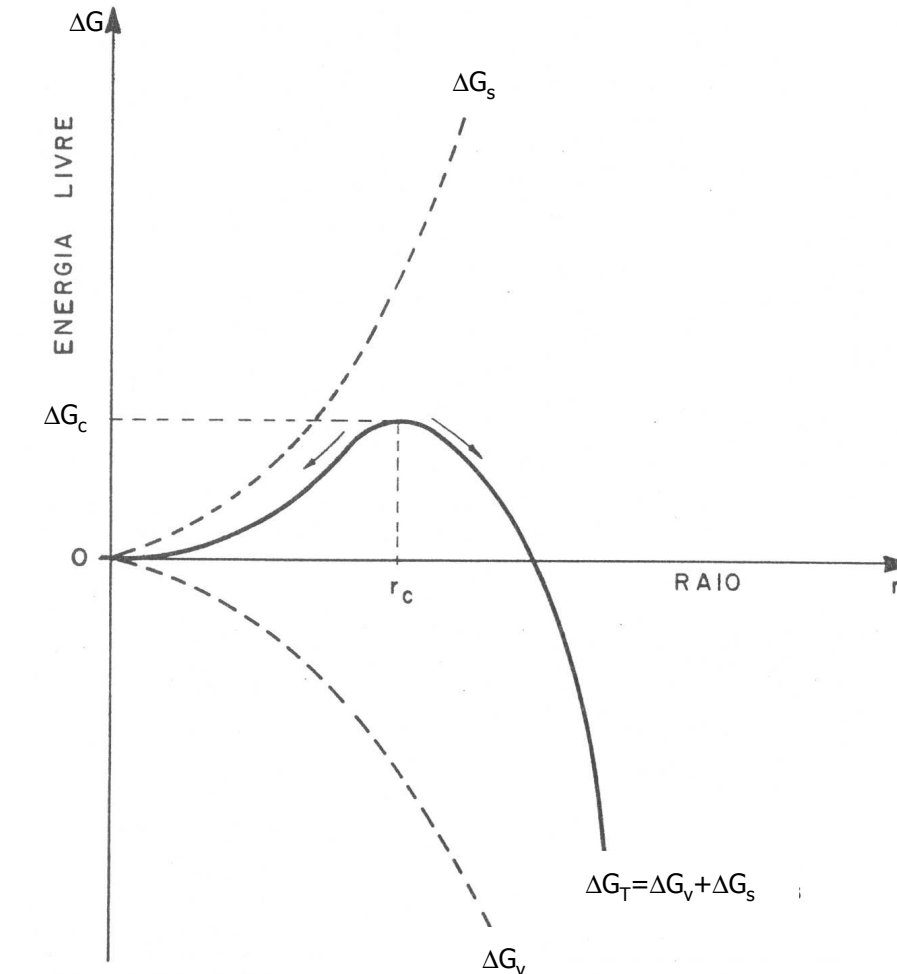


# Variação da Energia Livre Líquido - Sólido



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

# Nucleação Homogênea



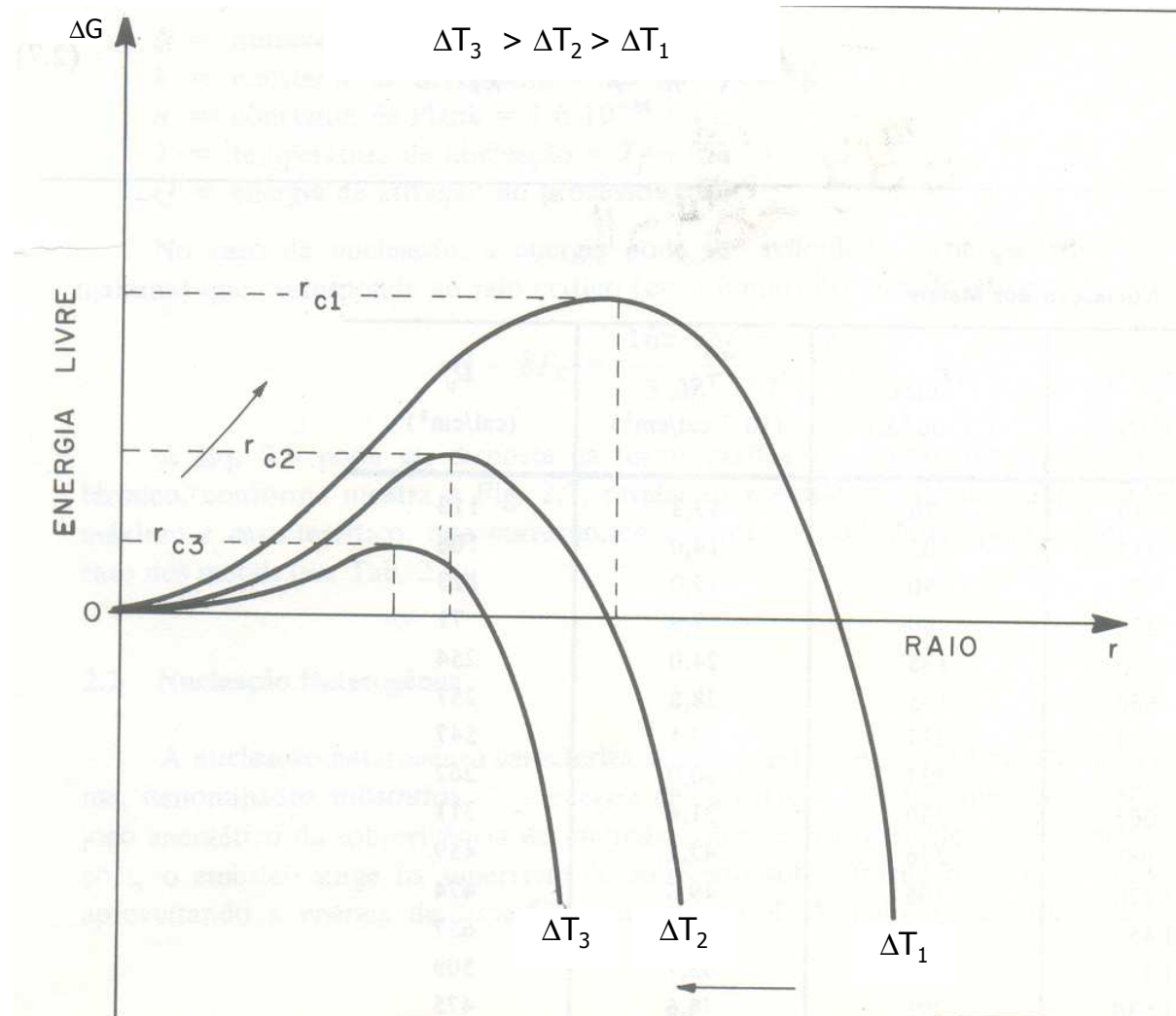
$$\Delta G_v = -\frac{\Delta H_f \Delta T}{T_f} \cdot \frac{4}{3} \pi r^3$$

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

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

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

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



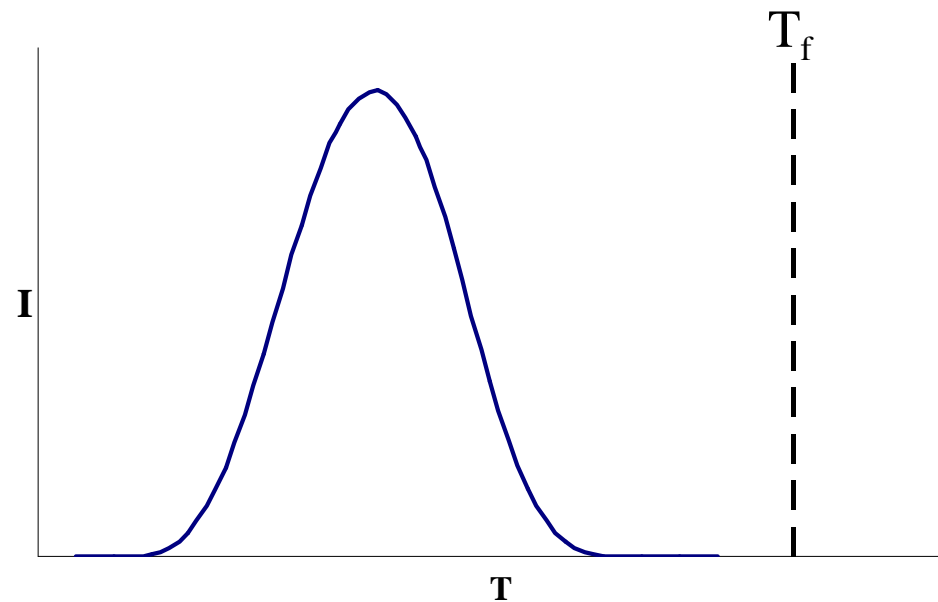


# Taxa de Nucleação

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

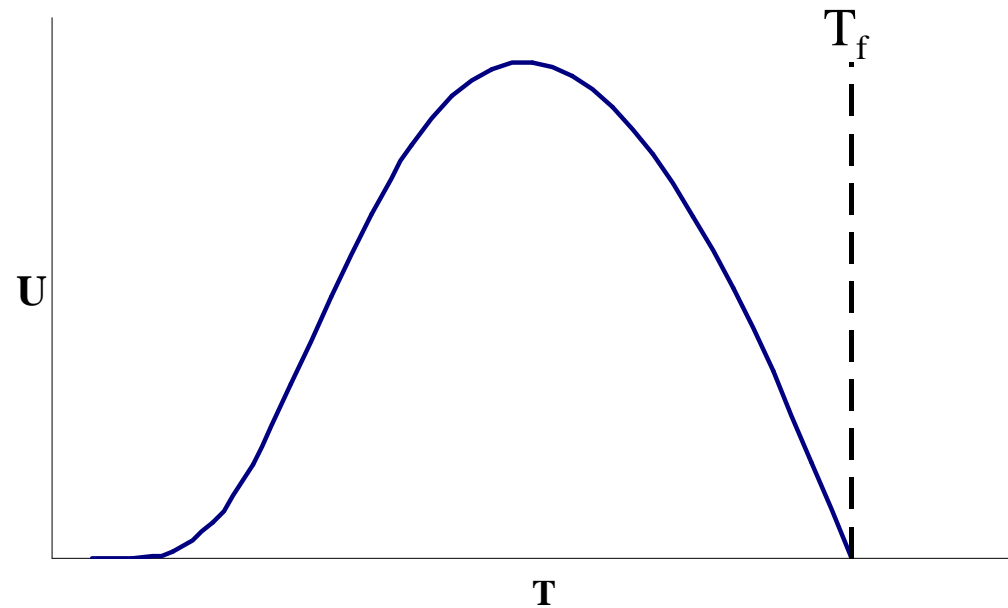
$$I = \frac{C_1}{\eta} \exp\left(\frac{-\Delta G_c}{kT}\right)$$

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



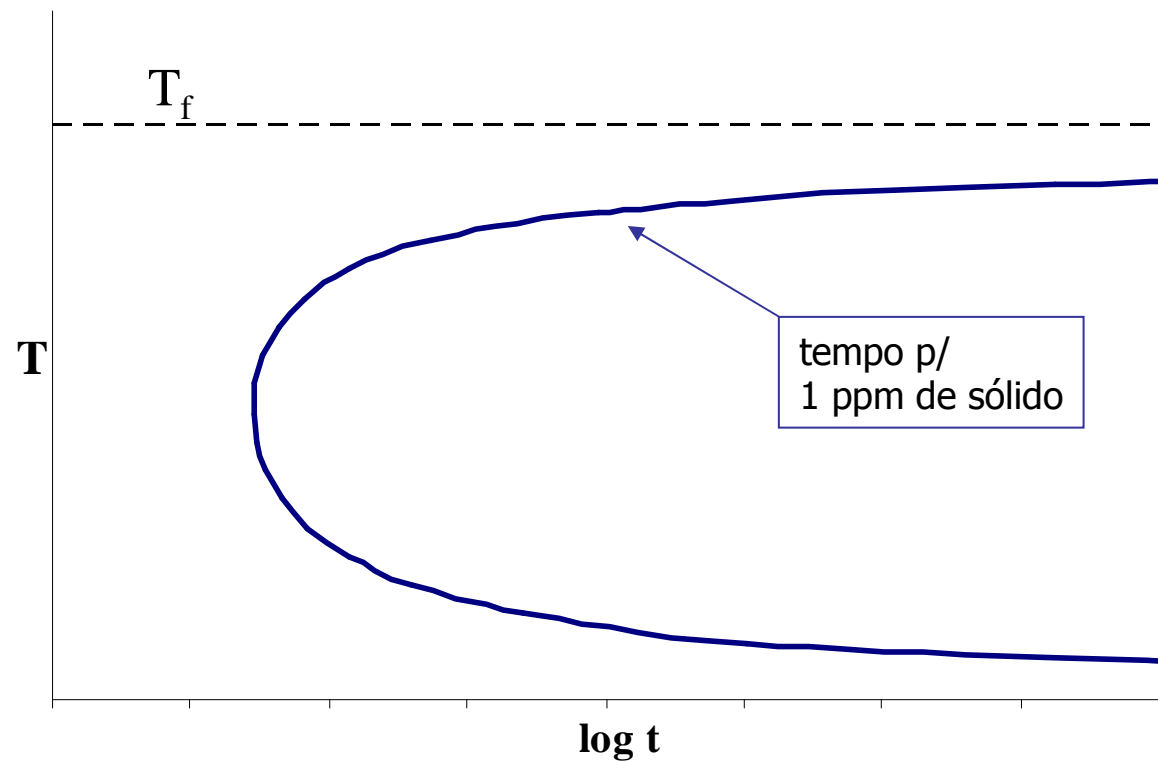
# Velocidade de crescimento

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

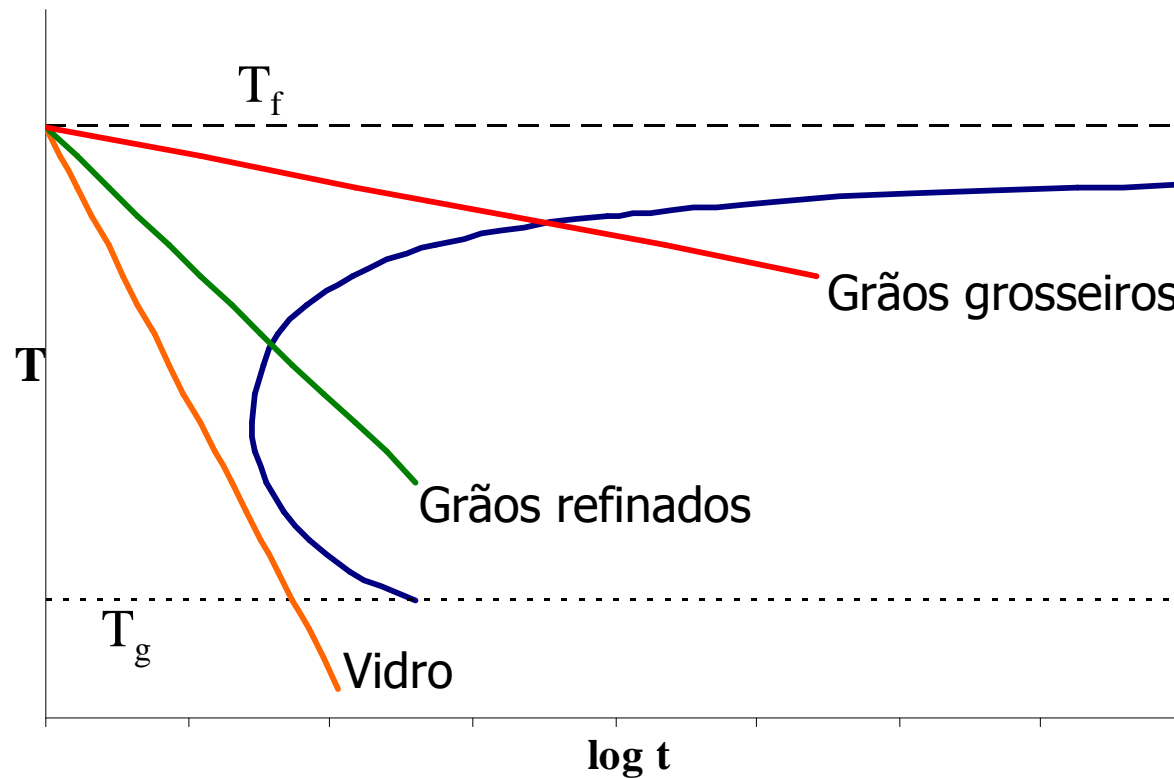


# Fração volumétrica de sólido formado com o tempo

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



# Influência da taxa de resfriamento na microestrutura



# Influência da taxa de resfriamento

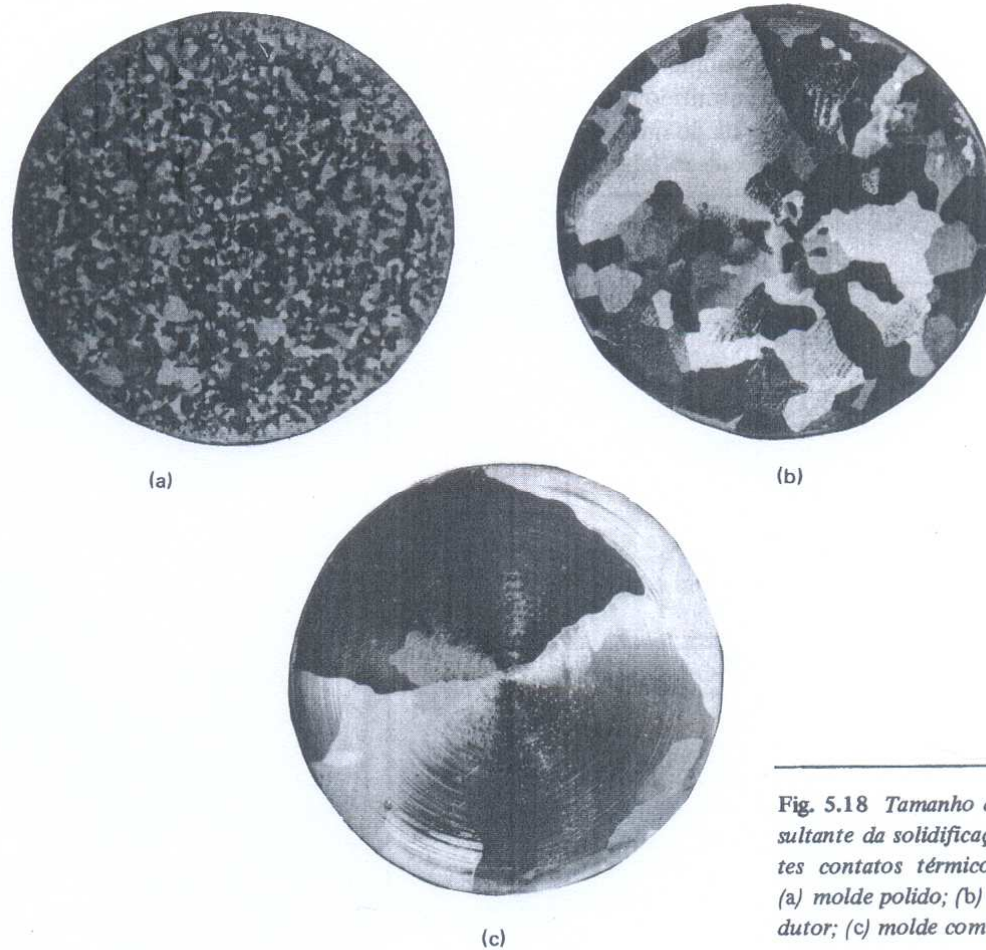
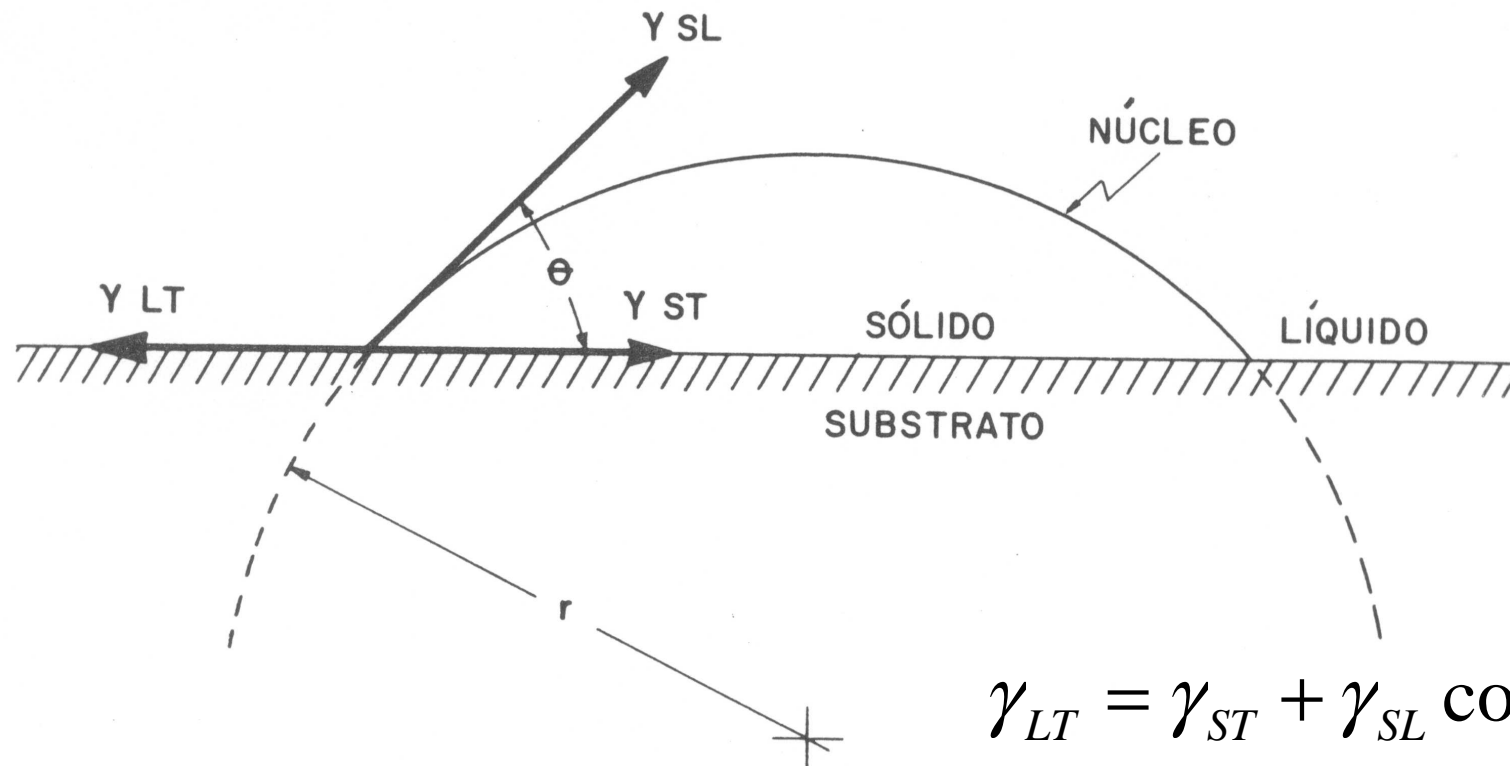


Fig. 5.18 Tamanho de grão da estrutura inicial resultante da solidificação do Alumínio com diferentes contatos térmicos na interface metal/molde: (a) molde polido; (b) molde com revestimento condutor; (c) molde com revestimento isolante.

# 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:

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

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

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

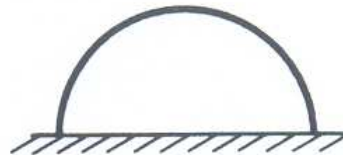
# Ângulo de molhamento

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



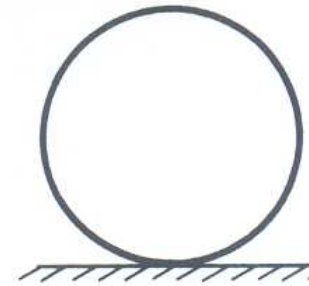
MOLHAMENTO  
TOTAL

$$\theta = 0^\circ$$



MOLHAMENTO  
PARCIAL

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



MOLHAMENTO  
NULO

$$\theta = 180^\circ$$

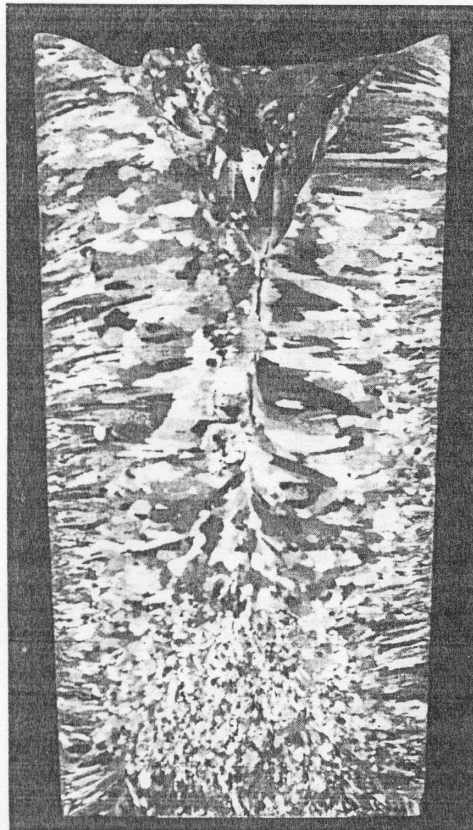


# Molhamento

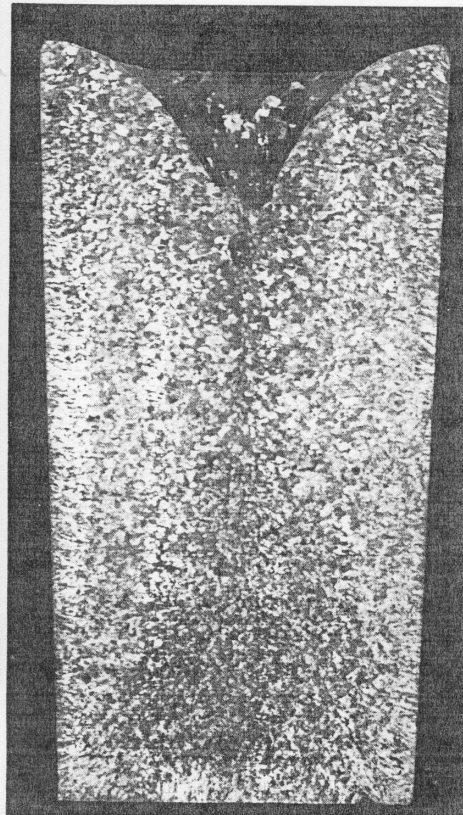
$\theta(^{\circ})$	Type of Nucleation	$f(\theta)$
0 complete wetting	no nucleation barrier (§)	0
10	heterogeneous	0.00017
20		0.0027
30		0.013
40		0.038
50		0.084
70		0.25
90		0.5
110		0.75
130		0.92
150		0.99
170	0.9998	
180 no wetting	homogeneous	1

§ immediate growth can occur

# Nucleação heterogênea (Inoculação)



(a)

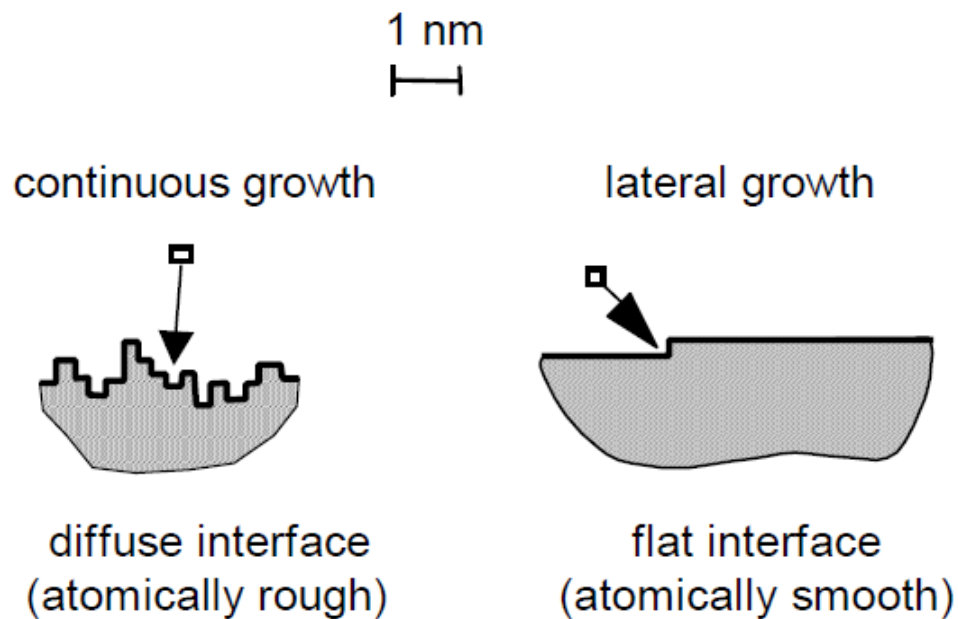


(b)

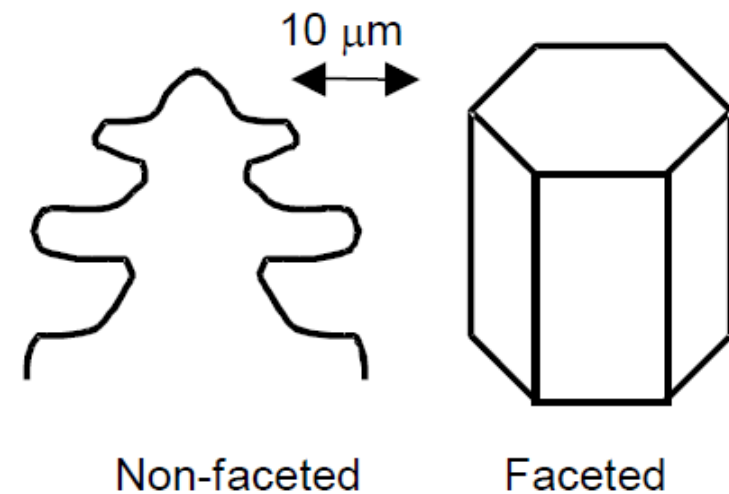
Fig. 2.11 Macroestrutura ( $\times 1$ ) da seção longitudinal de lingotes de alumínio solidificados em molde-coquilha de aço: (a) estrutura de solidificação normal, sem nenhum tipo de inoculação; (b) com inoculação prévia de boro-titânio para refino de grão.

Filme  
Inoculação

# Interface de crescimento



a) atomic scale

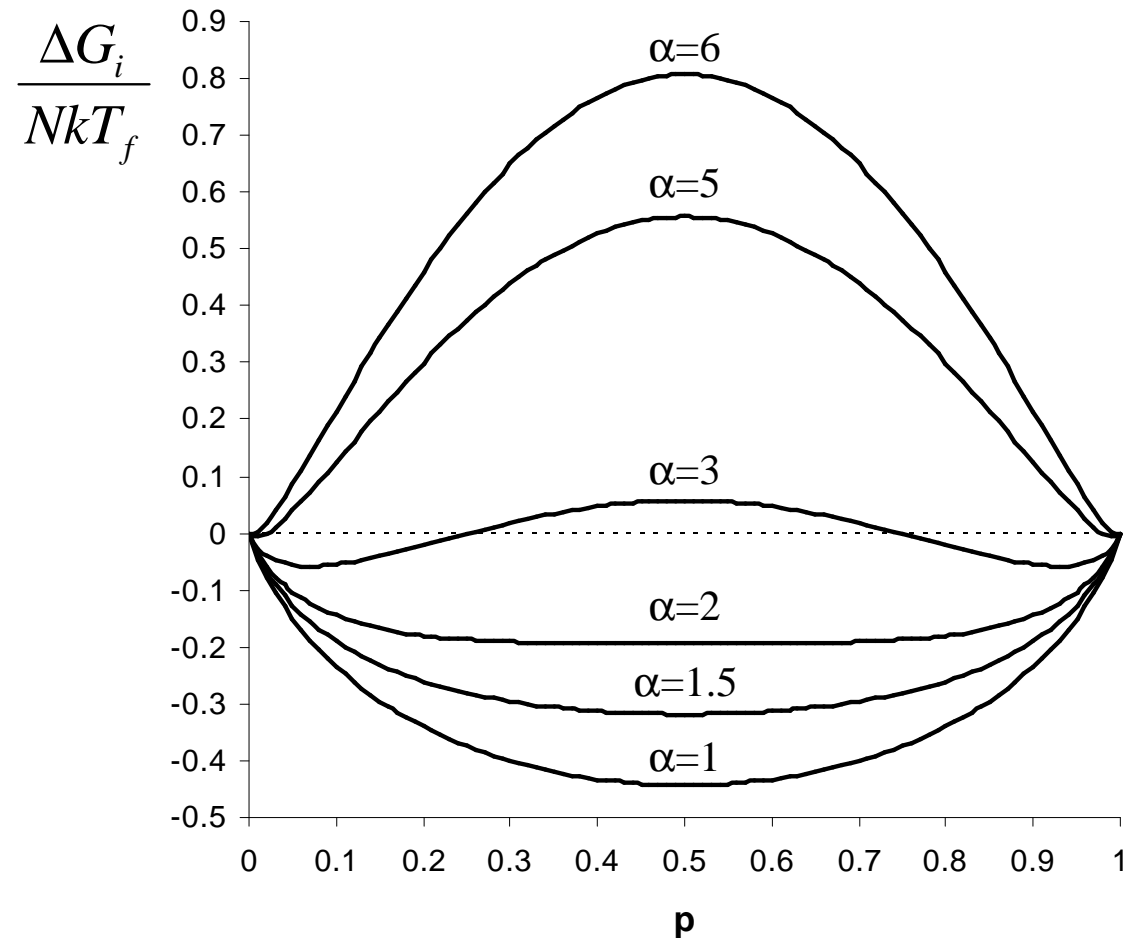


b) micro-scale

# 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

$\Delta T$  – super-resfriamento:  $T_f - T$  ( $T < T_f$ )

$\Delta H_f$  – entalpia de fusão ou calor latente de fusão

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

$\Delta G_v$  – variação de energia livre relativa ao volume do núcleo

$r$  – raio do núcleo

$\Delta G_s$  – variação de energia livre relativa à superfície do núcleo, interface sólido/líquido

$\gamma_{\text{SL}}$  – energia ou tensão superficial da interface sólido/líquido

$\Delta G_T$  – variação total da energia livre para a nucleação

$r_c$  – raio crítico

$\Delta G_c$  – variação crítica de energia livre ou barreira energética para a nucleação

$I$  – taxa de nucleação

$C_1$  – constante da equação de  $I$

$\eta$  – 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  $U$

$\chi_{sol}$  – fração volumétrica de sólido

$T_g$  – temperatura de transição vítrea

$\gamma_{LT}$  – energia ou tensão superficial da interface líquido/substrato

$\gamma_{ST}$  – energia ou tensão superficial da interface sólido/substrato

$\theta$  – ângulo de “molhamento” entre o núcleo sólido e o substrato

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

$\Delta G_c^{homo}$  – barreira energética para a nucleação homogênea

$\Delta G_c^{heter}$  – barreira energética para a nucleação heterogênea

$r_c^{homo}$  – raio crítico da nucleação homogênea

$r_c^{heter}$  – raio crítico da nucleação heterogênea

$\Delta G_i$  – variação de energia livre na interface de crescimento

$N$  – constante de Avogadro

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

$R$  – constante universal dos gases

$\alpha$  – razão entre  $\Delta S_f$  e  $R$

$p$  – fração de átomos na interface pertencentes ao sólido

$\Delta T_i$  – super-resfriamento na interface de crescimento