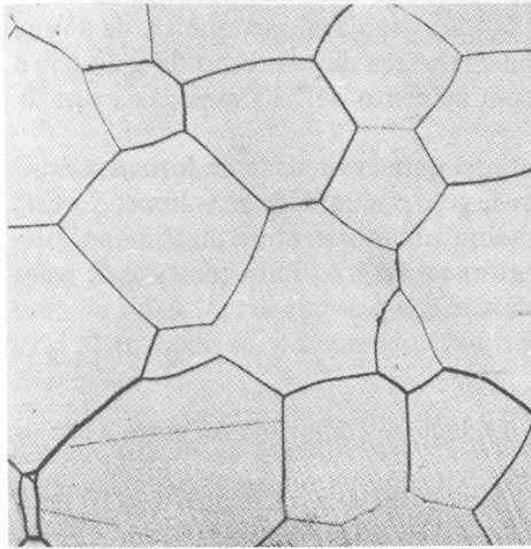
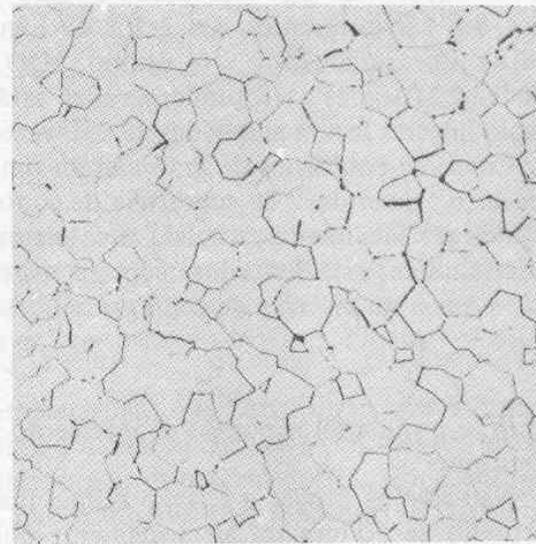


## 5.4. EXAME MICROSCÓPICO

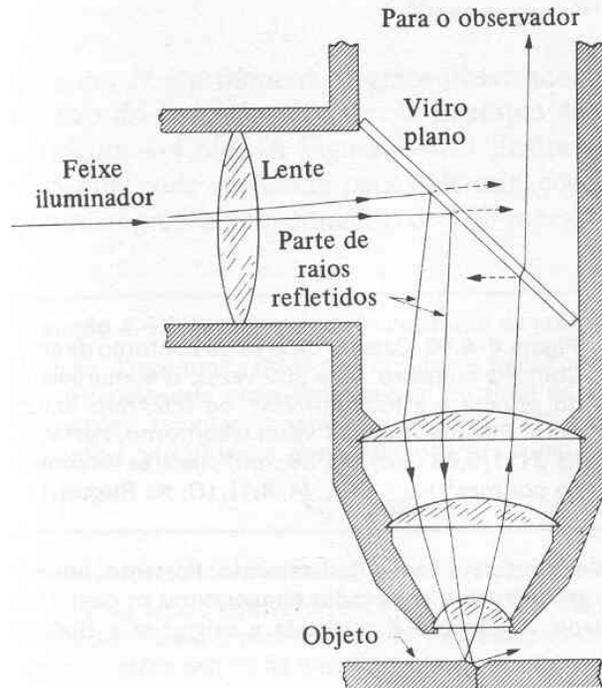
- Quando um metal atacado quimicamente é observado ao microscópio pode-se localizar os contornos de grãos.
- Primeiramente o metal é cuidadosamente polido, de forma a se obter uma superfície plana e espelhada. Em seguida ele é atacado quimicamente por um curto período de tempo.
- Os átomos na área dos contornos de grãos serão removidos mais facilmente que os outros átomos e deixarão uma linha que pode ser vista com o microscópio.
- O contorno de grão atacado não atua como um espelho perfeito como acontece com o restante do grão.



(a)

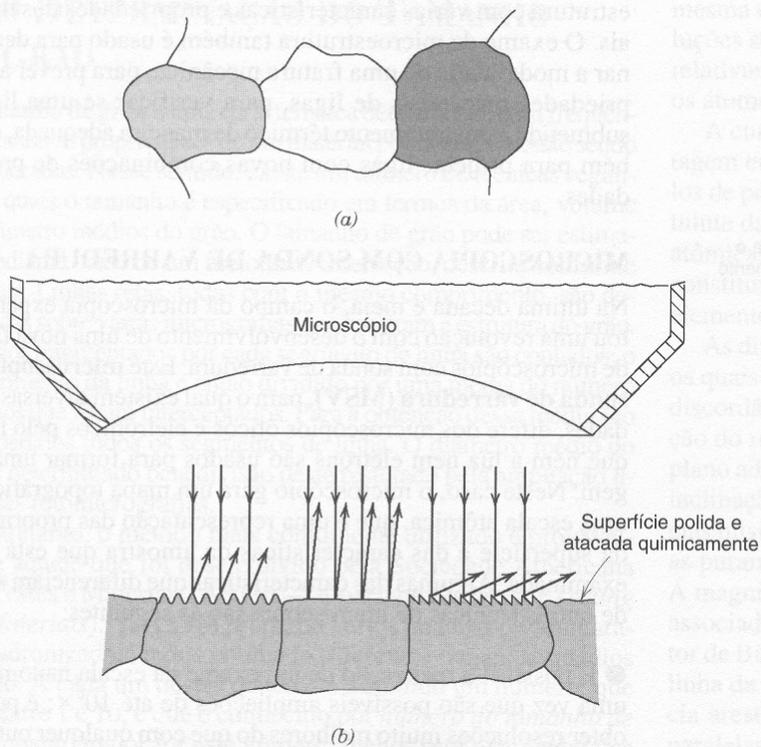


(b)

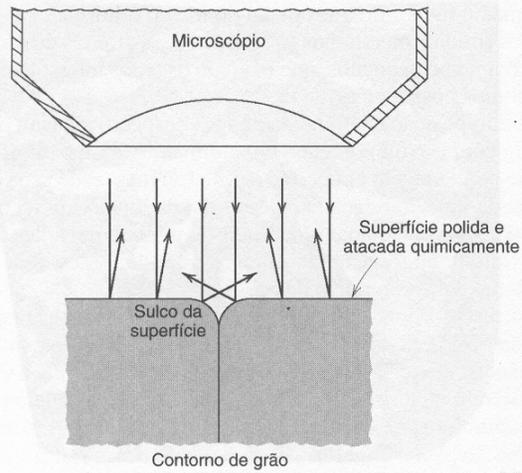


**Figura 4-4.8** Contornos de grão. (a) Molibdênio (250 X) (O. K. Riegger). (b) Periclásio de alta densidade, MgO (250 X) R. E. Gardner and G. W. Robinson, Jr., *J. American Ceram. Soc.*

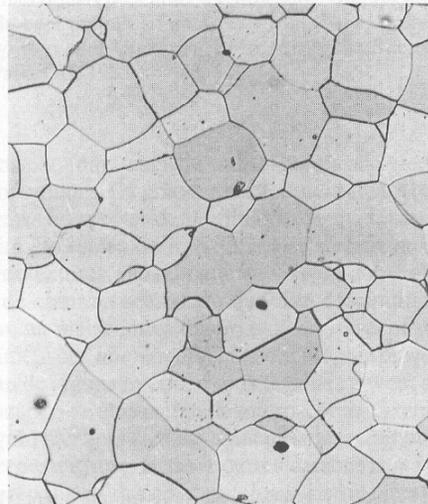
**Figura 4-4.9** Observação do contorno de grão. O metal foi polido e atacado. O contorno corroído não reflete luz através do microscópio. (Reproduzido por permissão de B. Rogers, *The Nature of Metals*, 2ª ed., American Society for Metals, and Iowa State University Press, Capítulo 2.)



**Fig. 4.11** (a) Grãos polidos e atacados quimicamente da forma como eles aparecem quando são vistos através de um microscópio ótico. (b) Seção feita através desses grãos mostrando como as características do ataque químico e a textura da superfície resultante variam de grão para grão devido a diferenças na orientação cristalográfica. (c) Fotomicrografia de uma amostra de latão policristalino. Ampliação de 60 $\times$ . (Esta fotomicrografia é uma cortesia de J. E. Burke, General Electric Co.)



(a)



(b)

**Fig. 4.12** (a) Seção de um contorno de grão e seu sulco de superfície, que foi produzido através de ataque químico. As características de reflexão da luz na vizinhança do sulco também estão mostradas. (b) Fotomicrografia da superfície de uma amostra de uma liga ferro-cromo policristalina, polida e atacada quimicamente, onde os contornos dos grãos aparecem escuros. Ampliação de 100×. (Esta fotomicrografia é uma cortesia de L. C. Smith e C. Brady, the National Bureau of Standards, Washington, DC.)

# FRACTOGRAFIAS

FRATURA  
DÚCTIL

FRATURA  
FRÁGIL

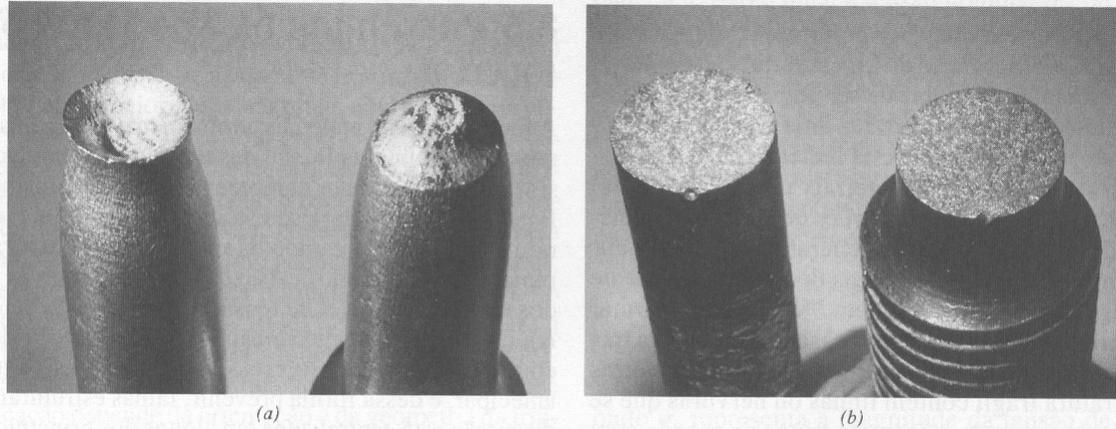


Fig. 8.3 (a) Fratura do tipo taça e cone no alumínio. (b) Fratura frágil em um aço doce.

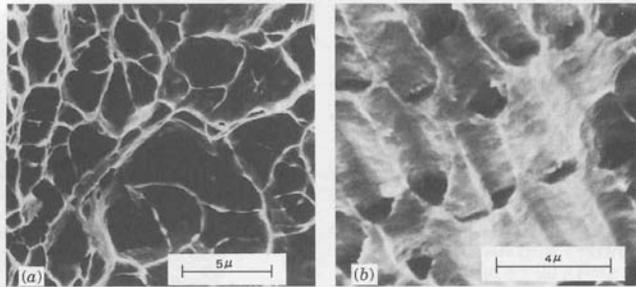


Fig. 8.4 (a) Fractografia eletrônica de varredura mostrando microcavidades esféricas características de uma fratura dúctil que resulta de cargas de tração uniaxiais. 3300X. (b) Fractografia eletrônica de varredura mostrando microcavidades com formato parabólico características de uma fratura dúctil que resulta da aplicação de uma carga cisalhante. 5000X. (De R. W. Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, 3rd edition. Copyright © 1989 de John Wiley & Sons, New York. Reimpresso sob permissão de John Wiley & Sons, Inc.)

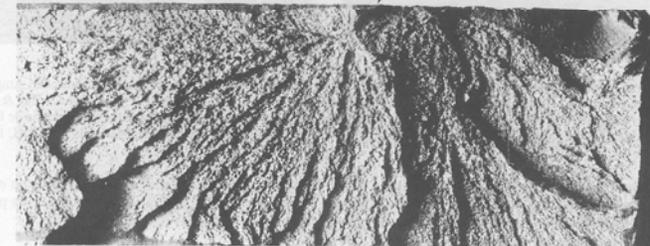
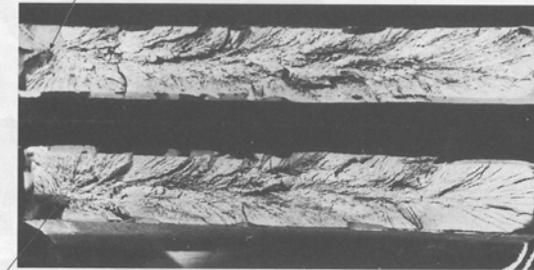
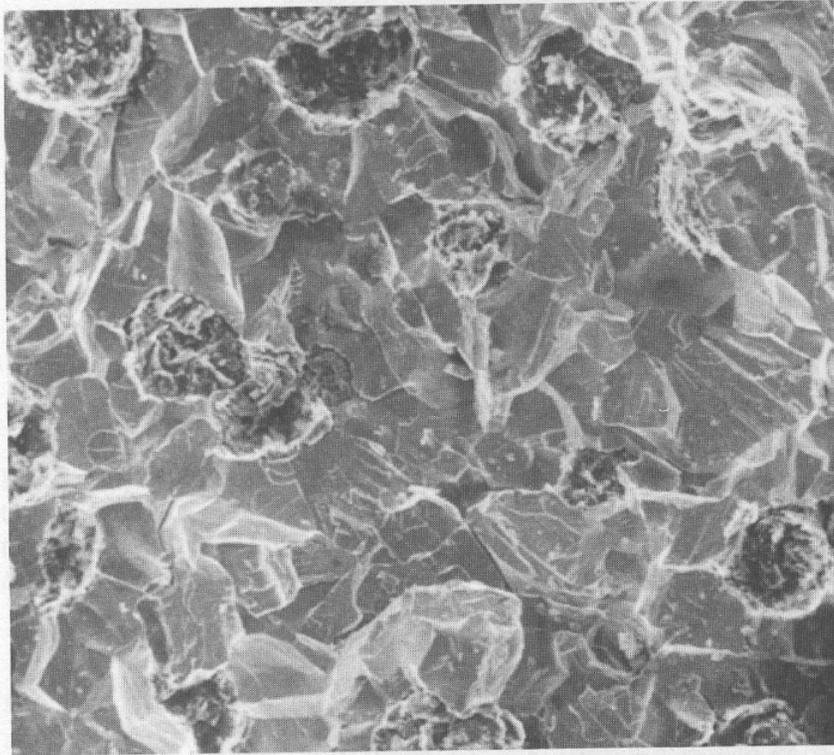


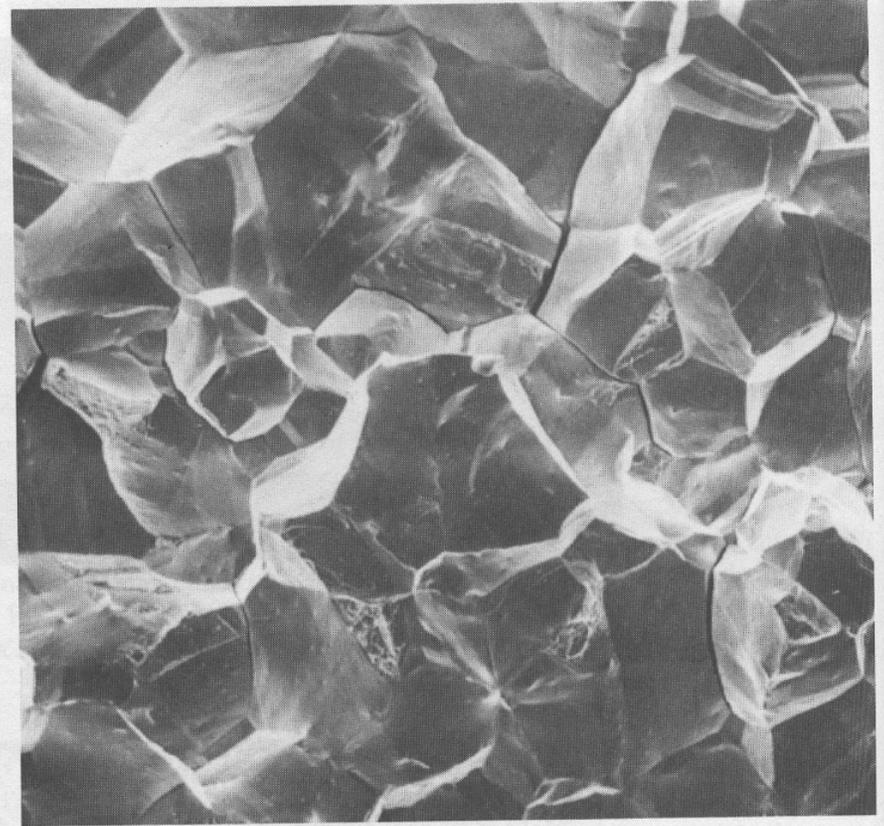
Fig. 8.5 (a) Fotografia mostrando "marcas de sargento" em forma de "V" características de uma fratura frágil. As setas indicam a origem da trinca. Aproximadamente em tamanho real. (De R. W. Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, 3rd edition. Copyright © 1989 de John Wiley & Sons, New York. Reimpresso sob permissão de John Wiley & Sons, Inc. A fotografia é uma cortesia de Roger Slutter, Lehigh University.) (b) Fotografia de uma superfície de fratura frágil mostrando nervuras radiais em formato de leque. As setas indicam a origem da trinca. Aumento de aproximadamente 2X. (Reproduzido com permissão de D. J. Wolpi, *Understanding How Components Fail*, American Society for Metals, Materials Park, OH, 1985.)

## Fratura transgranular



(a)

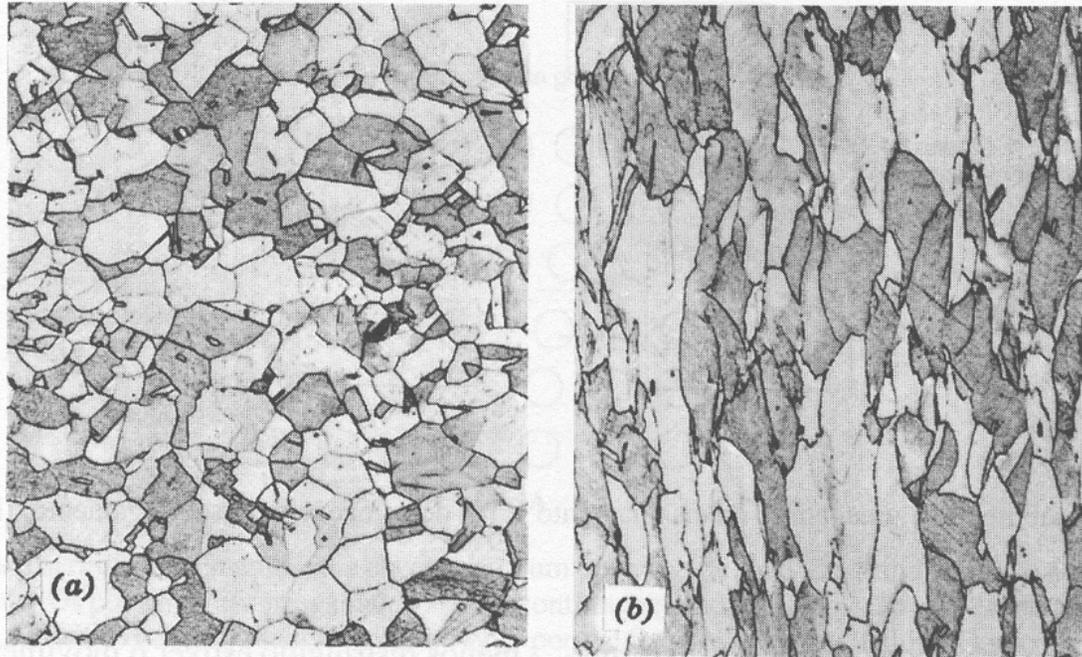
## Fratura intergranular



(b)

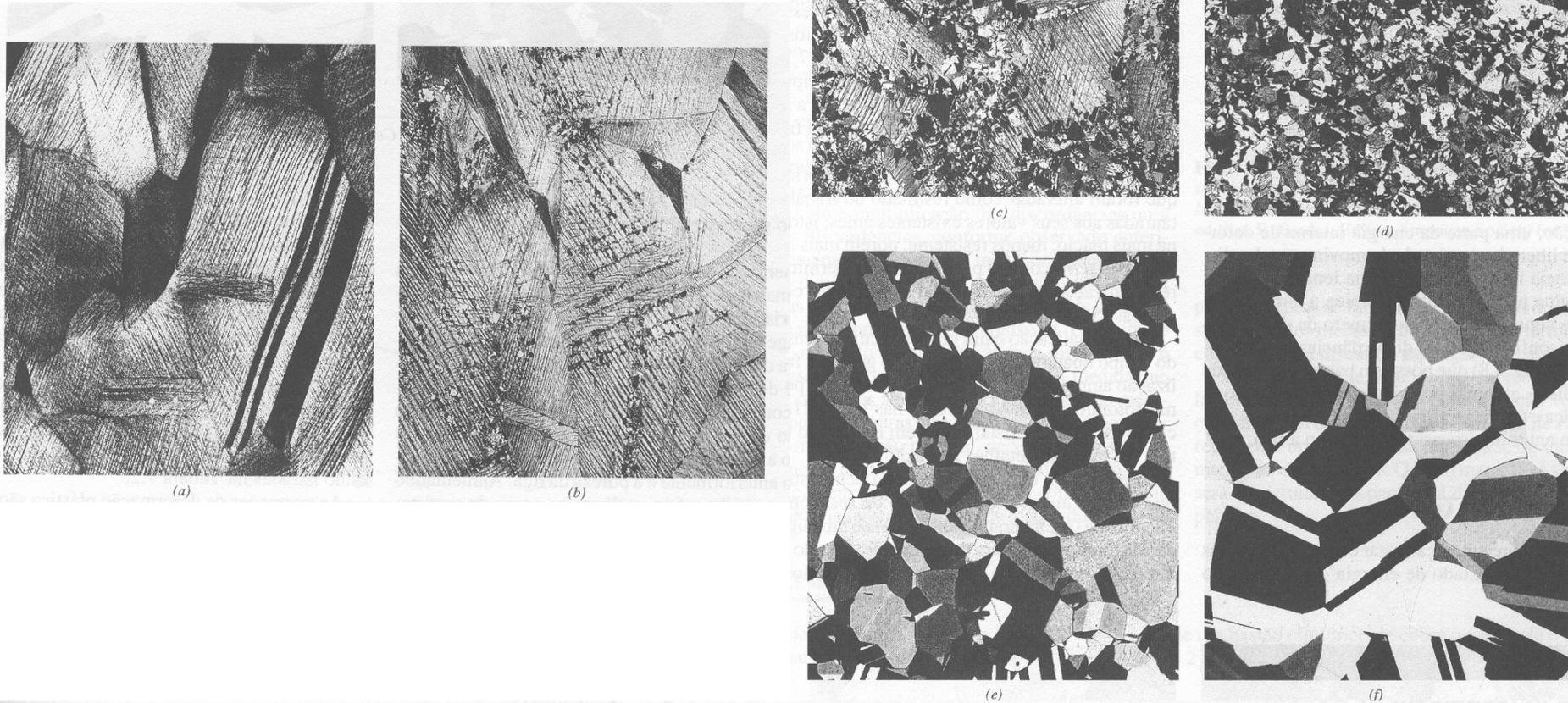
**Fig. 8.6** (a) Fractografia eletrônica de varredura de ferro fundido dúctil mostrando uma superfície de fratura transgranular. Ampliação desconhecida. (De V. J. Colangelo e F. A. Heiser, *Analysis of Metallurgical Failures*, 2nd edition. Copyright © 1987 de John Wiley & Sons, New York. Reimpresso sob permissão de John Wiley & Sons, Inc.) (b) Fractografia eletrônica de varredura mostrando uma superfície de fratura intergranular. 50×. (Reproduzido com permissão de *ASM Handbook*, Vol. 12, *Fractography*, ASM International, Materials Park, OH, 1987.)

# DEFORMAÇÃO MECÂNICA

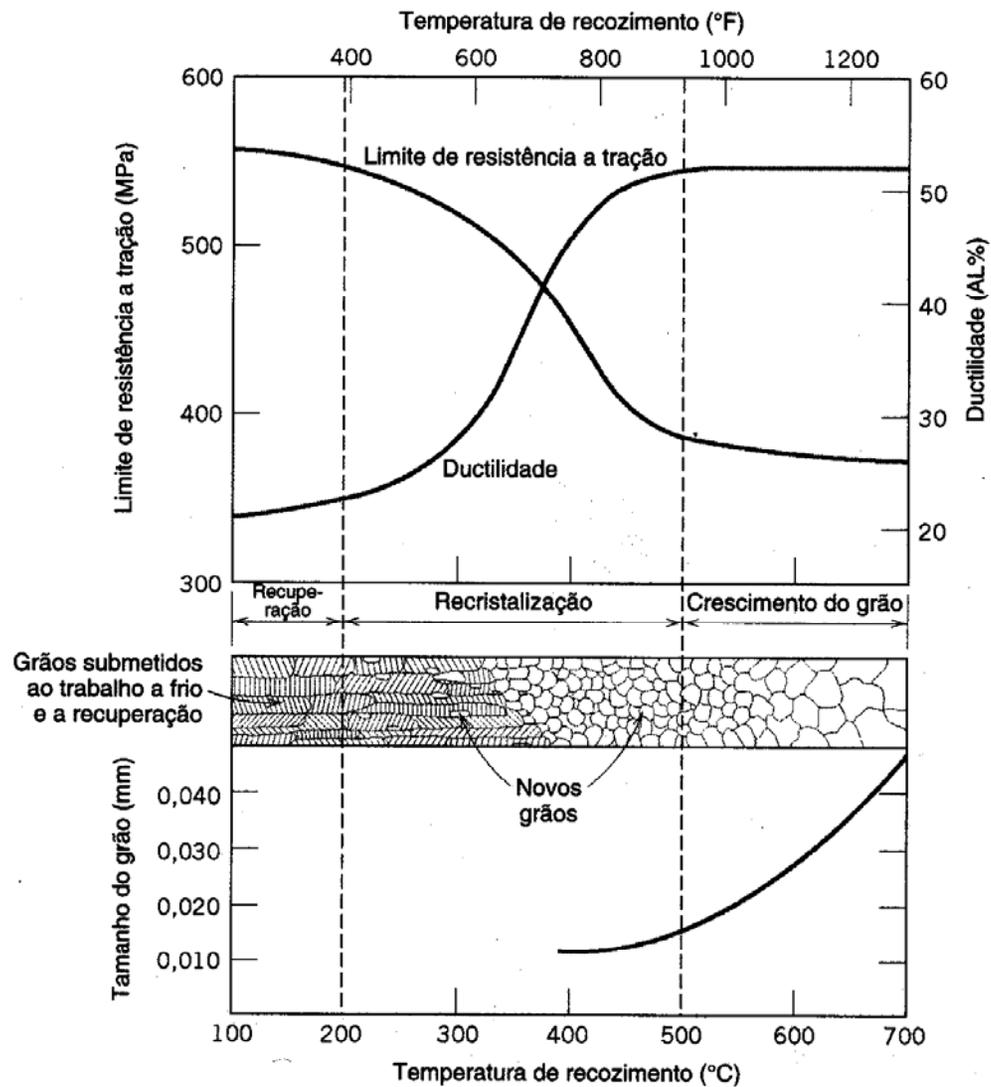


**Fig. 7.11** Alteração da estrutura do grão de um metal policristalino como resultado de uma deformação plástica. (a) Antes da deformação, os grãos são equiaxiais. (b) A deformação produziu grãos alongados.  $170\times$ . (De W. G. Moffatt, G. W. Pearsall, e J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. I, *Structure*, p. 140. Copyright © 1964 por John Wiley & Sons, New York. Reimpresso sob permissão de John Wiley & Sons, Inc.)

# RECUPERAÇÃO, RECRISTALIZAÇÃO E CRESCIMENTO DE GRÃOS



**Fig. 7.21** Fotomicrografias mostrando vários estágios da recrystalização e do crescimento de grãos de latão. (a) Estrutura de grãos submetidos ao trabalho a frio (33%TF). (b) Estágio inicial de recrystalização após aquecimento por 3 s a 580°C (1075°F). Os grãos muito pequenos são aqueles que foram recrystalizados. (c) Substituição parcial de grãos trabalhados a frio por grãos recrystalizados (4 s a 580°C). (d) Recrystalização completa (8 s a 580°C). (e) Crescimento de grão após 15 min a 580°C. (f) Crescimento de grão após 10 min a 700°C (1290°F). Todas as fotomicrografias estão com ampliação de 75×. (As fotomicrografias são cortesia de J. E. Burke, General Electric Company.)



**Fig. 7.22** A influência da temperatura de recozimento sobre o limite de resistência a tração e a ductilidade de uma liga de latão. O tamanho de grão está indicado em função da temperatura de recozimento. As estruturas dos grãos durante os estágios de recuperação, recristalização e crescimento de grão estão mostradas esquematicamente. (Adaptado de G. Sachs e K. R. Van Horn, *Practical Metallurgy, Applied Metallurgy and the Industrial Processing of Ferrous and Nonferrous Metals and Alloys*, American Society for Metals, 1940, p. 139.)

## 5.5. MOVIMENTOS ATÔMICOS

- O movimento atômico entre vazios (mecanismo de vazios) requer pouca energia e move um átomo de uma posição ocupada para um vazio adjacente.
- O mecanismo intersticial move átomos entre os átomos vizinhos da estrutura cristalina.
- Podem ocorrer movimentos em cristais sem defeitos pontuais, tal como a difusão em anel entre 3 ou 4 átomos.

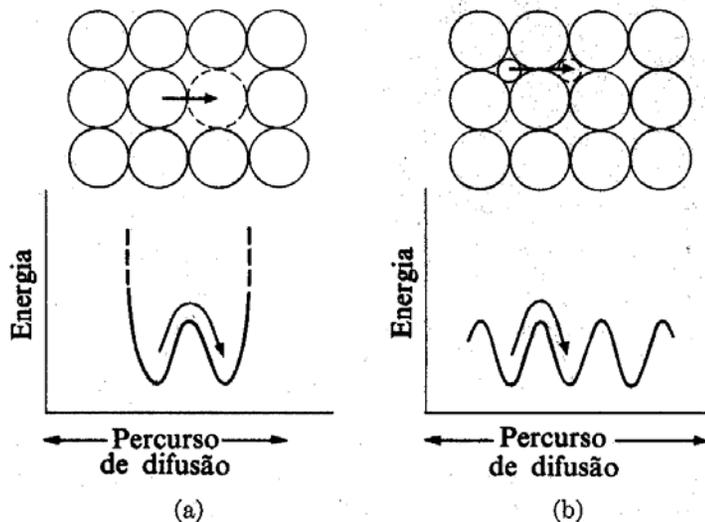


Fig. 4-20. Movimentos atômicos. (a) Mecanismo de vazios. (b) Mecanismo intersticial. Necessita-se de energia *quer* para aumentar *quer* para diminuir a distância interatômica. (cf. Fig. 2-18b).

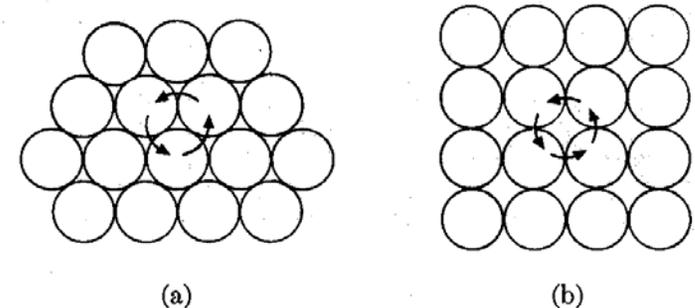
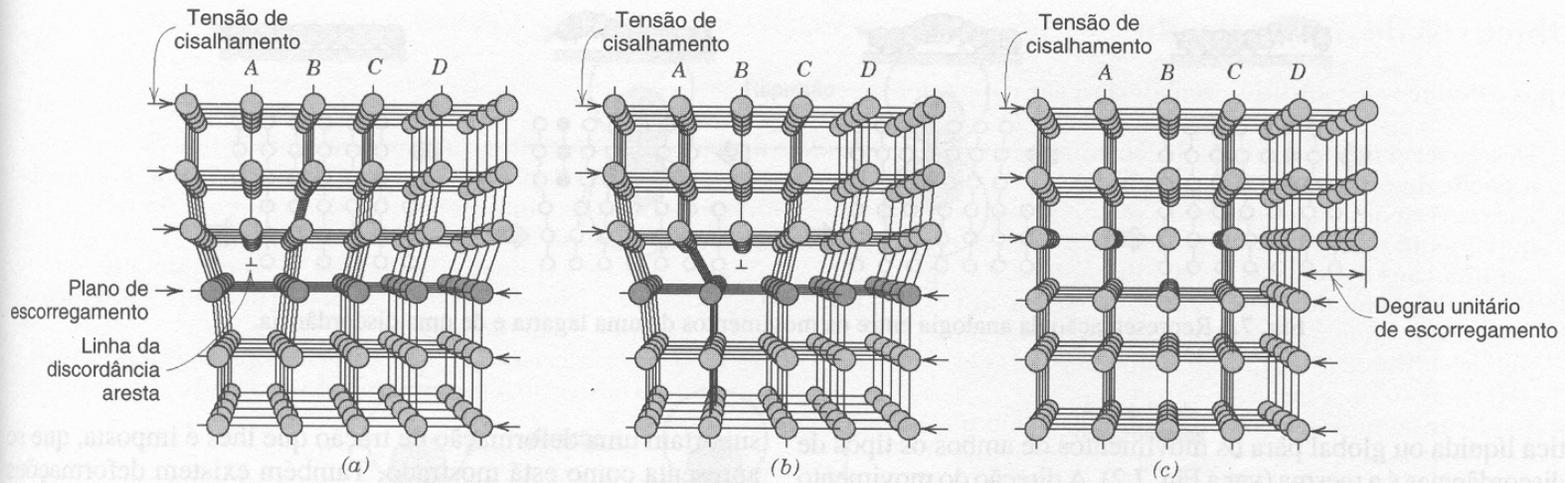


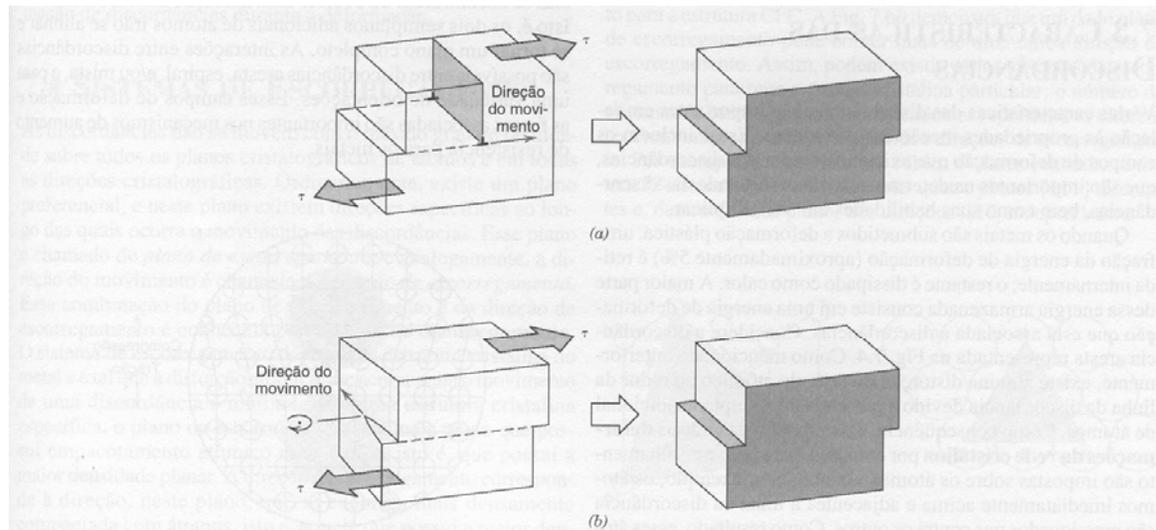
Fig. 4-21. Difusão em anel: (a) anel de três átomos, (b) anel de quatro átomos.

# MOVIMENTO DE DISCORDÂNCIAS PELA APLICAÇÃO DE TENSÕES EXTERNAS

- A aplicação de tensões externas, como uma tensão de cisalhamento, pode gerar movimento nas discordâncias presentes em um cristal.
- O processo pelo qual a deformação plástica é produzida mediante o movimento de uma discordância é chamado de escorregamento.
- A direção de aplicação das tensões externas define um plano de escorregamento (*slip plane*), que é o plano cristalográfico ao longo do qual a linha de discordância se movimenta.
- Em geral, estas tensões externas alteram a forma de um cristal através da geração de um degrau de escorregamento.

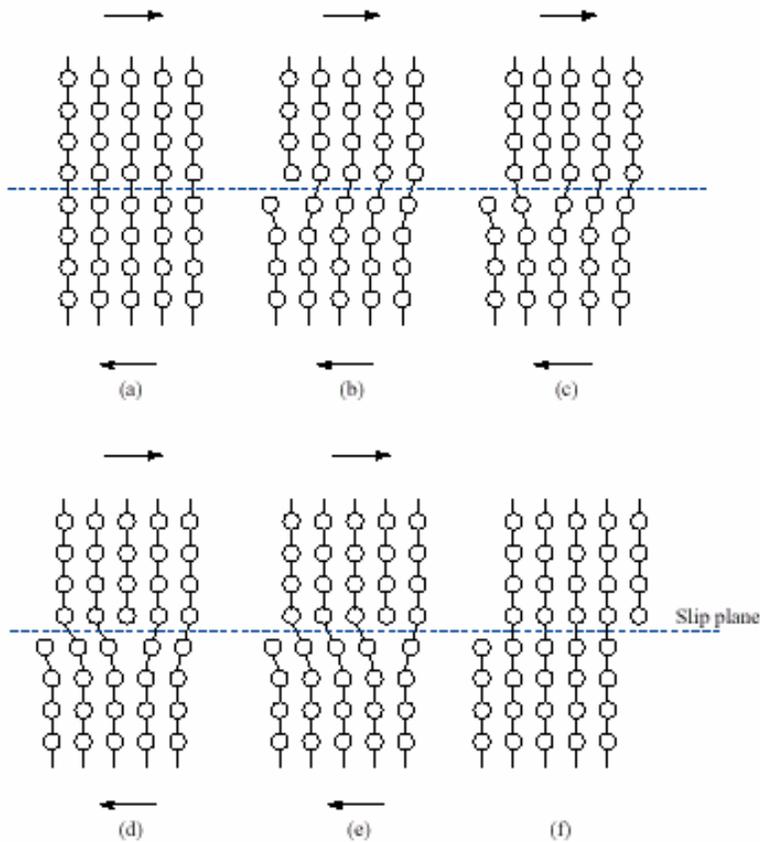


**Fig. 7.1** Rearranjos atômicos que acompanham o movimento de uma discordância aresta à medida que ela se move em resposta à aplicação de uma tensão de cisalhamento. (a) O semiplano de átomos adicional é chamado de A. (b) A discordância se move uma distância atômica para a direita à medida que A se liga à porção inferior do plano B. No processo, a porção superior de B se torna o semiplano adicional. (c) Forma-se um degrau sobre a superfície do cristal à medida que deixa o semiplano adicional. (Adaptado de A. G. Guy, *Essentials of Materials Science*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1976, p. 153.)

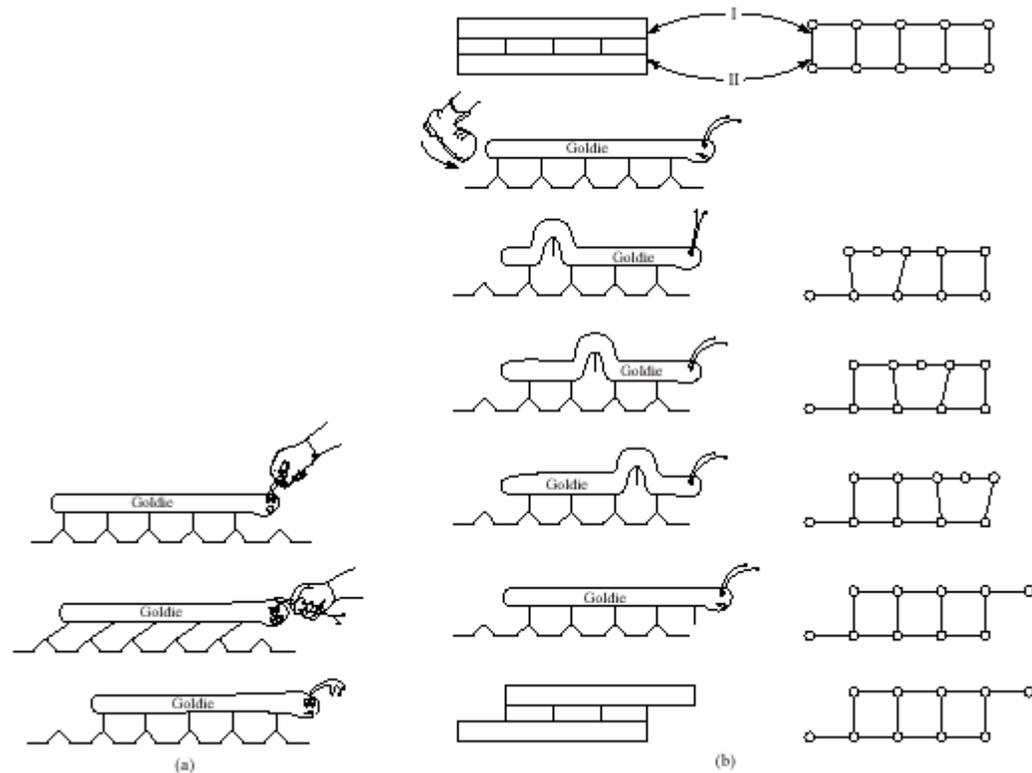


**Fig. 7.2** A formação de um degrau sobre a superfície de um cristal pelo movimento de (a) uma discordância aresta e (b) de uma discordância espiral. Observe que para uma discordância aresta a linha da discordância se move na direção da tensão de cisalhamento aplicada  $\tau$ ; para uma discordância espiral, o movimento da linha da discordância é perpendicular à direção da tensão. (Adaptado de H. W. Hayden, W. G. Moffatt, e J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*, p. 70. Copyright © 1965 por John Wiley & Sons, New York. Reimpresso sob permissão de John Wiley & Sons, Inc.)

# Movimento de uma discordância pela aplicação de uma tensão de cisalhamento.



Esquema demonstrando a diferença de energia necessária para movimentação de uma discordância em cristais perfeitos e imperfeitos.



# **EXERCÍCIOS 4 e 5**