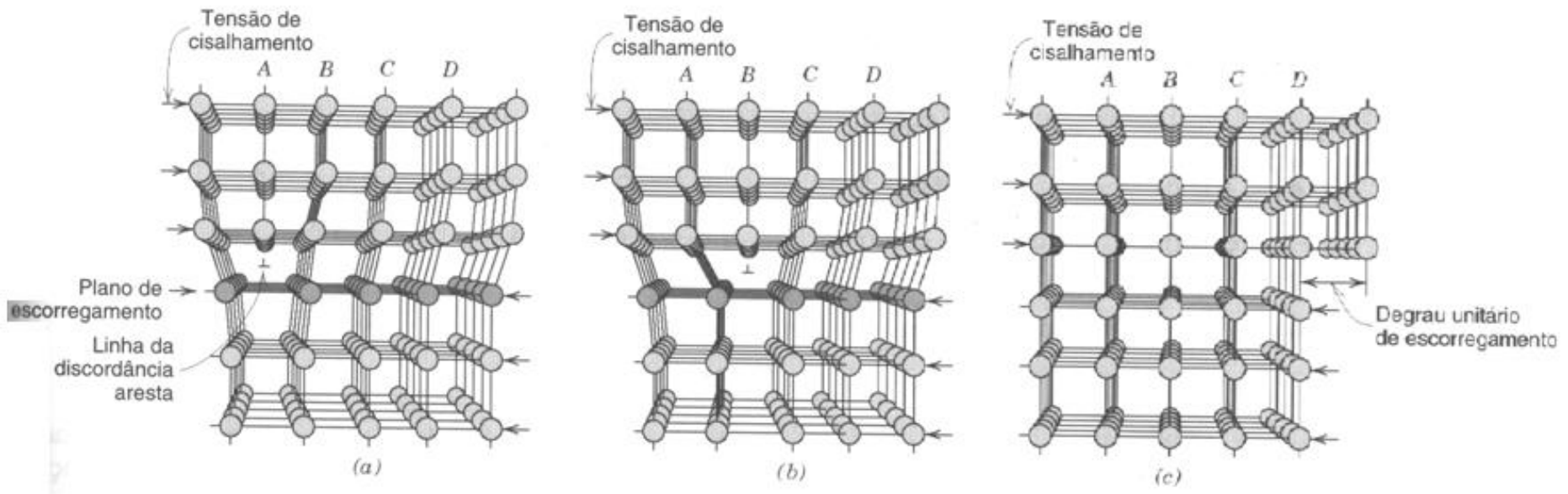


DISCORDÂNCIAS E MECANISMOS DE AUMENTO DA RESISTÊNCIA

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

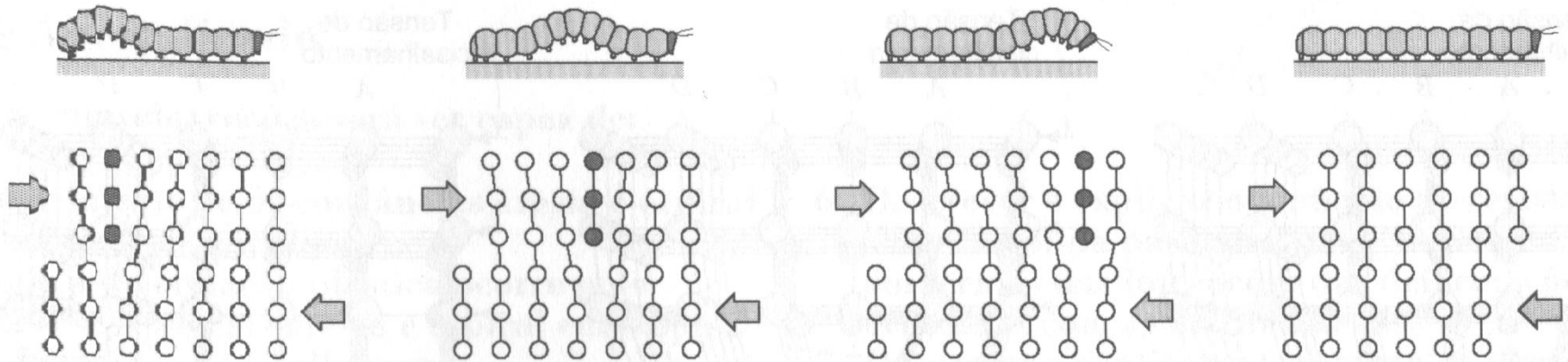
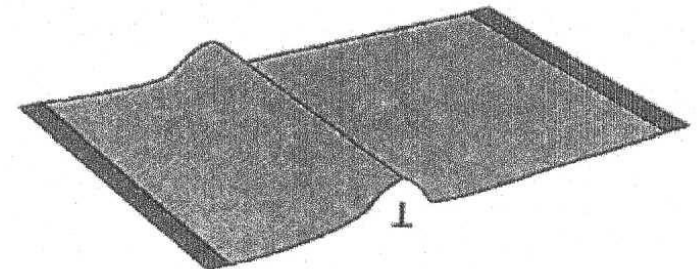
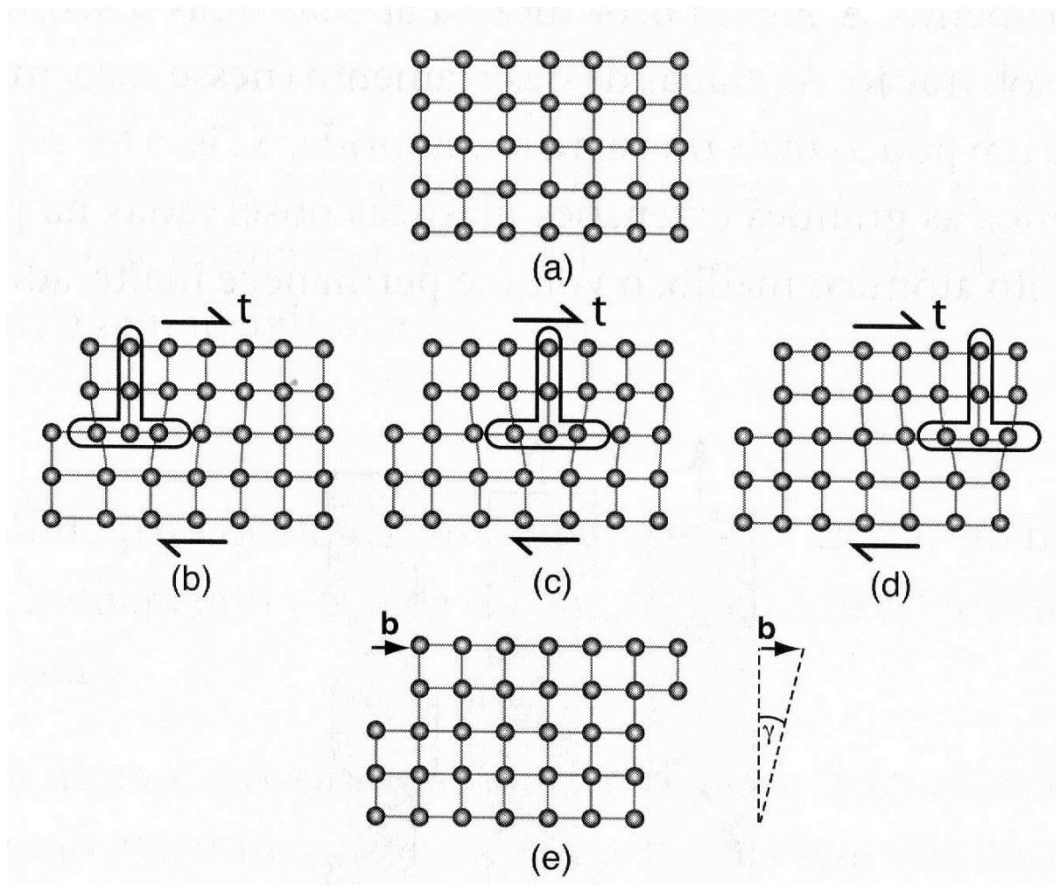


Fig. 7.3 Representação da analogia entre os movimentos de uma lagarta e de uma discordância.

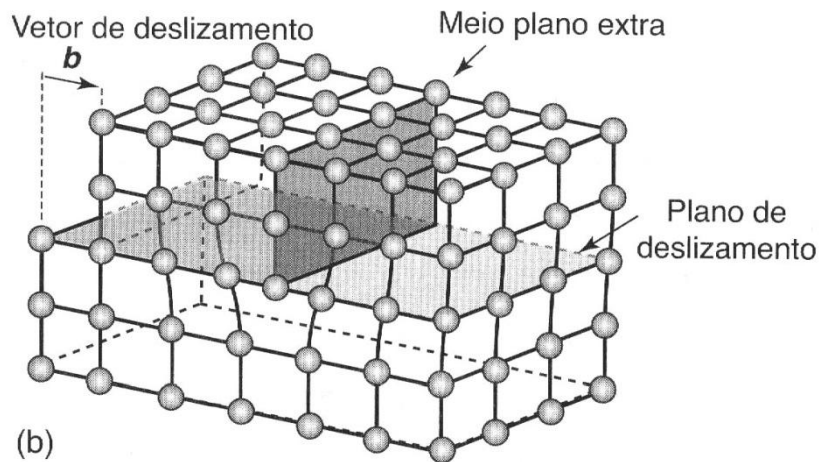
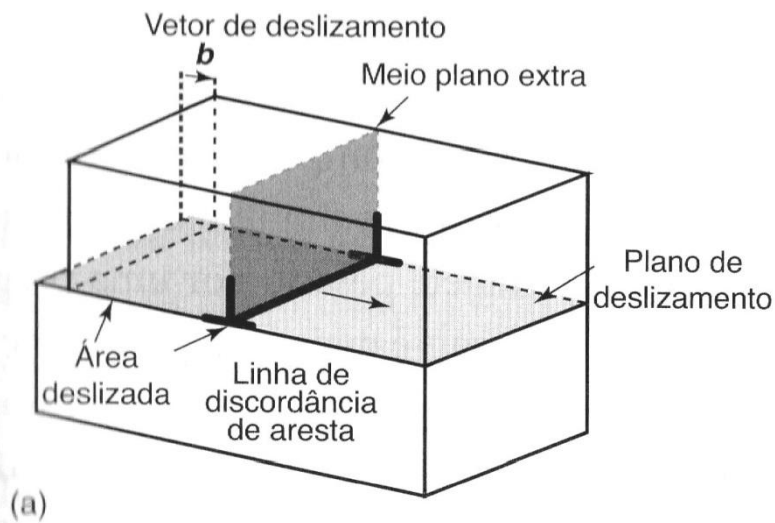
Deformação Plástica

- A presença de discordâncias favorecem a deformação plástica.



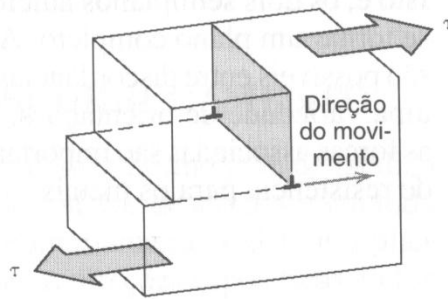
Deformação Plástica

Tensão de Cisalhamento

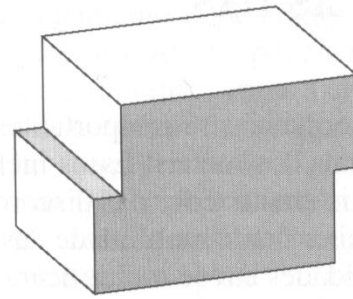


Deformação Plástica

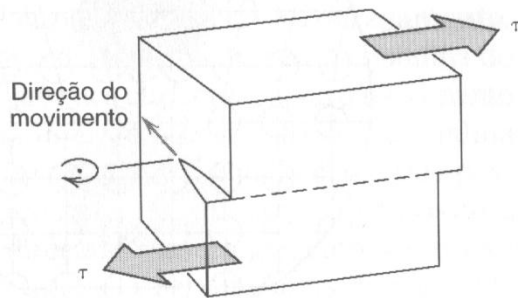
Escorregamento



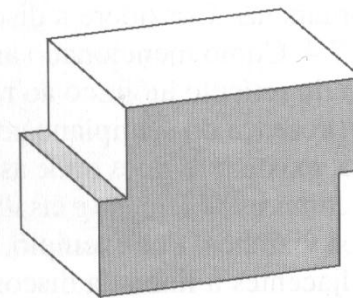
(a)



Discordância Aresta



(b)

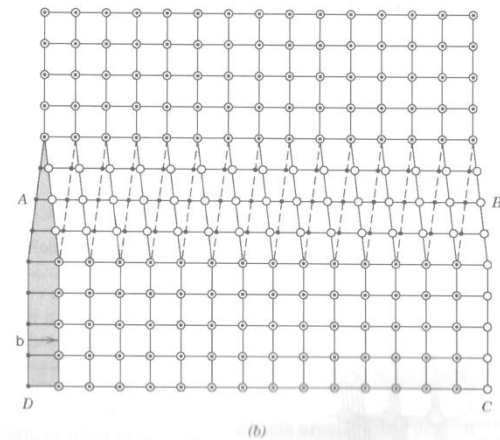
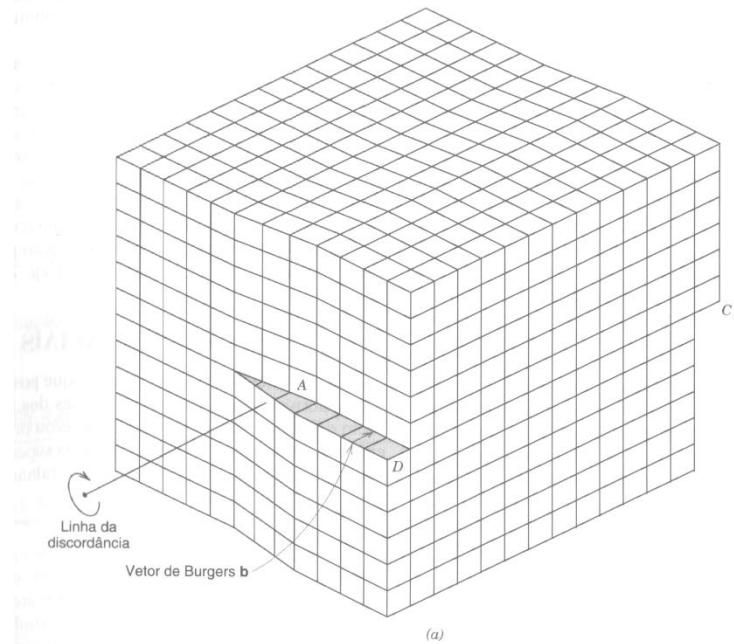


Discordância Espiral

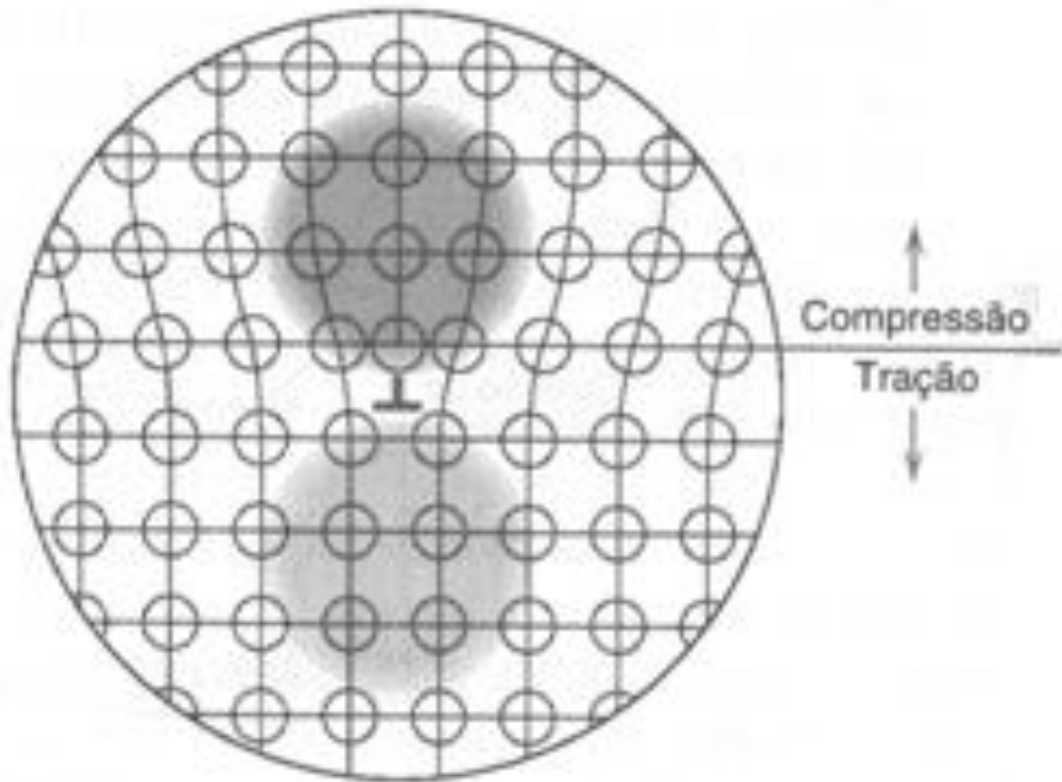
Direção do movimento perpendicular à direção da tensão

Defeitos Lineares

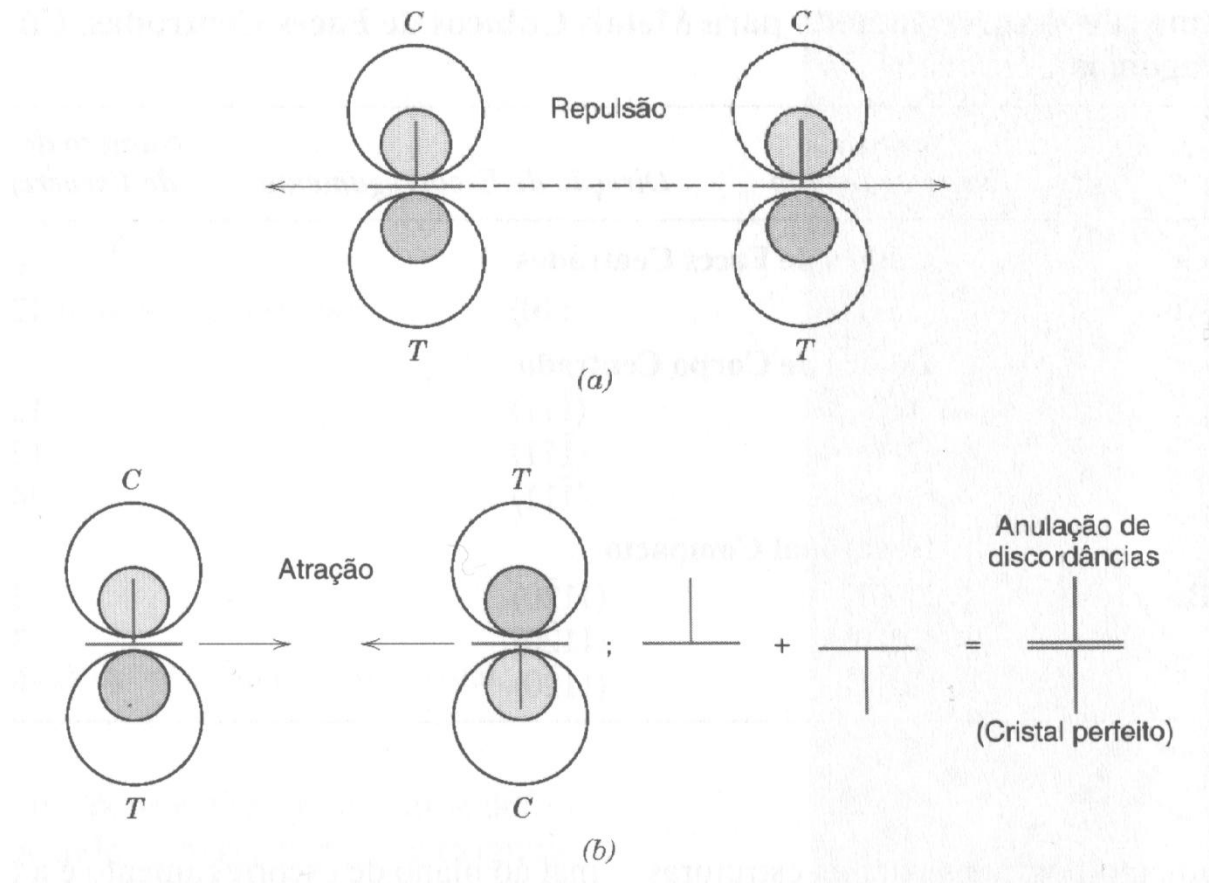
Discordância Espiral



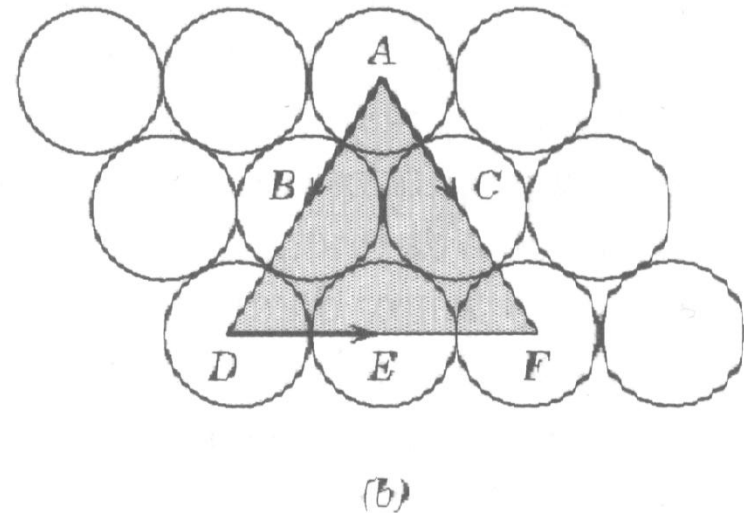
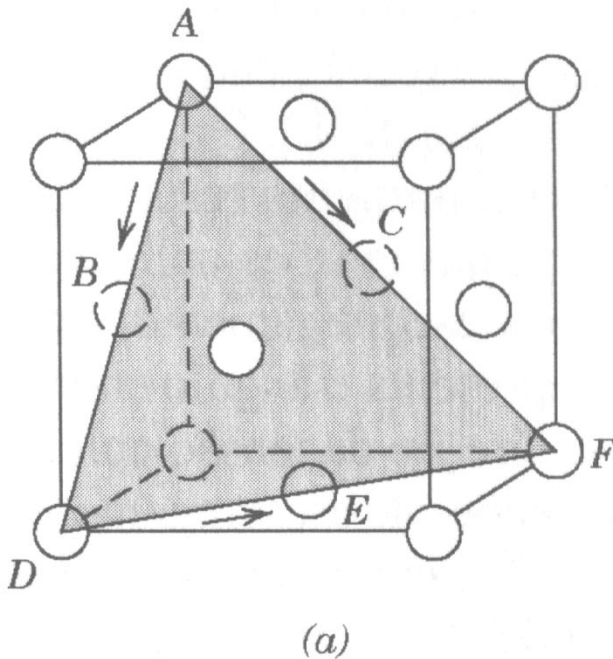
Características das Discordâncias



Características das Discordâncias



Características das Discordâncias



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

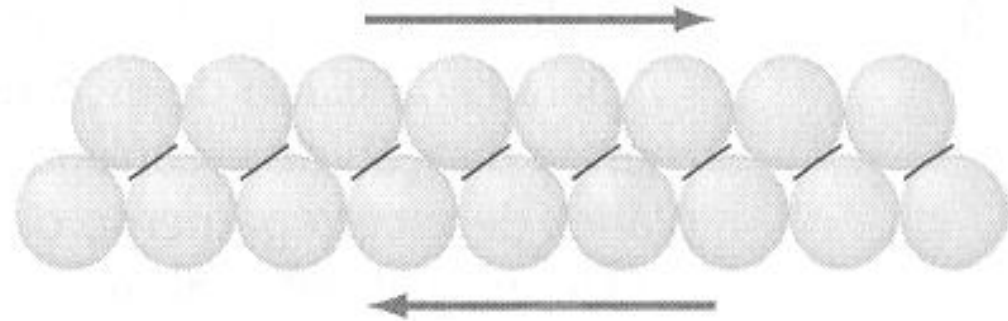
Direção mais densa de átomos.

Características das Discordâncias

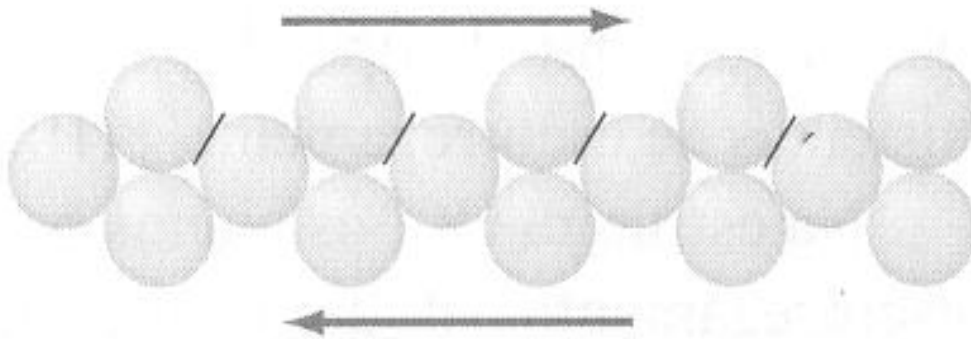
Table 7.1 Slip Systems for Face-Centered Cubic, Body-Centered Cubic, and Hexagonal Close-Packed Metals

<i>Metals</i>	<i>Slip Plane</i>	<i>Slip Direction</i>	<i>Number of Slip Systems</i>
	Face-Centered Cubic		
Cu, Al, Ni, Ag, Au	{111}	$(\bar{1}\bar{1}0)$	12
	Body-Centered Cubic		
α -Fe, W, Mo	{110}	$(\bar{1}11)$	12
α -Fe, W	{211}	(111)	12
α -Fe, K	{321}	$(\bar{1}11)$	24
	Hexagonal Close-Packed		
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)

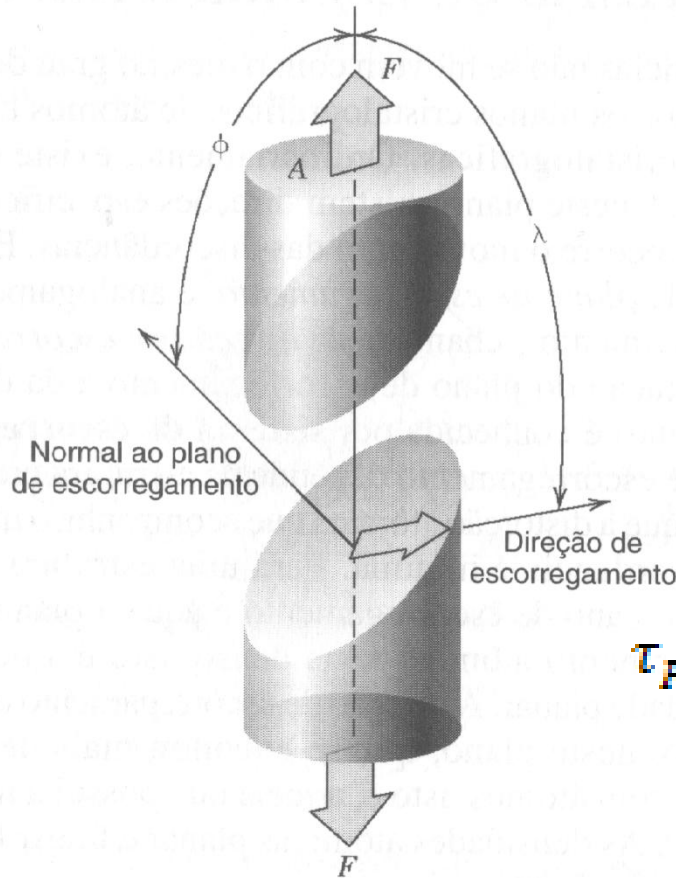
a) Plano Compacto

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



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

τ_R – tensão de cisalhamento resolvida

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

Escorregamento em Monocristais

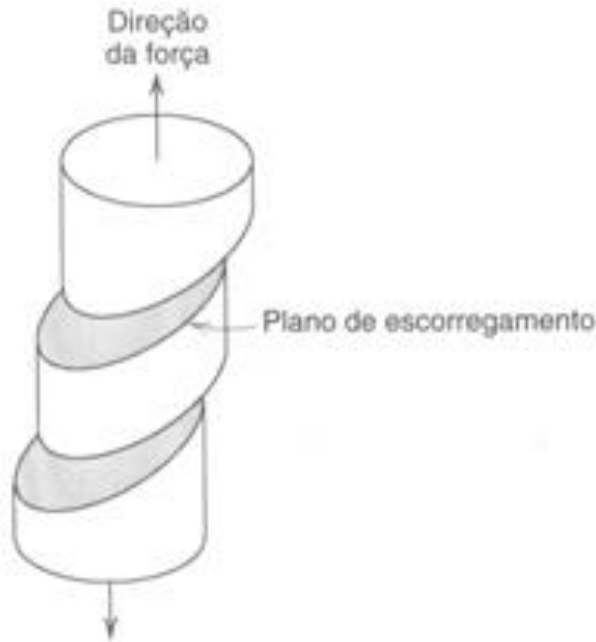


Fig. 7.8 Escorregamento macroscópico em um monocristal.

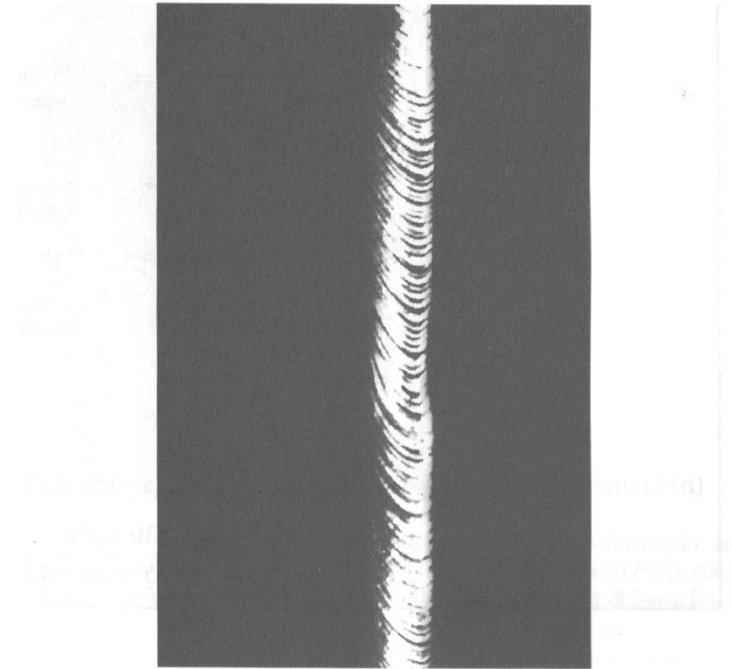


Fig. 7.9 Escorregamento em um monocristal de zinco. (De C. F. Elam, *The Distortion of Metal Crystals*, Oxford University Press, London, 1935.)

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

τ_{tcrc} = tensão de cisalhamento resolvida crítica

Deformação Plástica de Materiais Policristalinos

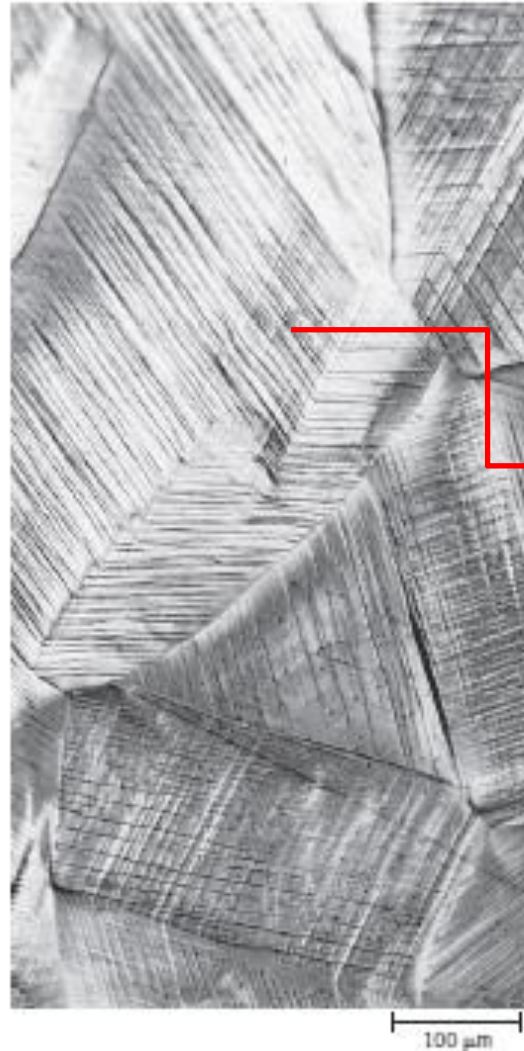


Figure 7.10 Slip lines on the surface of a polycrystalline specimen of copper that was polished and subsequently deformed. 173 \times . [Photomicrograph courtesy of C. Brady, National Bureau of Standards (now the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD).]

Linhas de Escorregamento

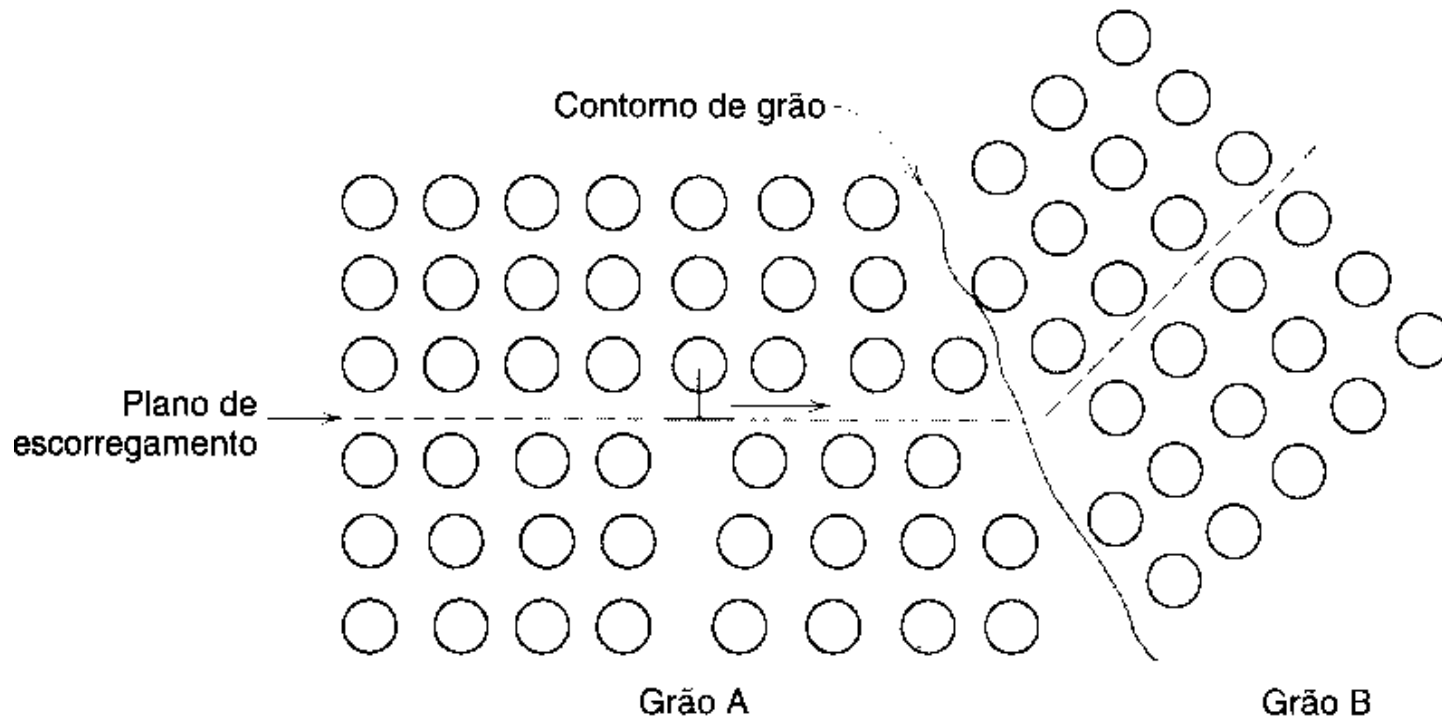
Mecanismo do Aumento de Resistência em Metais

- 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

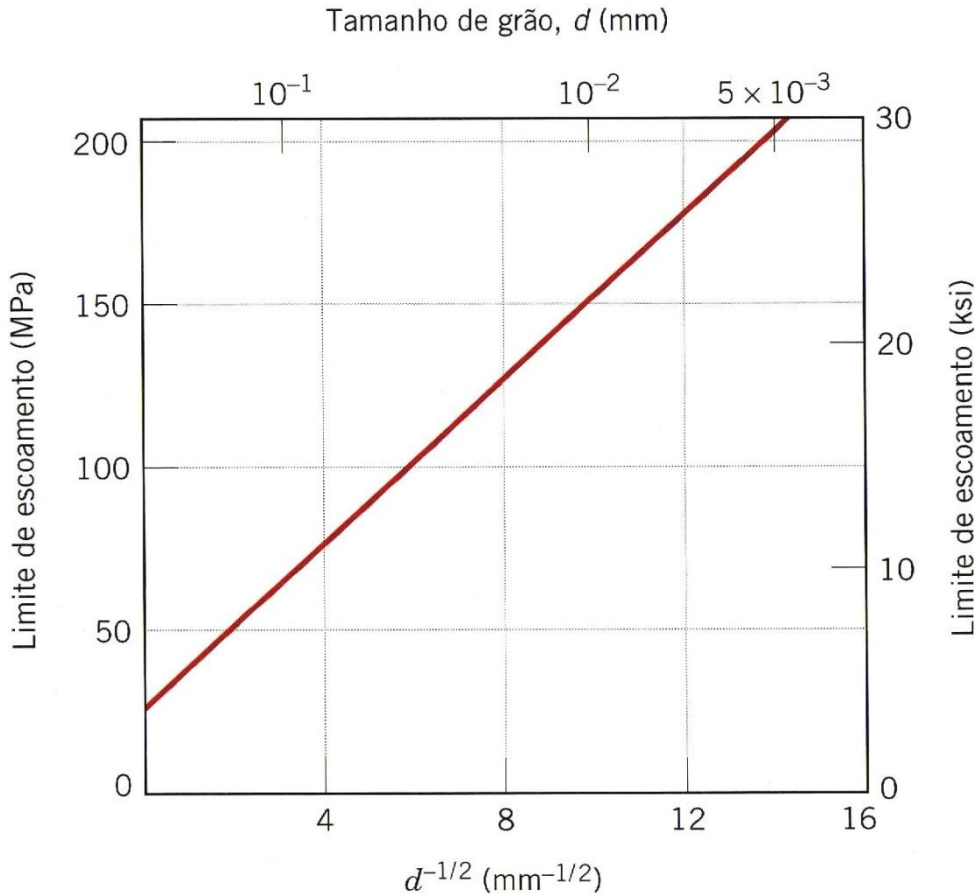
- O contorno de grão atua como uma barreira ao movimento das discordâncias.
 - Normalmente, os grão apresentam orientações diferentes.
 - Desordenamento atômico na região de contorno de grão.
- Grão menores possuem uma maior área total de contornos de grão para dificultar o movimento das discordâncias.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

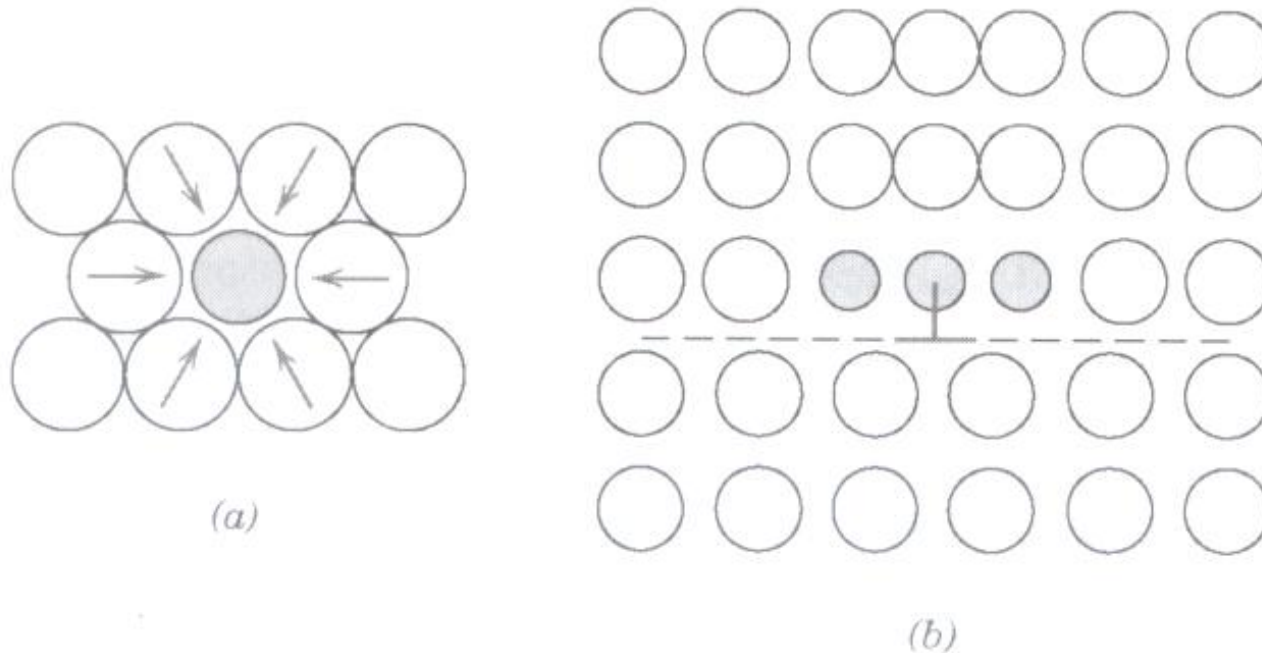


Fig. 7.17 (a) Representação das deformações da rede por tração impostas sobre átomos hospedeiros por um átomo de impureza substitucional de menor tamanho. (b) Possíveis localizações de átomos de impureza menores em relação a uma discordância aresta, de modo que existe um cancelamento parcial das deformações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

Aumento de Resistência por Solução Sólida

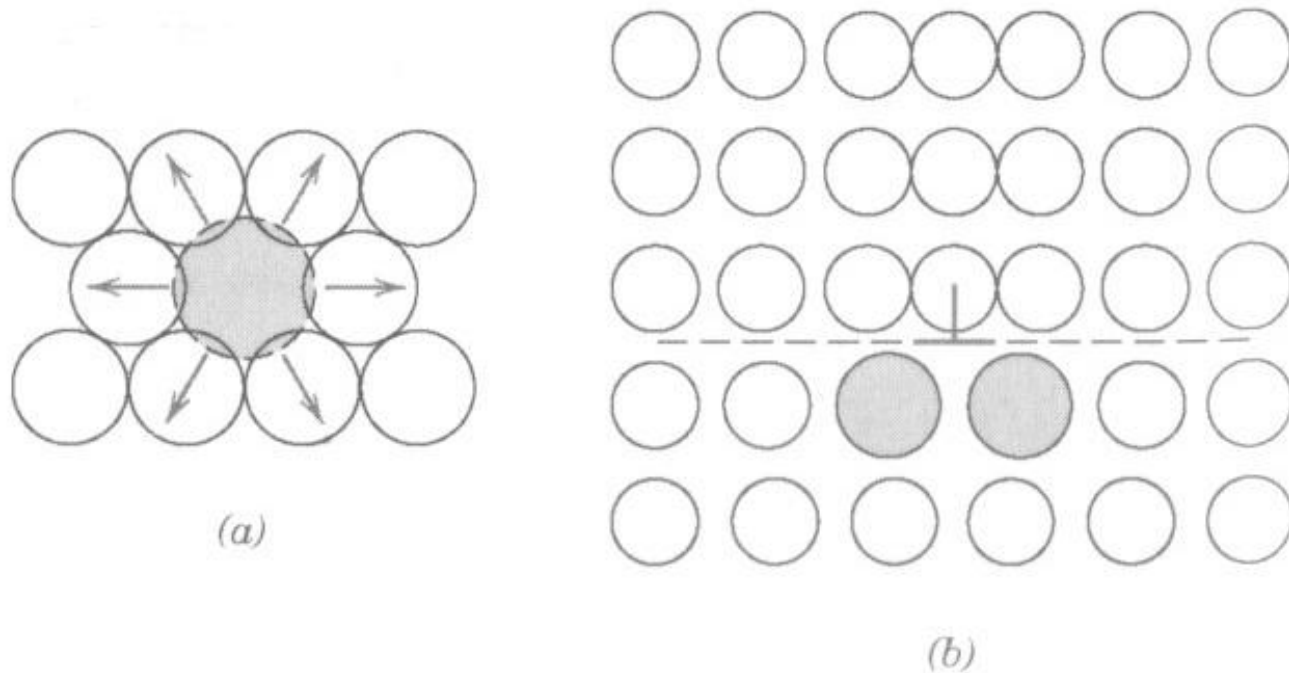
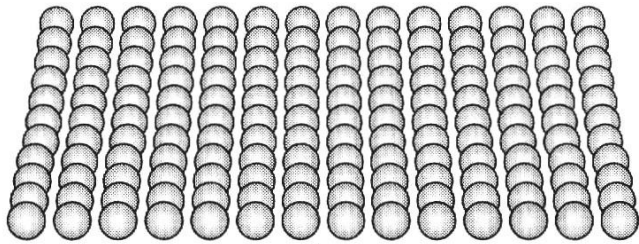
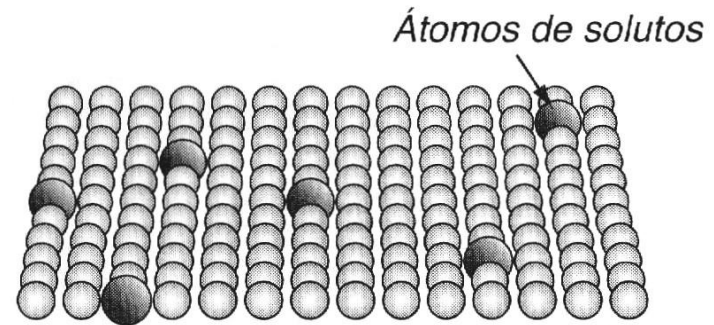


Fig. 7.18 (a) Representação das deformações compressivas impostas sobre átomos hospedeiros por um átomo de impureza substitucional maior tamanho. (b) Possíveis localizações de átomos de impureza na região de compressão em relação a uma discordância aresta, de modo que existe um relaxamento parcial das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

Aumento de Resistência por Solução Sólida

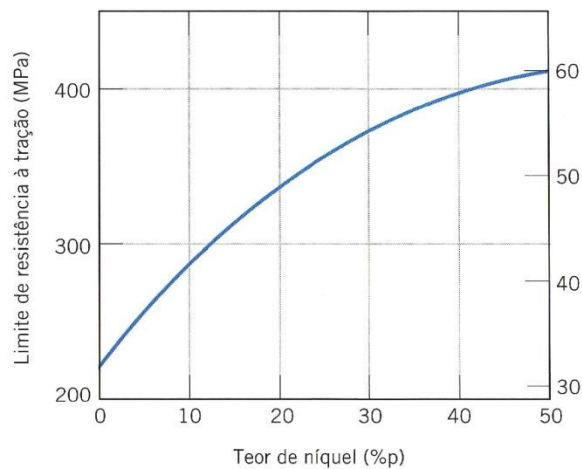


(a) Reticulado perfeito, resistência f_i

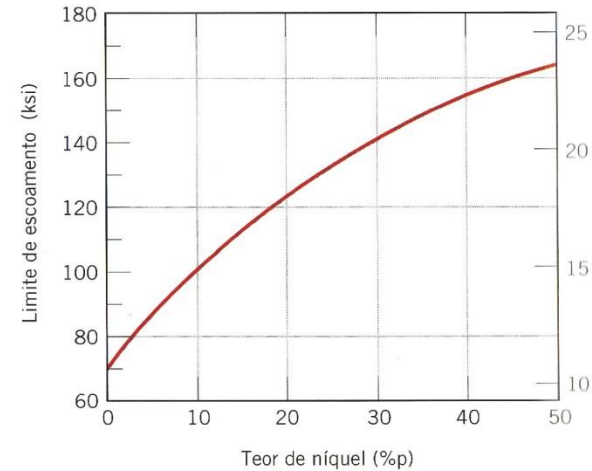


(b) Endurecimento por solução, resistência f_{ss}

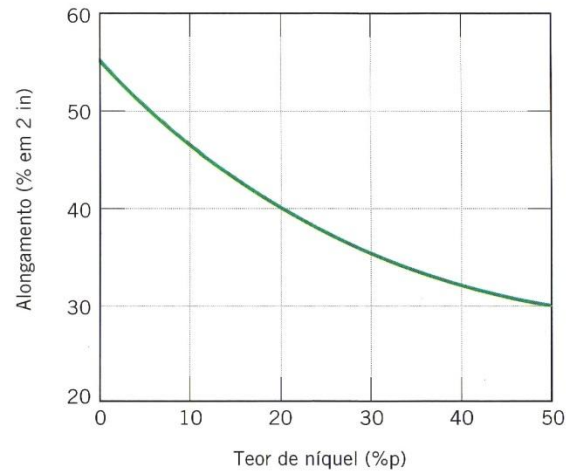
Aumento de Resistência por Solução Sólida



(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

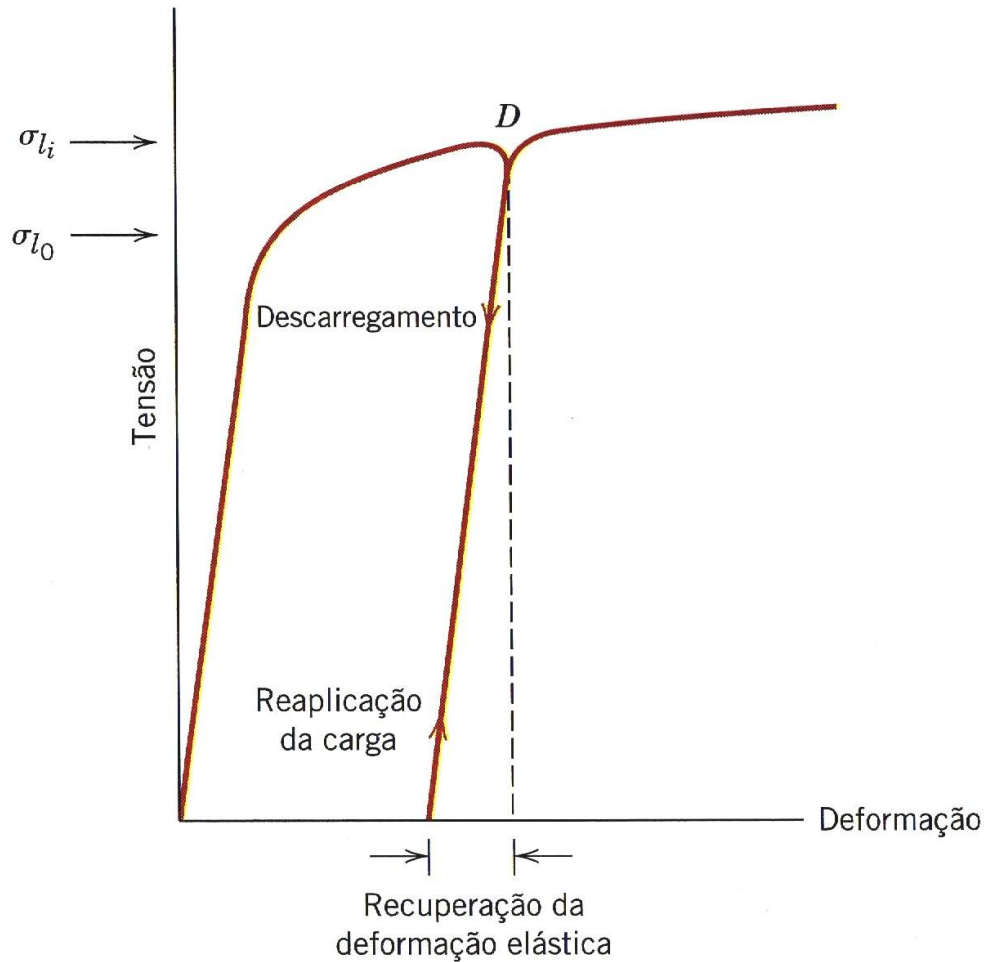


Figura 6.17 Diagrama esquemático tensão-deformação em tração mostrando os fenômenos de recuperação da deformação elástica e de encruamento. O limite de escoamento inicial é designado como σ_{l_0} ; σ_{l_i} é o limite de escoamento após a liberação da carga no ponto D e a subsequente reaplicação da carga.

Encruamento

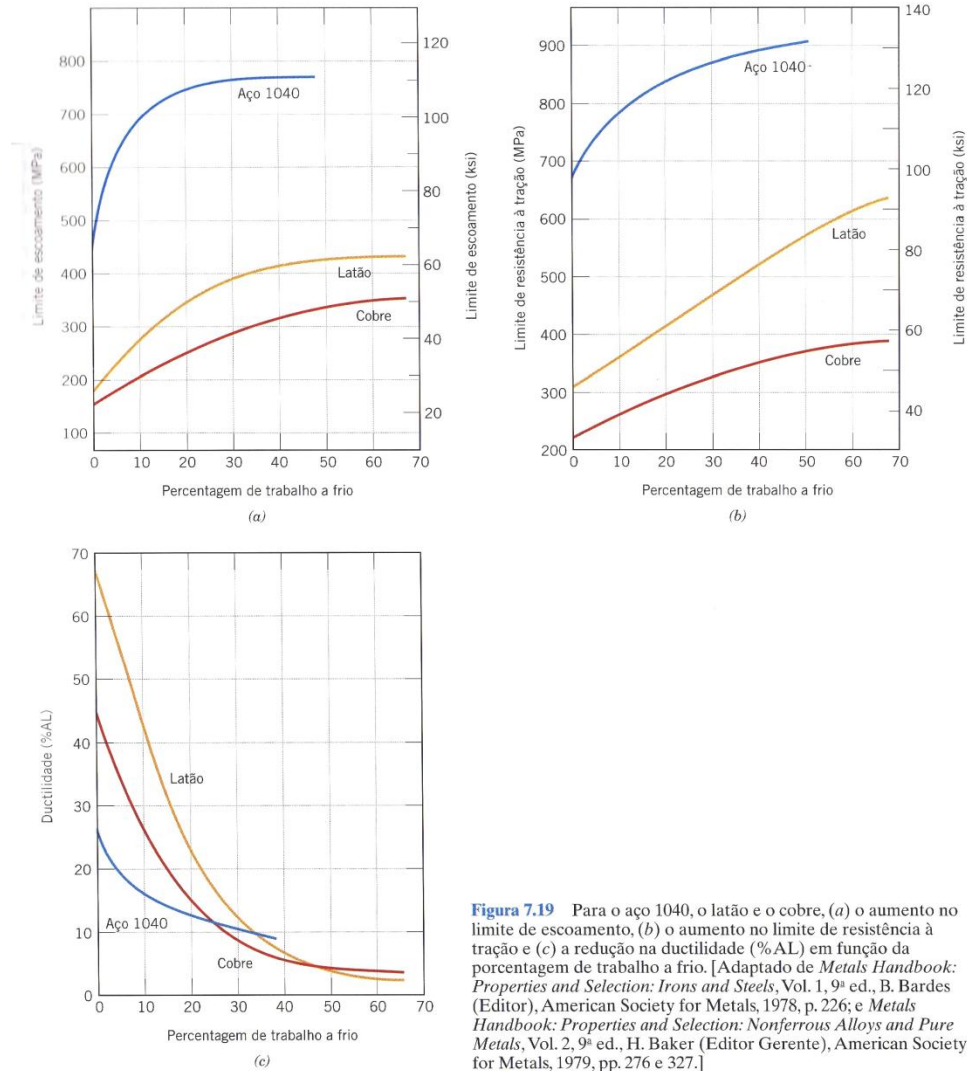
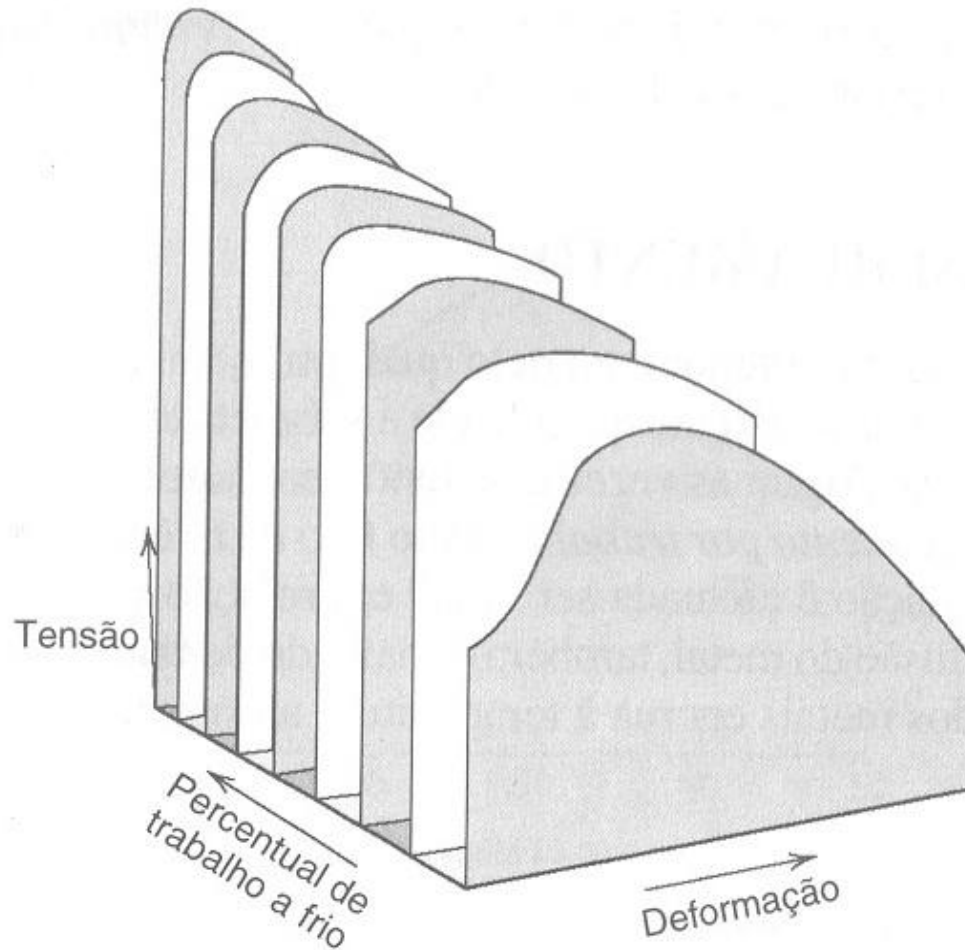


Figura 7.19 Para o aço 1040, o latão e o cobre, (a) o aumento no limite de escoamento, (b) o aumento no limite de resistência à tração e (c) a redução na ductilidade (%AL) em função da percentagem de trabalho a frio. [Adaptado de *Metals Handbook: Properties and Selection: Irons and Steels*, Vol. 1, 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



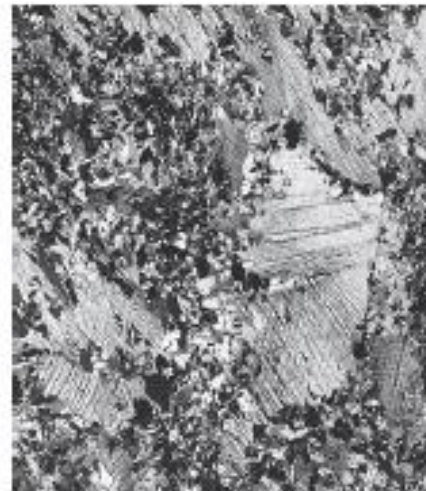
(a)

100 μm



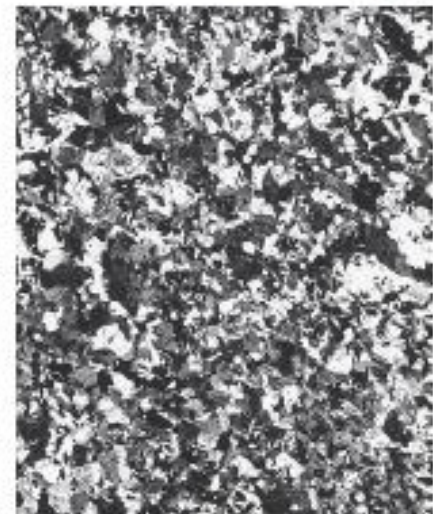
(b)

100 μm



(c)

100 μm



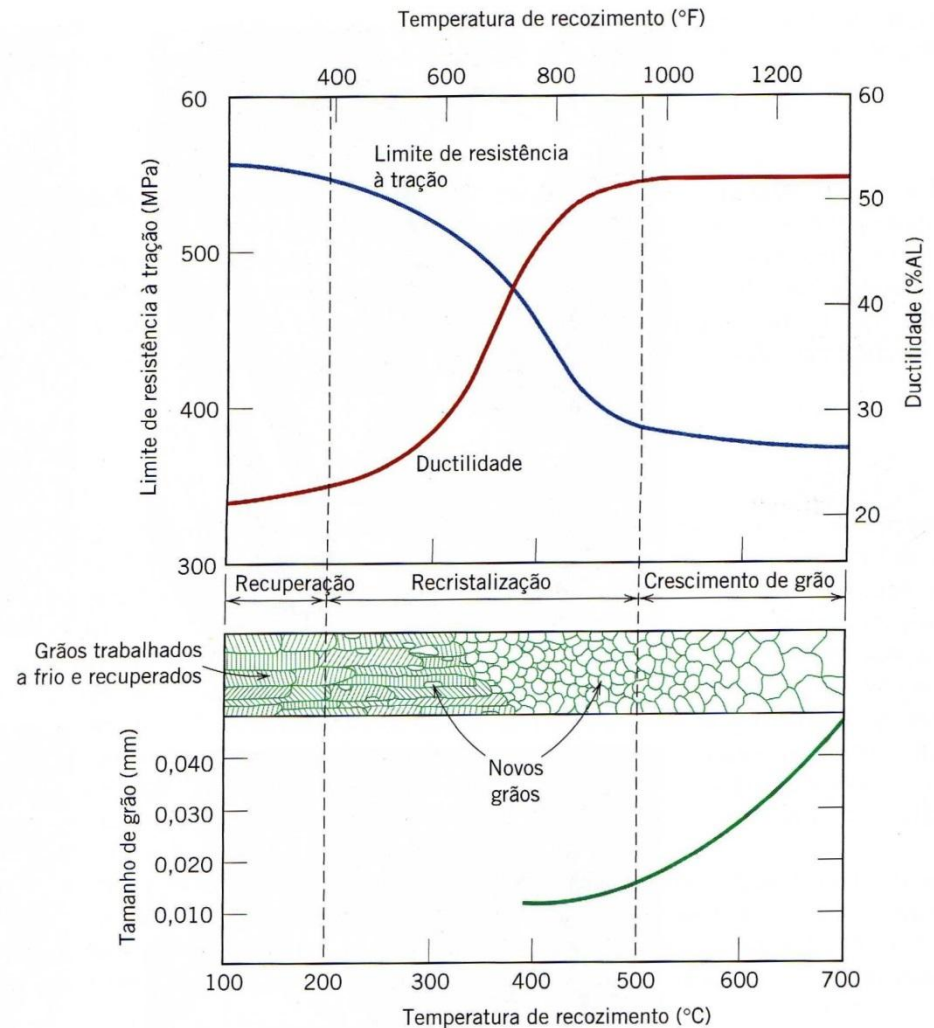
(d)

100 μm

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.

