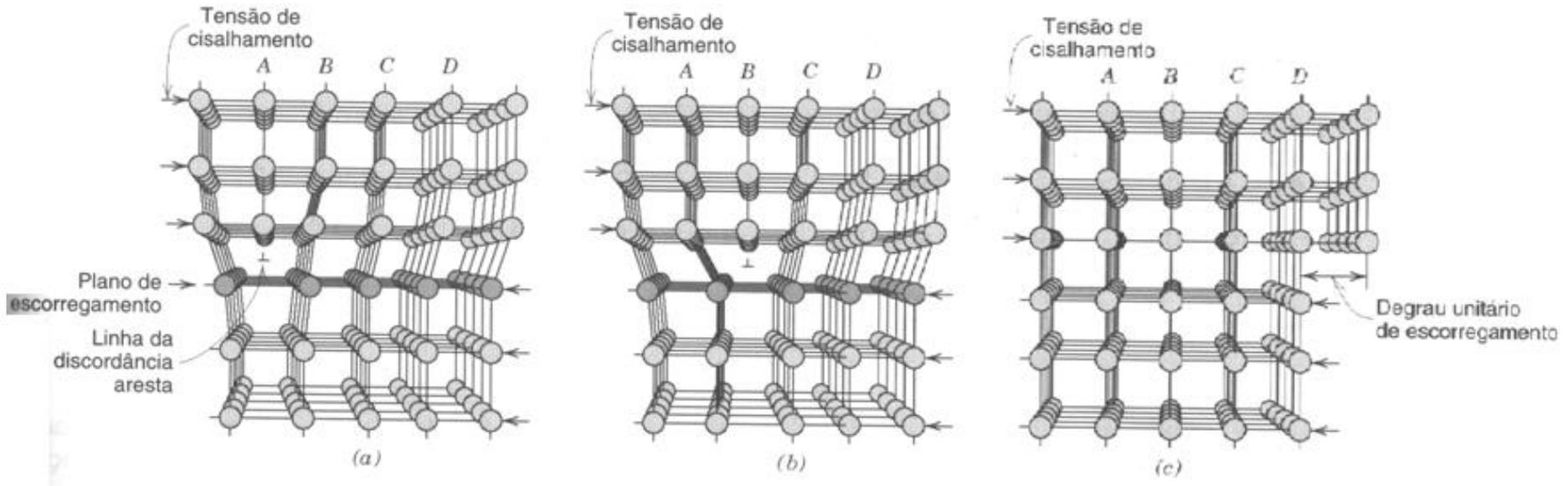


# **DISCORDÂNCIAS E MECANISMOS DE AUMENTO DA RESISTÊNCIA**

# Introdução

- A resistência teórica de cristais perfeitos eram muito superiores aos valores medidos.
- Década de 30: esta discrepância poderia ser justificada por um tipo de defeito cristalino lineares : Discordância
- Década de 50: observação direta das discordâncias através de microscópios eletrônicos.

# Deformação Plástica

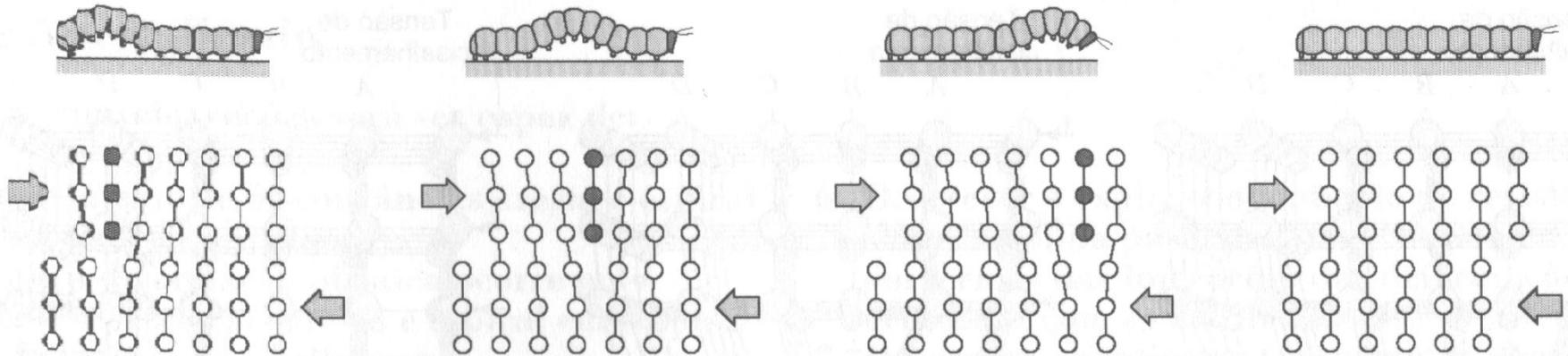


Discordância Aresta

# Deformação Plástica

- A deformação plástica corresponde ao movimento de um grande número de discordâncias.
- Uma discordância aresta se move em resposta à aplicação de uma tensão de cisalhamento em uma direção perpendicular a sua linha de discordância.
- Densidade de Discordâncias:
  - comprimento total de discordâncias por unidade de volume ou
  - número de discordâncias que intercepta uma área unitária

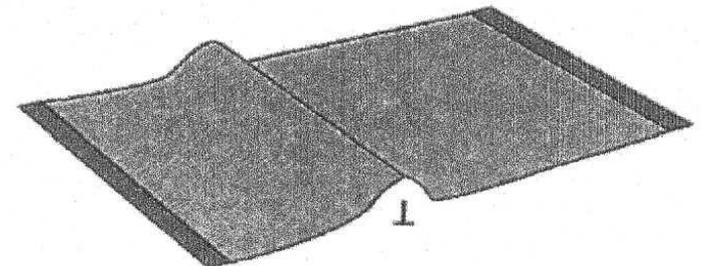
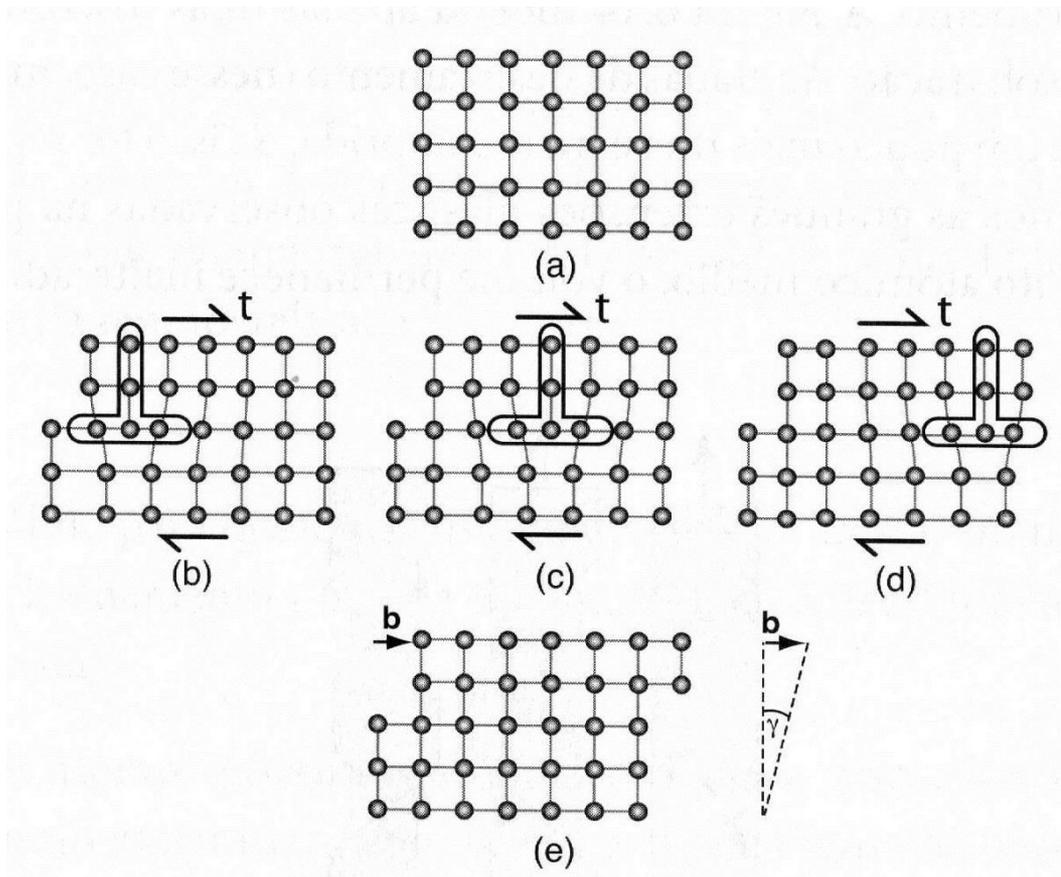
# Deformação Plástica



**Fig. 7.3** Representação da analogia entre os movimentos de uma lagarta e de uma discordância.

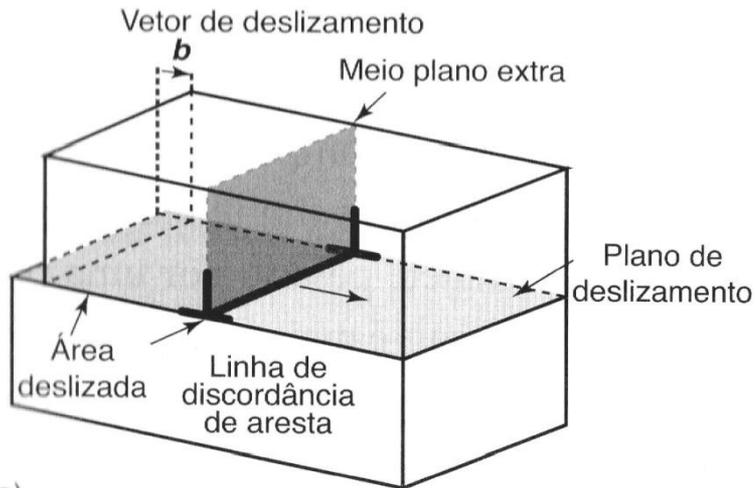
# Deformação Plástica

- A presença de discordâncias favorecem a deformação plástica.

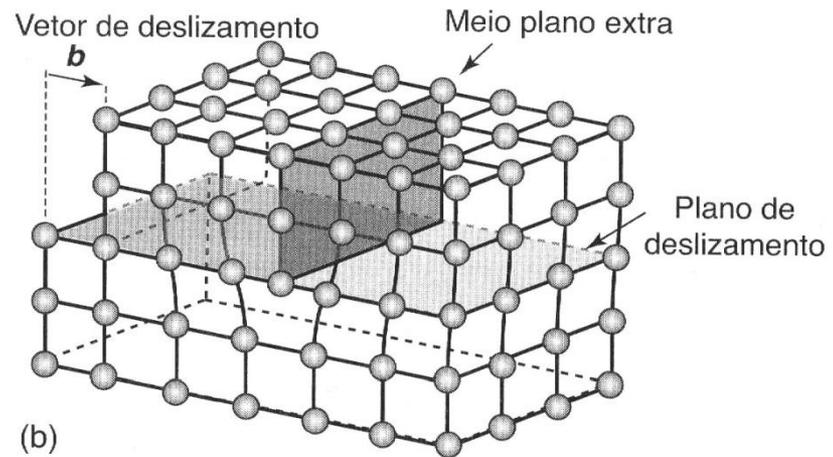


# Deformação Plástica

## Tensão de Cisalhamento



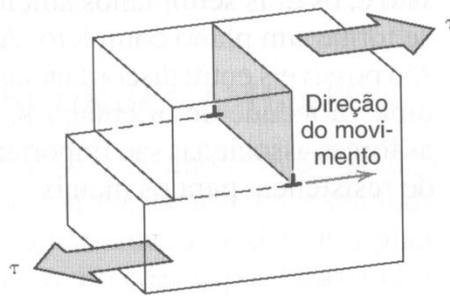
(a)



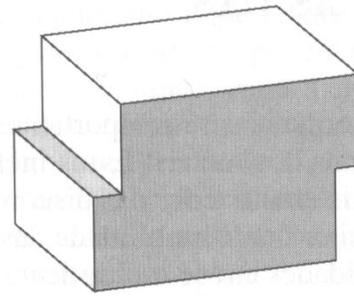
(b)

# Deformação Plástica

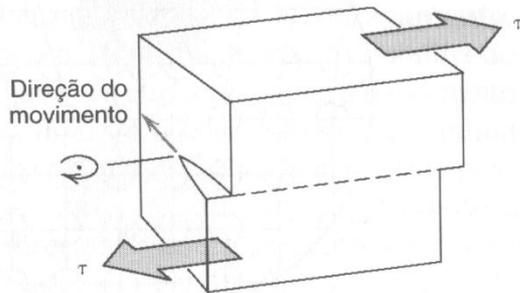
## Escorregamento



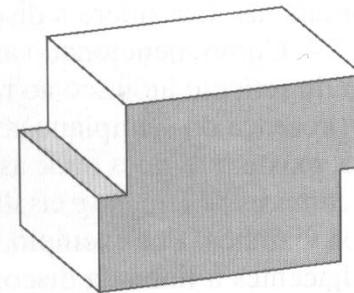
(a)



**Discordância Aresta**



(b)

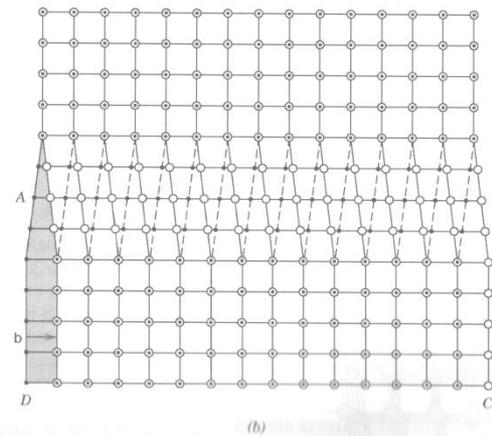
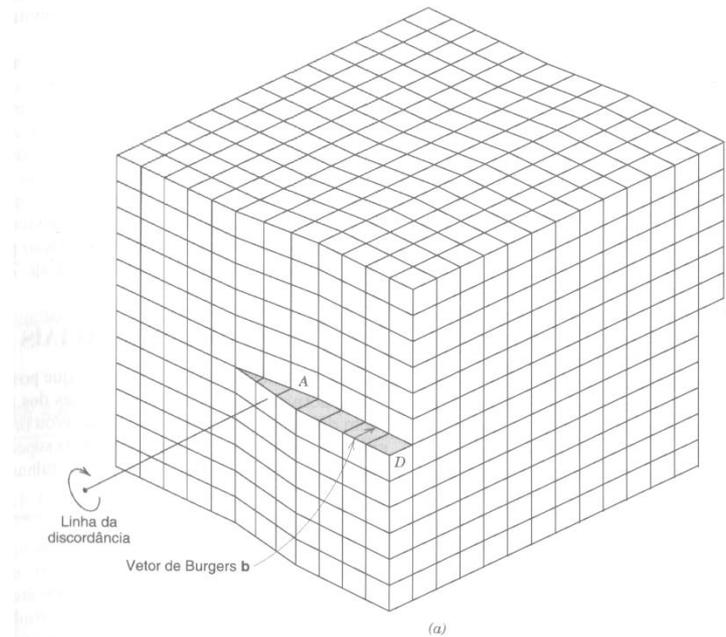


**Discordância Espiral**

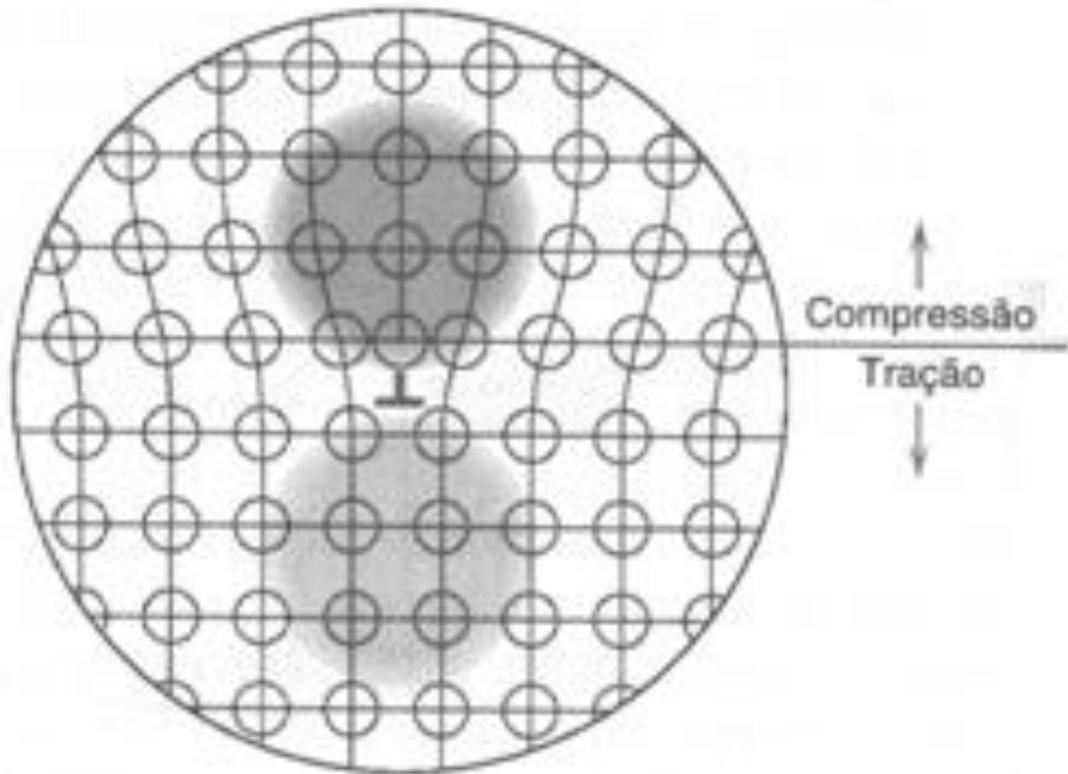
Direção do movimento perpendicular à direção da tensão

# Defeitos Lineares

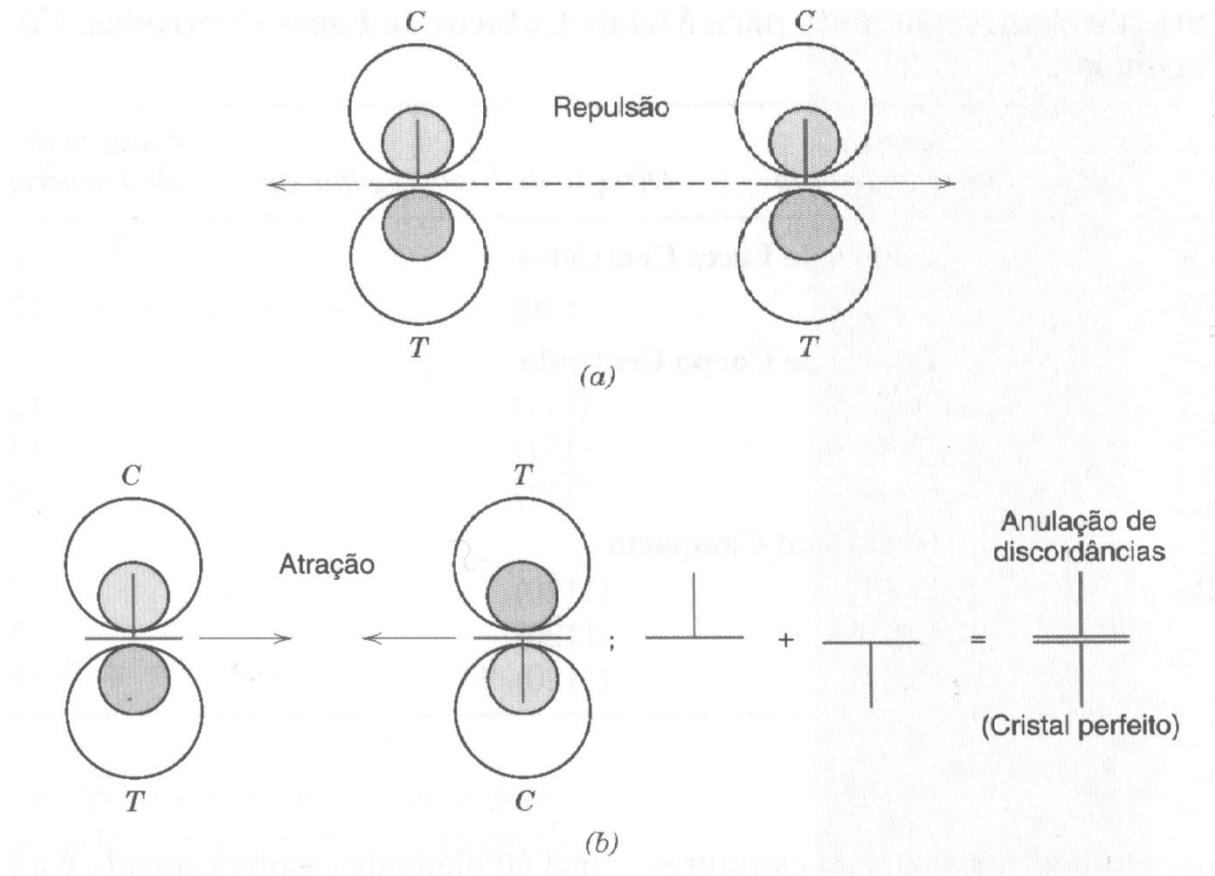
## Discordância Espiral



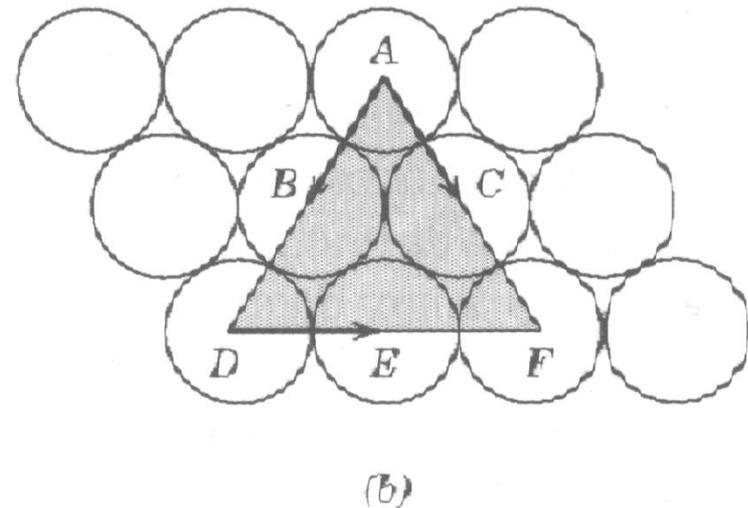
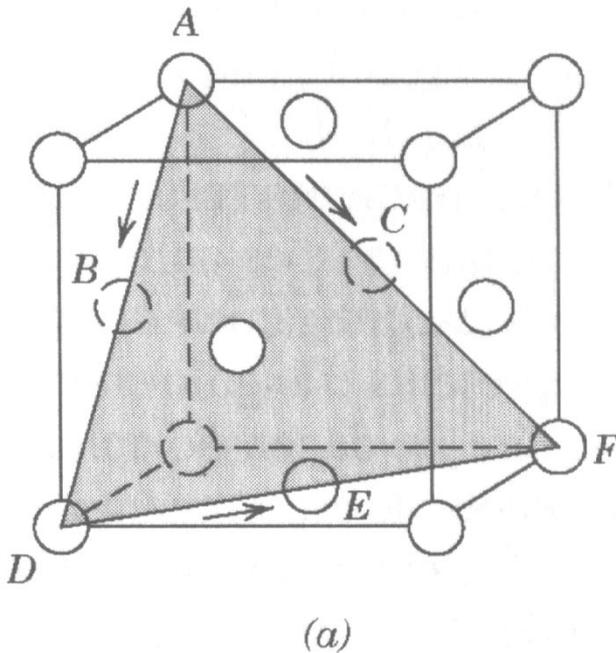
# Características das Discordâncias



# Características das Discordâncias



# Características das Discordâncias



Sistema de Escorregamento  $\{111\} \langle 110 \rangle$  Plano e Direção de Escorregamento

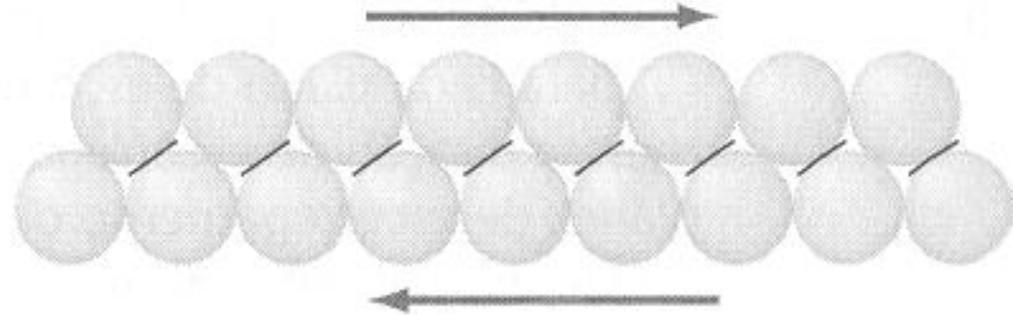
Direção mais densa de átomos.

# Características das Discordâncias

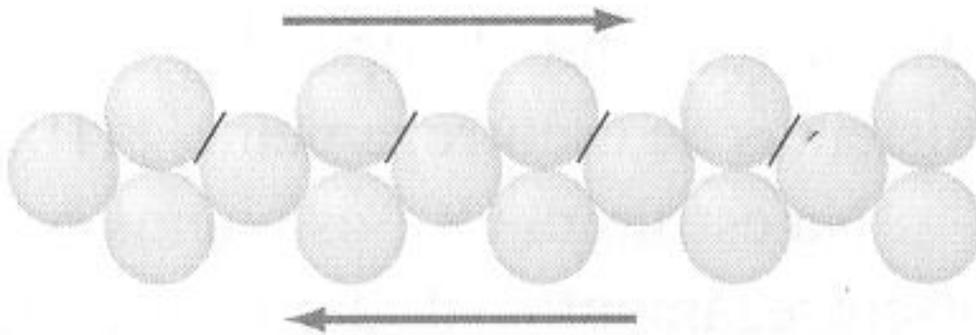
**Table 7.1** Slip Systems for Face-Centered Cubic, Body-Centered Cubic, and Hexagonal Close-Packed Metals

<i>Metals</i>	<i>Slip Plane</i>	<i>Slip Direction</i>	<i>Number of Slip Systems</i>
	<b>Face-Centered Cubic</b>		
Cu, Al, Ni, Ag, Au	{111}	$(\bar{1}\bar{1}0)$	12
	<b>Body-Centered Cubic</b>		
$\alpha$ -Fe, W, Mo	{110}	$(\bar{1}11)$	12
$\alpha$ -Fe, W	{211}	$(111)$	12
$\alpha$ -Fe, K	{321}	$(\bar{1}11)$	24
	<b>Hexagonal Close-Packed</b>		
Cd, Zn, Mg, Ti, Be	{0001}	$(11\bar{2}0)$	3
Ti, Mg, Zr	{10 $\bar{1}0$ }	$(11\bar{2}0)$	3
Ti, Mg	{10 $\bar{1}1$ }	$(11\bar{2}0)$	6

# Escorregamento



(a)



(b)

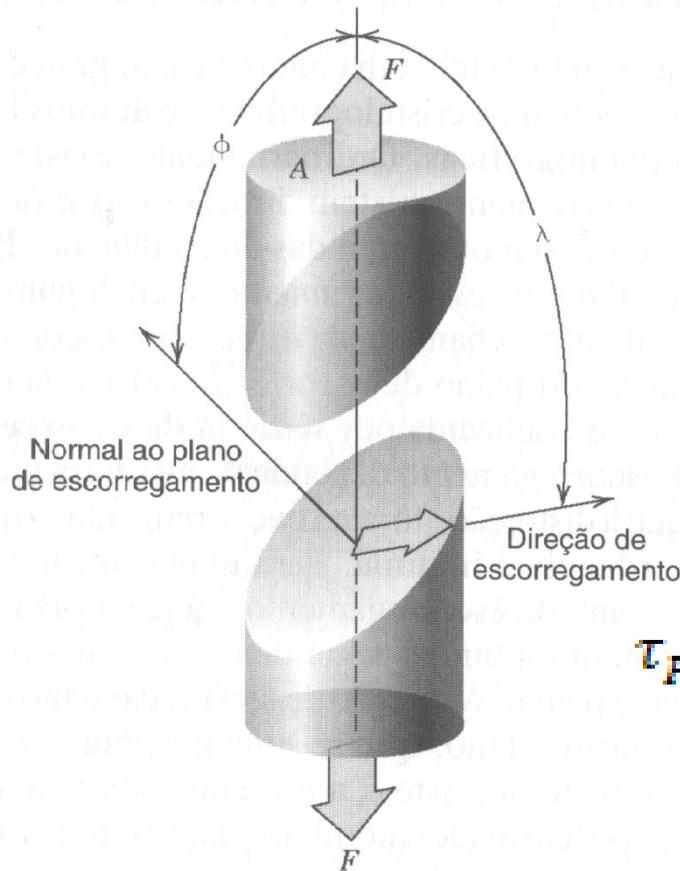
a) Plano Compacto

b) Plano não Compacto

# Características das Discordâncias

$$\langle 110 \rangle = \left\{ \begin{array}{ll} [110] & [\bar{1}\bar{1}0] \\ [101] & [\bar{1}0\bar{1}] \\ [011] & [0\bar{1}\bar{1}] \\ [1\bar{1}0] & [\bar{1}10] \\ [10\bar{1}] & [\bar{1}01] \\ [01\bar{1}] & [0\bar{1}1] \end{array} \right.$$

# Escorregamento em Monocristais



$$\tau_R = \sigma \cdot \cos\phi \cdot \cos\lambda$$

$\tau_R$  – tensão de cisalhamento resolvida

$$\tau_R(\text{máx}) = \sigma \cdot (\cos\phi \cdot \cos\lambda)_{\text{máx}}$$

# Escorregamento em Monocristais

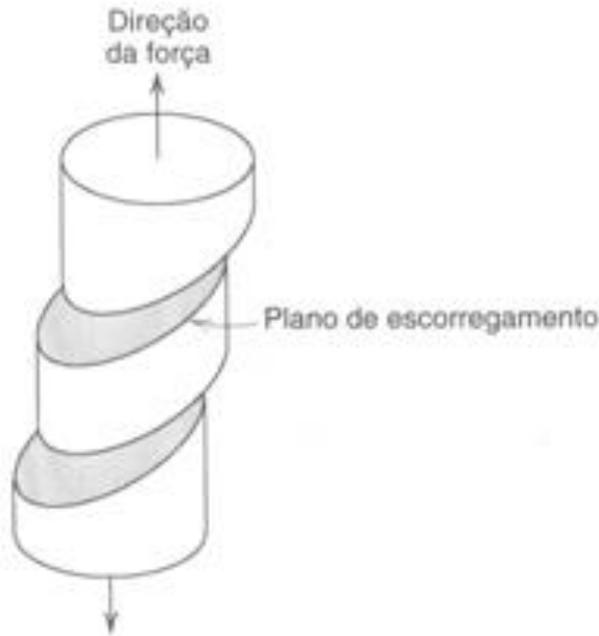


Fig. 7.8 Escorregamento macroscópico em um monocristal.

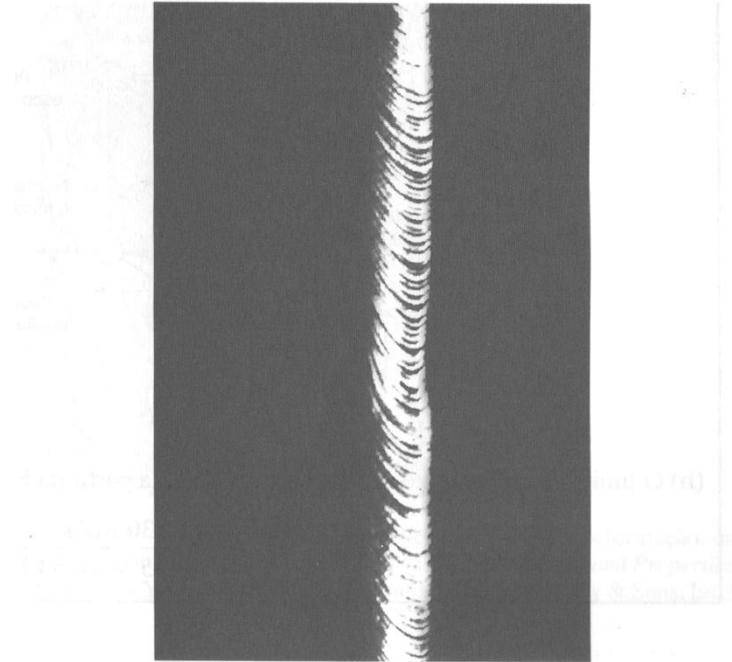


Fig. 7.9 Escorregamento em um monocristal de zinco. (De C. F. Elam, *The Distortion of Metal Crystals*, Oxford University Press, London, 1935.)

$$\sigma_s = \frac{\tau_{tcrc}}{(\cos\varphi \cdot \cos\lambda)_{\text{máx}}}$$

$\tau_{tcrc}$  = tensão de cisalhamento resolvida crítica

# Deformação Plástica de Materiais Policristalinos

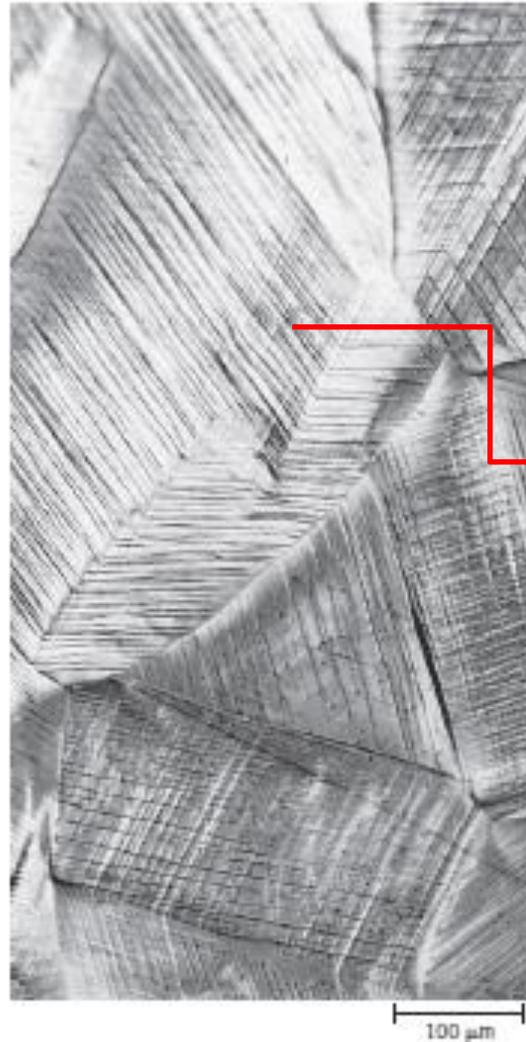


Figure 7.10 Slip lines on the surface of a polycrystalline specimen of copper that was polished and subsequently deformed. 173 $\times$ . [Photomicrograph courtesy of C. Brady, National Bureau of Standards (now the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD).]

Linhas de Escorregamento

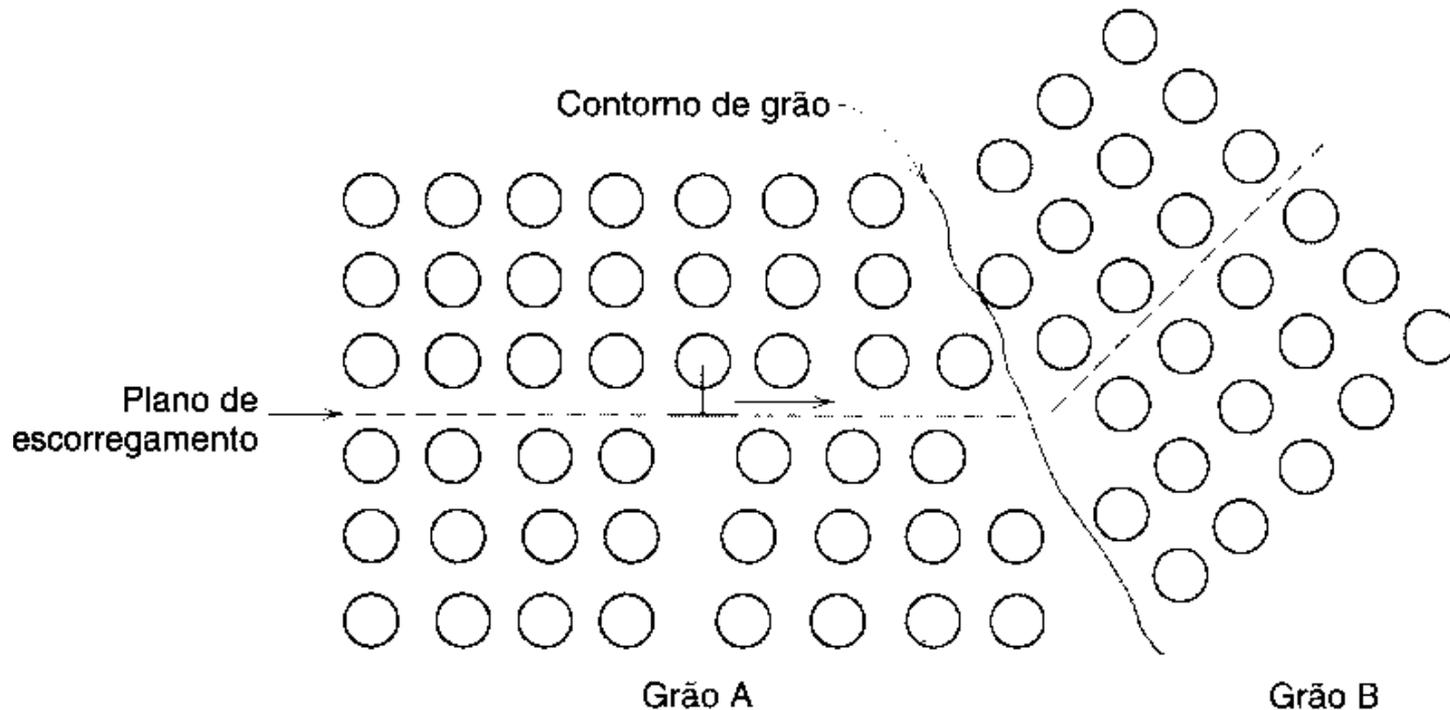
# Mecanismo do Aumento de Resistência em Metais

- Restringir ou impedir o movimento de discordâncias confere maior dureza e mais resistência a um material.
1. Aumento da Resistência pela Redução do Tamanho do Grão
  2. Aumento de Resistência por Solução Sólida
  3. Encruamento

# Aumento da Resistência pela Redução do Tamanho do Grão

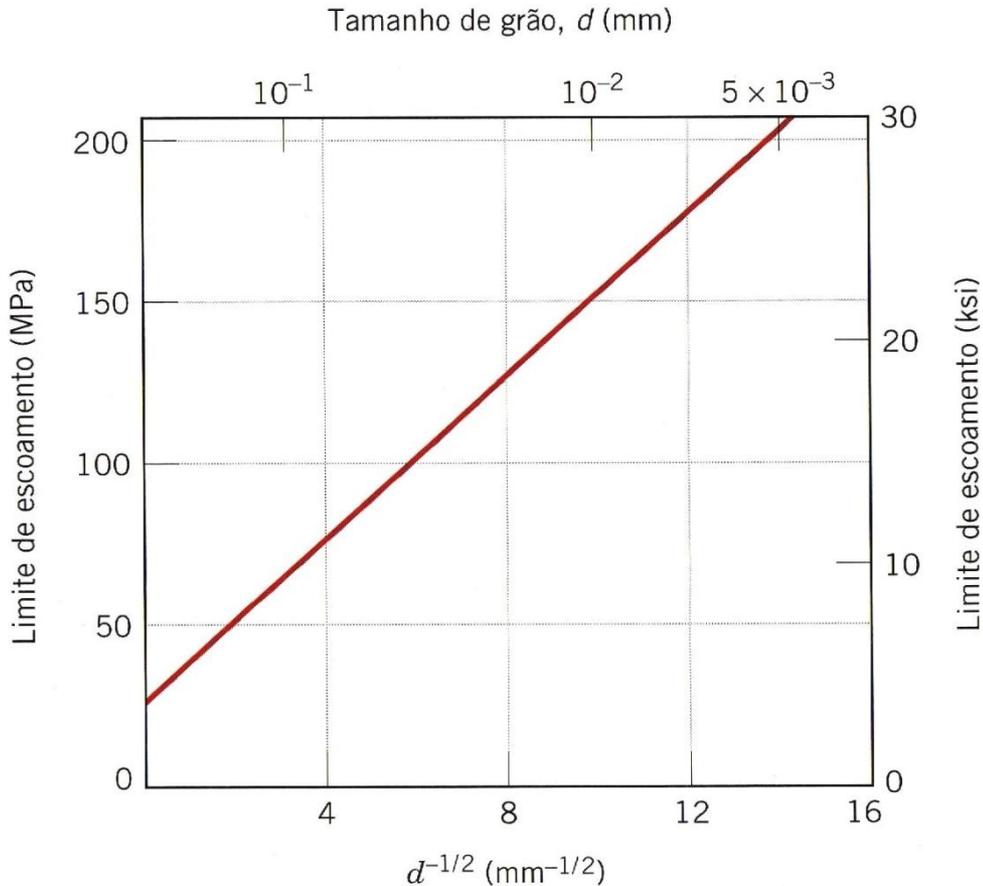
- O contorno de grão atua como uma barreira ao movimento das discordâncias.
  - Normalmente, os grão apresentam orientações diferentes.
  - Desordenamento atômico na região de contorno de grão.
- Grão menores possuem uma maior área total de contornos de grão para dificultar o movimento das discordâncias.
- Materiais com grãos menores são mais duros e mais resistentes.

# Aumento da Resistência pela Redução do Tamanho do Grão



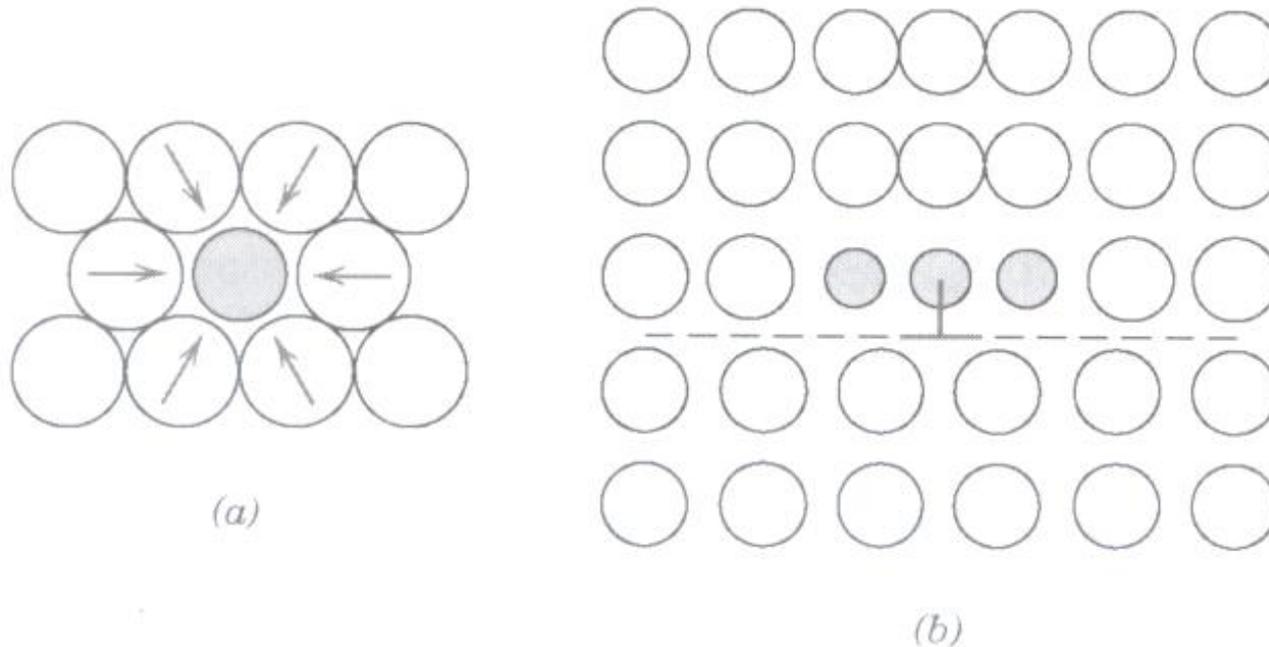
O contorno de grão funciona como uma barreira à continuidade de um escorregamento (movimento de discordâncias).

# Aumento da Resistência pela Redução do Tamanho do Grão



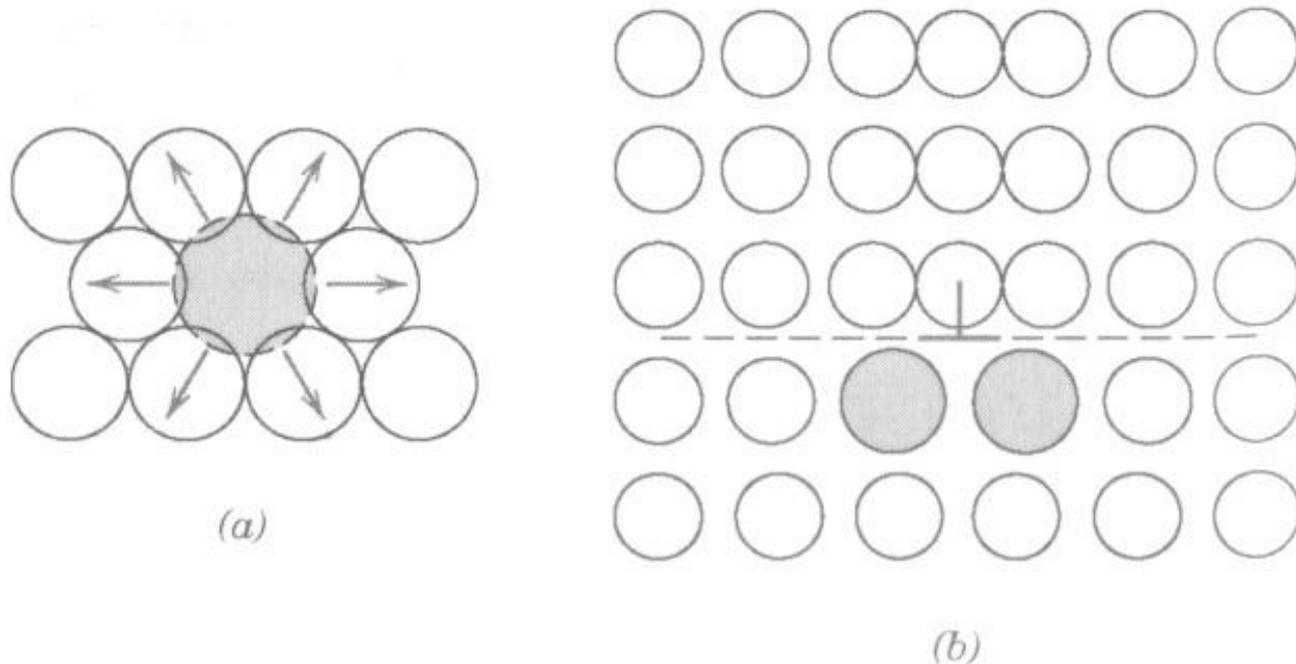
A influência do tamanho do grão sobre o limite de escoamento de um latão.

# Aumento de Resistência por Solução Sólida



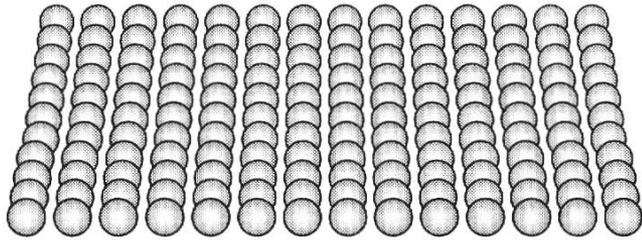
**Fig. 7.17** (a) Representação das deformações da rede por tração impostas sobre átomos hospedeiros por um átomo de impureza substitucional de menor tamanho. (b) Possíveis localizações de átomos de impureza menores em relação a uma discordância aresta, de modo que existe um cancelamento parcial das deformações da rede impureza-d discordância.

# Aumento de Resistência por Solução Sólida

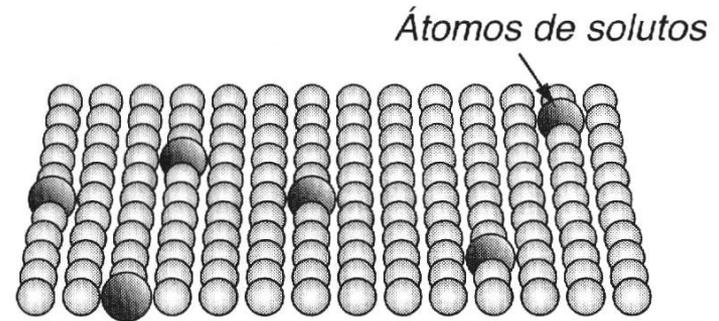


**Fig. 7.18** (a) Representação das deformações compressivas impostas sobre átomos hospedeiros por um átomo de impureza substitucional maior tamanho. (b) Possíveis localizações de átomos de impureza na região de compressão em relação a uma discordância aresta, de modo que existe um relaxamento parcial das deformações da rede impureza-discordância.

# Aumento de Resistência por Solução Sólida

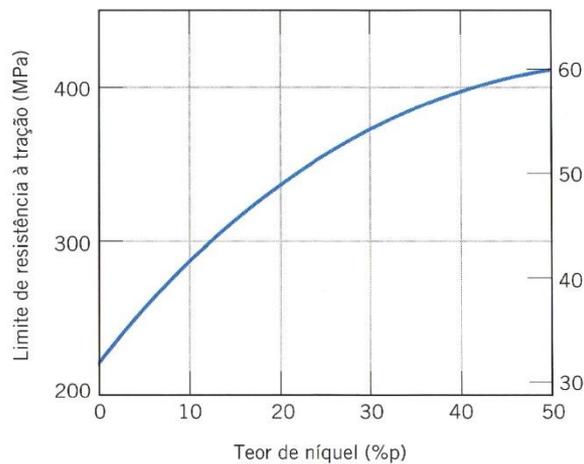


(a) Reticulado perfeito, resistência  $f_i$

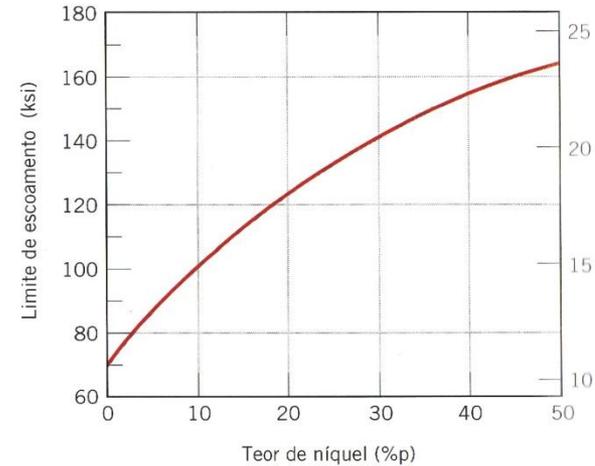


(b) Endurecimento por solução, resistência  $f_{ss}$

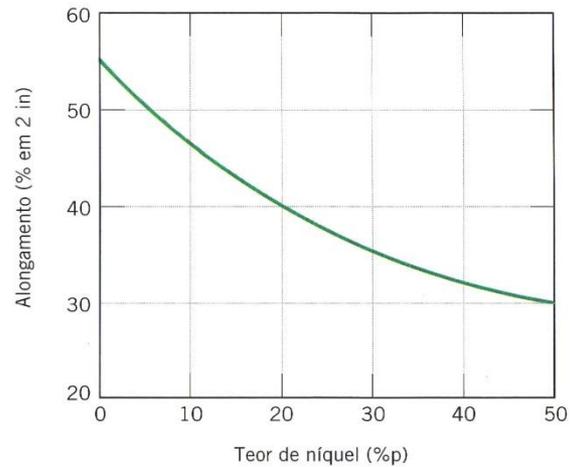
# Aumento de Resistência por Solução Sólida



(a)



(b)



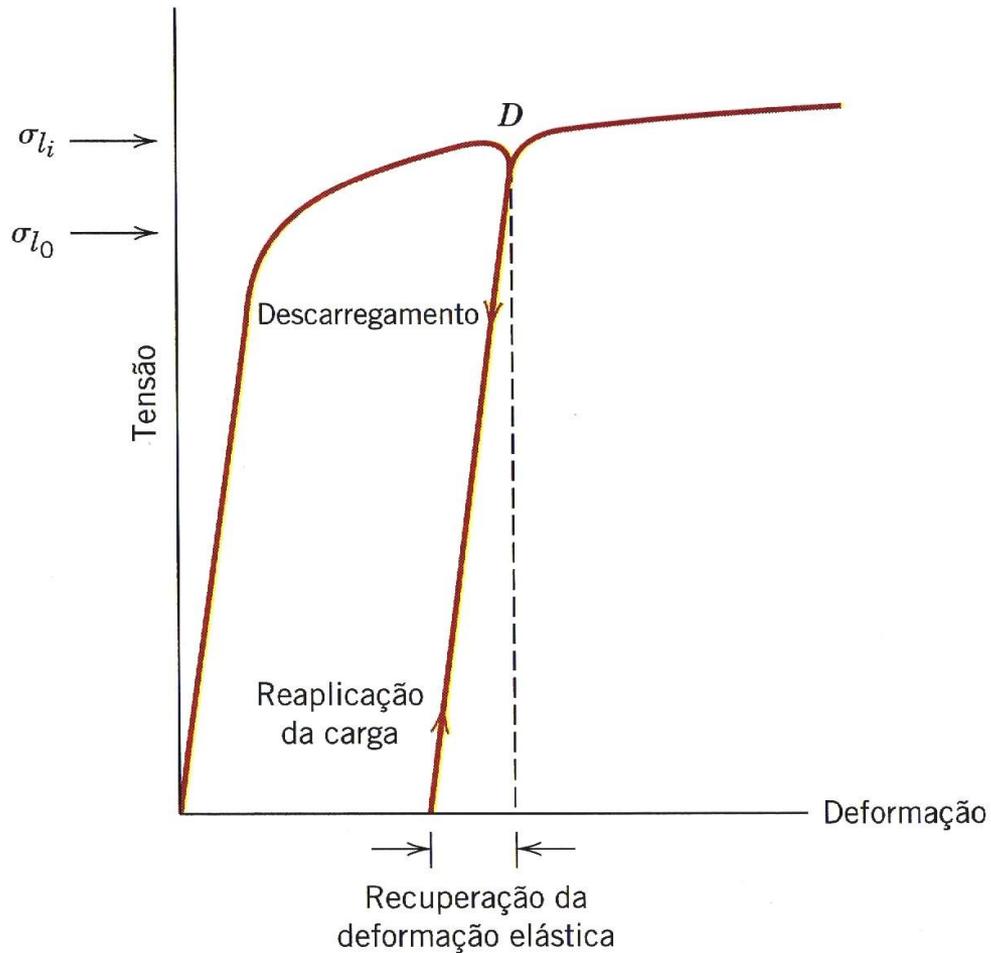
(c)

**Figura 7.16** Variação do (a) limite de resistência à tração, (b) limite de escoamento e (c) ductilidade (%AL) mostrando o aumento da resistência, em função do teor de níquel para ligas cobre-níquel.

# Encruamento

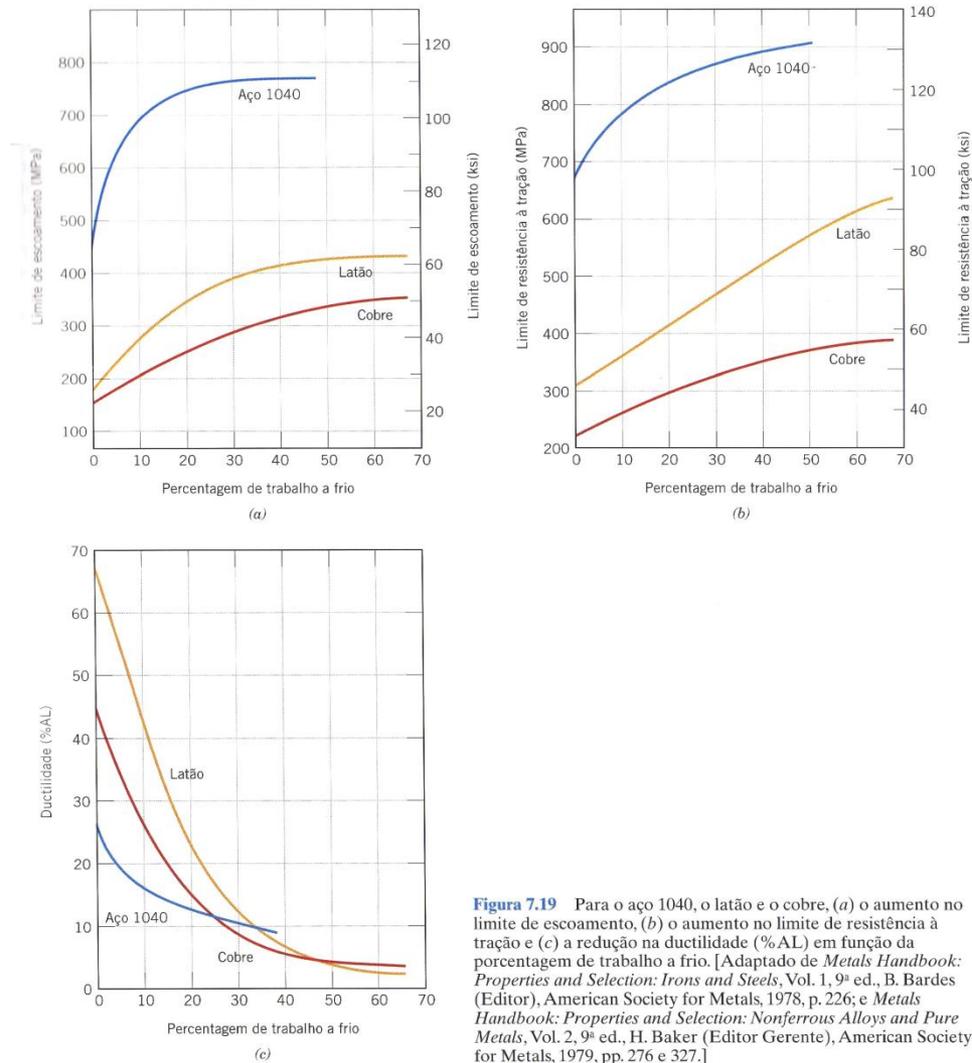
- É o fenômeno pelo qual um metal dúctil se torna mais duro e mais resistente a medida que é deformado plasticamente.
- Trabalho a frio.

# Encruamento



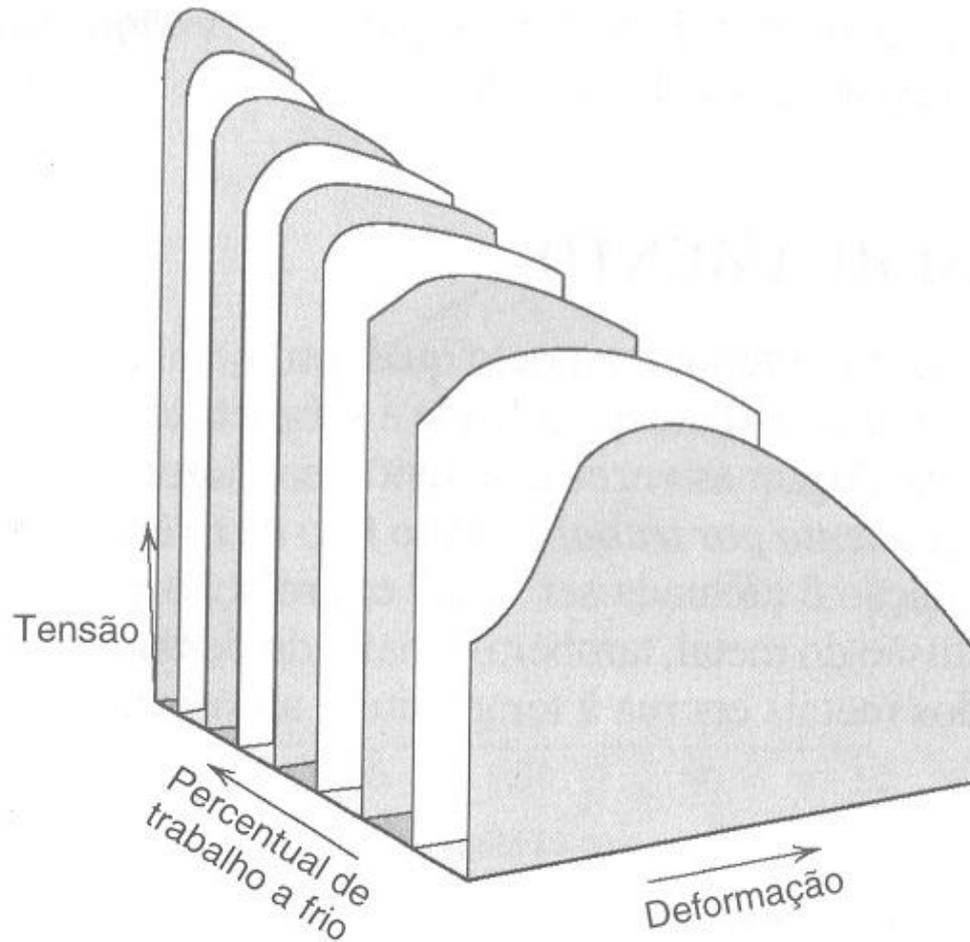
**Figura 6.17** Diagrama esquemático tensão-deformação em tração mostrando os fenômenos de recuperação da deformação elástica e de encruamento. O limite de escoamento inicial é designado como  $\sigma_{l_0}$ ;  $\sigma_{l_i}$  é o limite de escoamento após a liberação da carga no ponto  $D$  e a subsequente reaplicação da carga.

# Encruamento



**Figura 7.19** Para o aço 1040, o latão e o cobre, (a) o aumento no limite de escoamento, (b) o aumento no limite de resistência à tração e (c) a redução na ductilidade (%AL) em função da percentagem de trabalho a frio. [Adaptado de *Metals Handbook: Properties and Selection: Irons and Steels*, Vol. 1, 9ª ed., B. Bardes (Editor), American Society for Metals, 1978, p. 226; e *Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals*, Vol. 2, 9ª ed., H. Baker (Editor Gerente), American Society for Metals, 1979, pp. 276 e 327.]

# Encruamento



Influência do trabalho a frio sob o comportamento tensão-deformação.

# Tratamento Térmico (Recozimento)

1. Recuperação
2. Recristalização
3. Crescimento de Grão

# Tratamento Térmico (Recozimento)

## 1. Recuperação

- Aumento de temperatura.
- Parte da energia interna de deformação armazenada é liberada com o movimento das discordâncias, sem a ação de uma força externa, mas por DIFUSÃO.
- Redução no número de discordâncias.

# Tratamento Térmico (Recozimento)

## 2. Recristalização

- Formação de um novo conjunto de grãos livres de deformação => equiaxiais (dimensões aproximadamente iguais em todas as direções).
- Processo depende tanto do tempo quanto da temperatura.

# Tratamento Térmico (Recozimento)

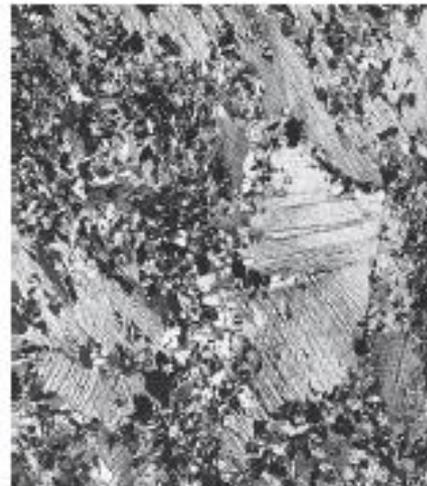
## 2. Recristalização



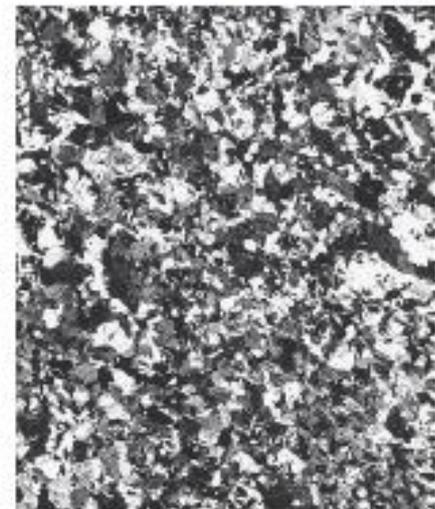
(a) 100  $\mu\text{m}$



(b) 100  $\mu\text{m}$



(c) 100  $\mu\text{m}$

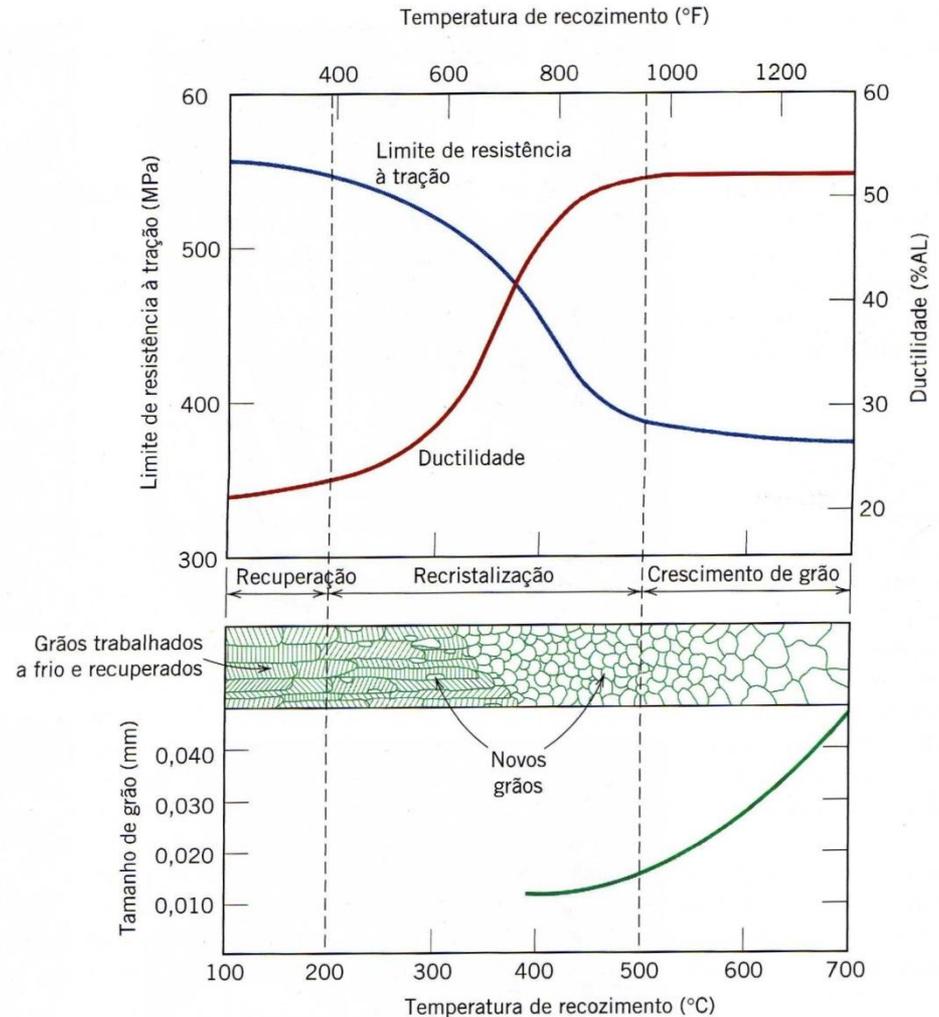


(d) 100  $\mu\text{m}$

# Tratamento Térmico (Recozimento)

## 2. Recristalização

Influência da temperatura de recozimento sobre o limite de resistência à tração e à ductilidade de um latão.



# Tratamento Térmico (Recozimento)

## 3. Crescimento do Grão

- Ocorre pela migração de contornos de grão.

