



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

DEFEITOS CRISTALINOS
e
DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

PMT 3110 - Introdução à Ciência dos Materiais para Engenharia

OBJETIVOS

- Discutir o papel dos defeitos cristalinos na deformação plástica de materiais cristalinos (especialmente nos metais)
- Discutir os mecanismos de endurecimento em metais e ligas
- Discutir a interação entre deformação a frio e recristalização no processamento termo-mecânico de ligas

ROTEIRO

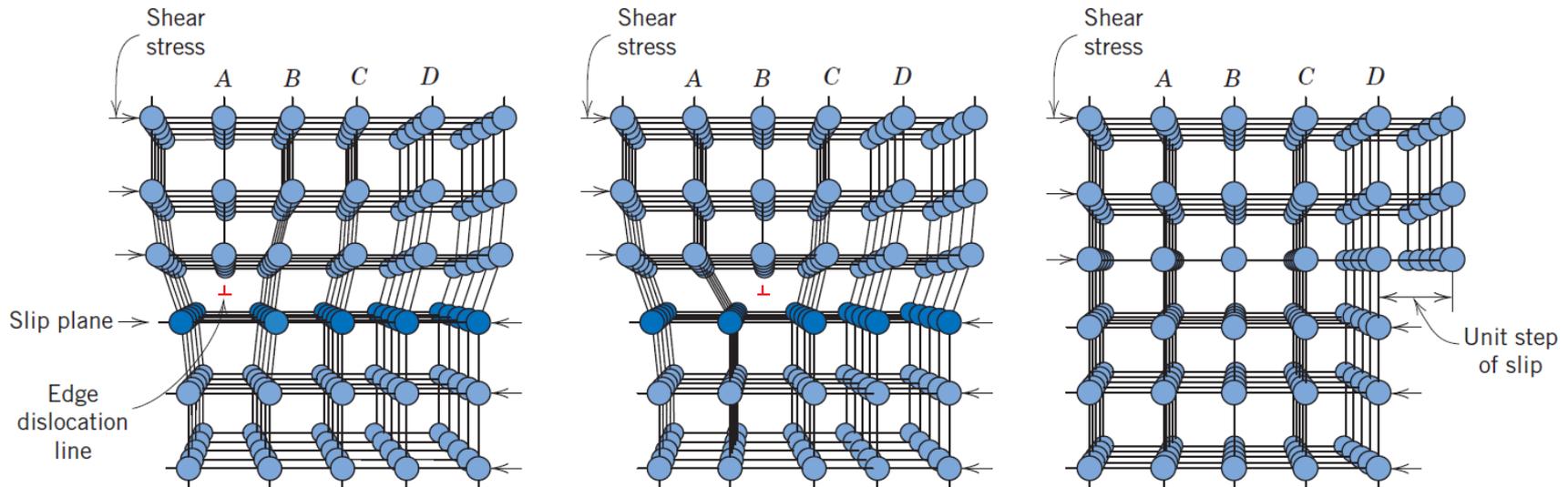
- Mecanismos de deformação plástica em metais e ligas.
- Mecanismos de endurecimento em metais e ligas.
- Deformação a frio e recristalização.
- Algumas informações sobre mecanismos de deformação plástica em materiais cerâmicos e polímeros

Discordâncias

- Discordâncias existem em materiais cristalinos.
- Materiais cerâmicos apresentam estruturas cristalinas mais complexas e ligações mais direcionais \Rightarrow discordâncias imóveis
- A movimentação de discordâncias é o principal fator envolvido na deformação plástica de metais e ligas
- A mobilidade de discordâncias pode ser alterada por diversos fatores (composição, processamento...) \Rightarrow manipulação das propriedades mecânicas do material
- Discordâncias afetam outras propriedades do material, além das mecânicas (p. ex. propriedades elétricas de semicondutores)

Deformação Plástica

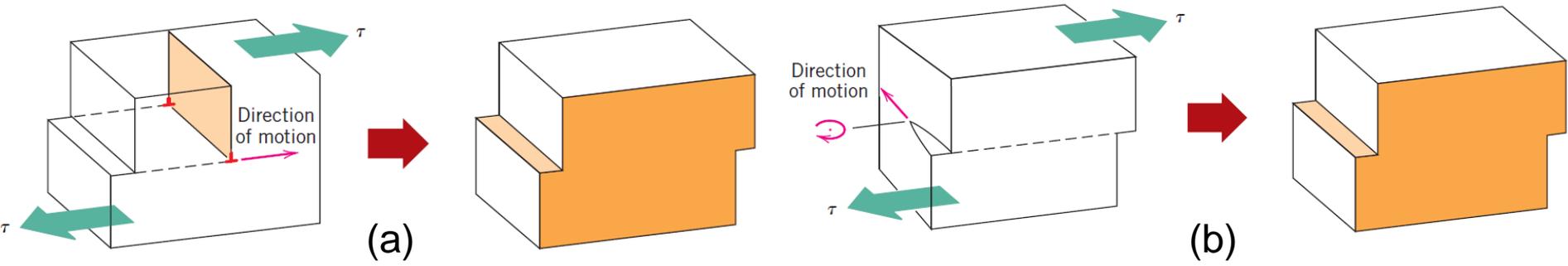
- O mecanismo de deformação plástica é diferente para materiais cristalinos e materiais amorfos.
- Nos **MATERIAIS CRISTALINOS** o **principal mecanismo de deformação plástica** geralmente consiste no escorregamento de planos atômicos através da **MOVIMENTAÇÃO DE DISCORDÂNCIAS**.



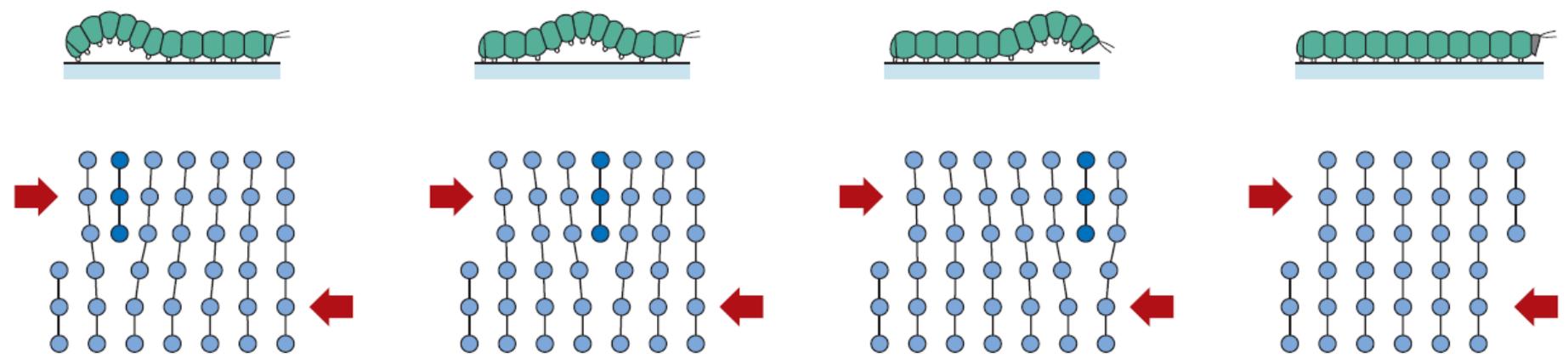
Deformação plástica produzida pela movimentação de uma discordância em cunha.

- Nos **MATERIAIS AMORFOS** o **principal mecanismo de deformação plástica** geralmente consiste **ESCOAMENTO VISCOSO**.

Deformação Plástica



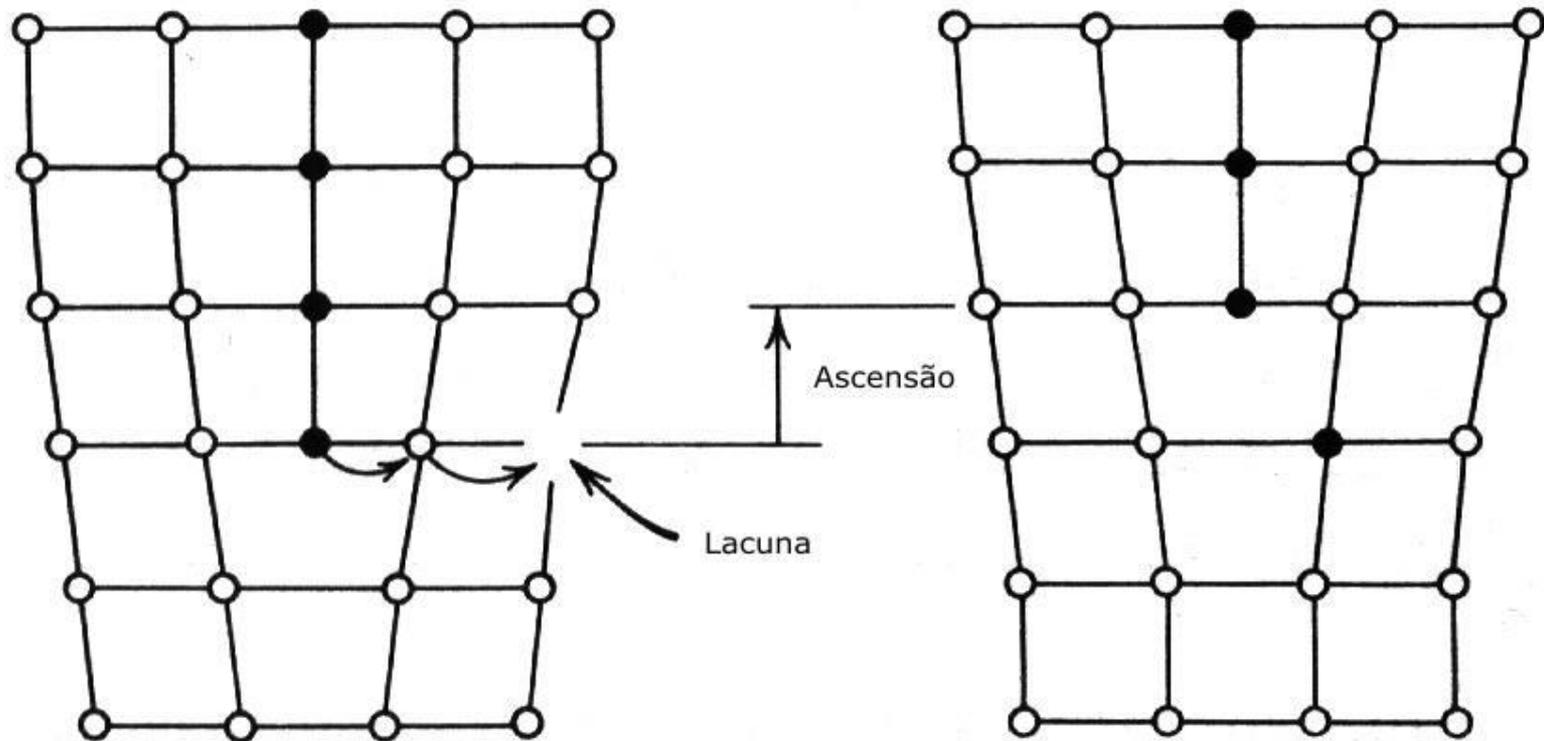
Formação de um degrau na superfície de um metal pela movimentação de (a) uma discordância em cunha e (b) uma discordância em hélice.



Analogia entre a movimentação de uma lagarta e de uma discordância.

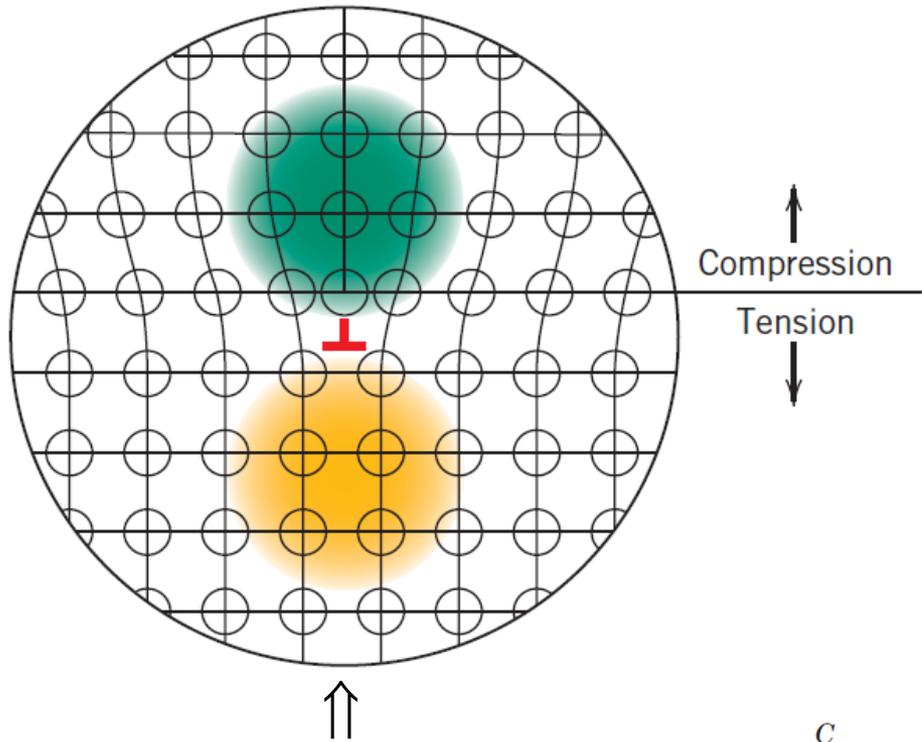
Movimentação da Discordância em Cunha

- Quando a discordância se movimenta num **PLANO DE DESLIZAMENTO**, que são normalmente os planos de maior densidade atômica, o movimento é *conservativo*.
- Se o movimento da discordância se der *perpendicularmente ao vetor de Burgers*, o movimento (*de escalada ou ascensão*) é *não conservativo*.



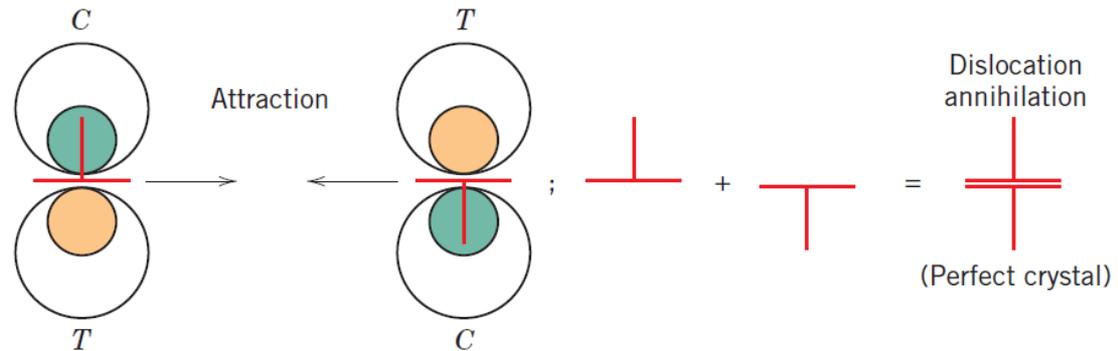
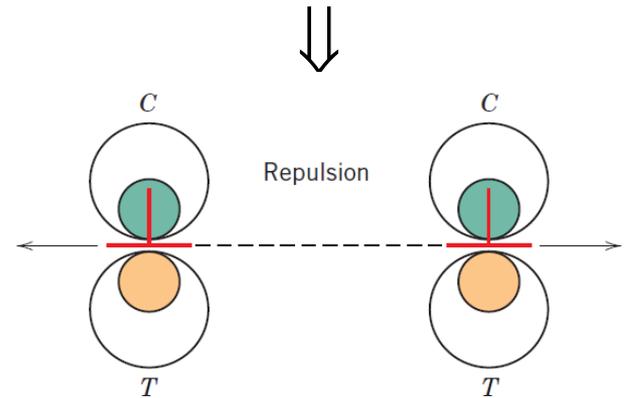
Ascensão de uma discordância em cunha. Observe a aniquilação de lacunas.

Campo de Tensões ao Redor de uma Discordância ⁷



Tensões de compressão e de tração ao redor de uma discordância em cunha

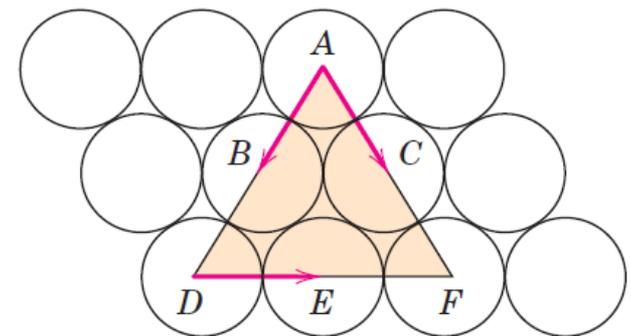
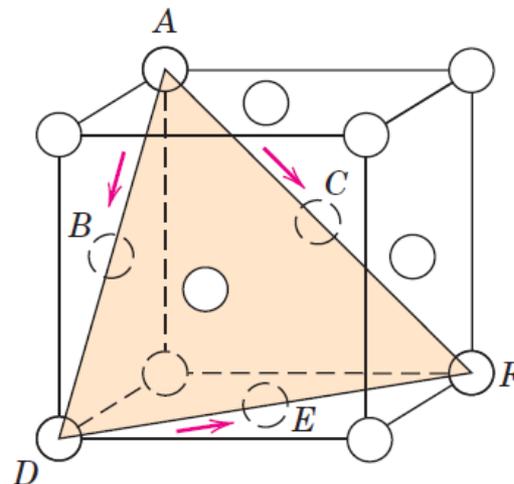
Interação entre discordâncias em cunha no mesmo plano de deslizamento



Sistemas de Escorregamento

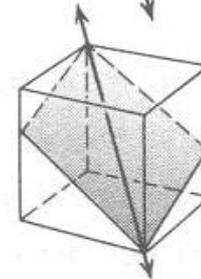
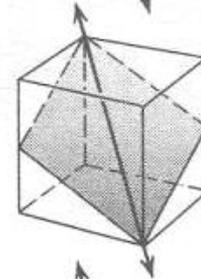
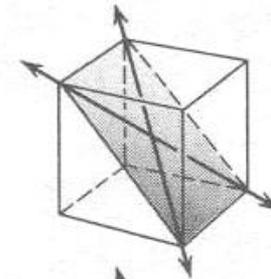
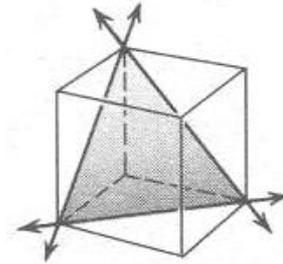
- As discordâncias não se movem com a mesma facilidade em todos os planos cristalinos e em todas as direções cristalinas.
- A movimentação das discordâncias se dá preferencialmente através de planos específicos e, dentro desses planos, em direções específicas, ambos **com a maior densidade atômica** de um dado reticulado cristalino.
- Essa combinação de um plano e uma direção é chamada de **SISTEMA DE ESCORREGAMENTO** (“slip system”).

Sistemas de
escorregamento
nos cristais CFC



SISTEMAS DE ESCORREGAMENTO OBSERVÁVEIS EM METAIS CCC E CFC

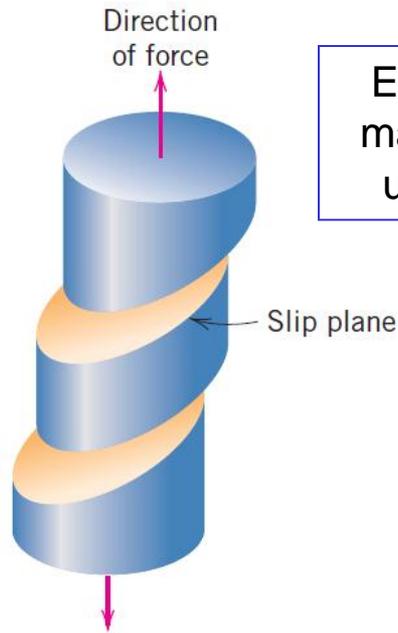
ESTRUTURA	PLANOS DE ESCORREGAMENTO	DIREÇÕES DE ESCORREGAMENTO	SISTEMAS DE ESCORREGAMENTO
<u>CFC</u> Cu, Al, Ni, Pb, Au, Ag, γ Fe, ...	{111}	$\langle 110 \rangle$	$4 \times 3 = 12$
<u>CCC</u> α Fe, W, Mo, β Brass	{110}	$\langle 111 \rangle$	$6 \times 2 = 12$
α Fe, Mo, W, Na	{211}	$\langle 111 \rangle$	$12 \times 1 = 12$
α Fe, K	{321}	$\langle 111 \rangle$	$24 \times 1 = 24$



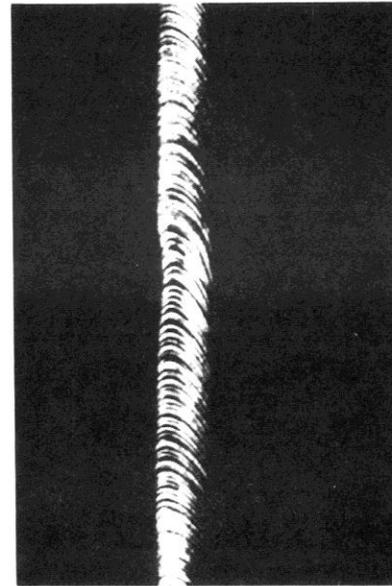
...repetindo:

Um sistema de escorregamento é definido por um **PLANO** e por uma **DIREÇÃO** de escorregamento, ambos com a **maior densidade atômica** em um dado reticulado cristalino.

Deformação Plástica em Monocristais e Policristais 10

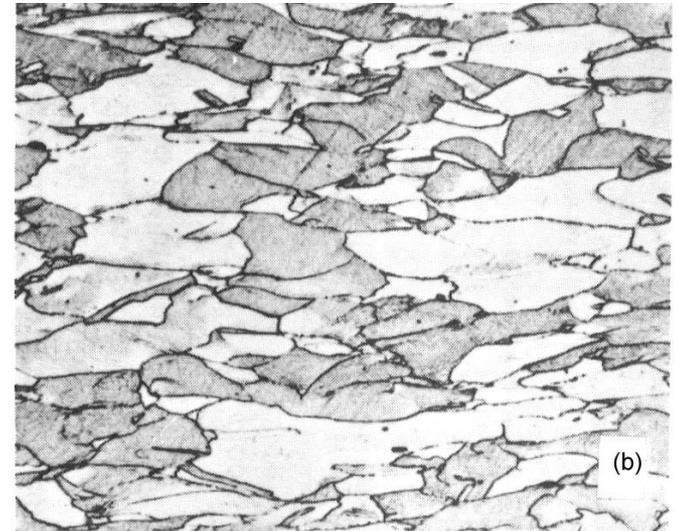
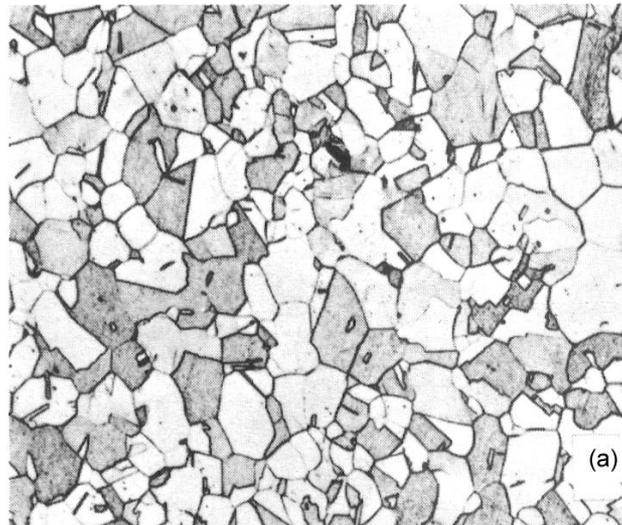


Escorregamento macroscópico em um monocristal



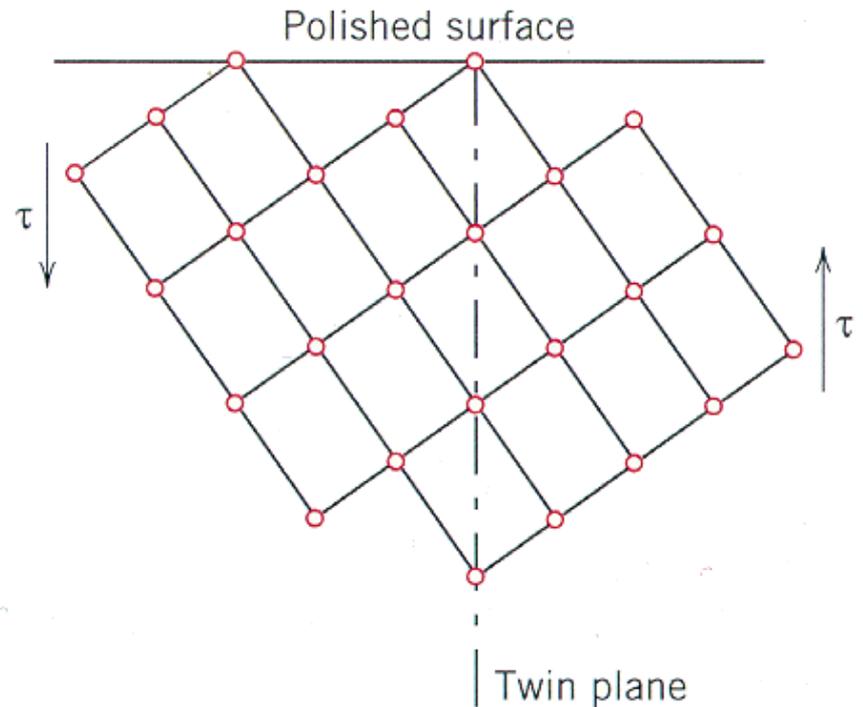
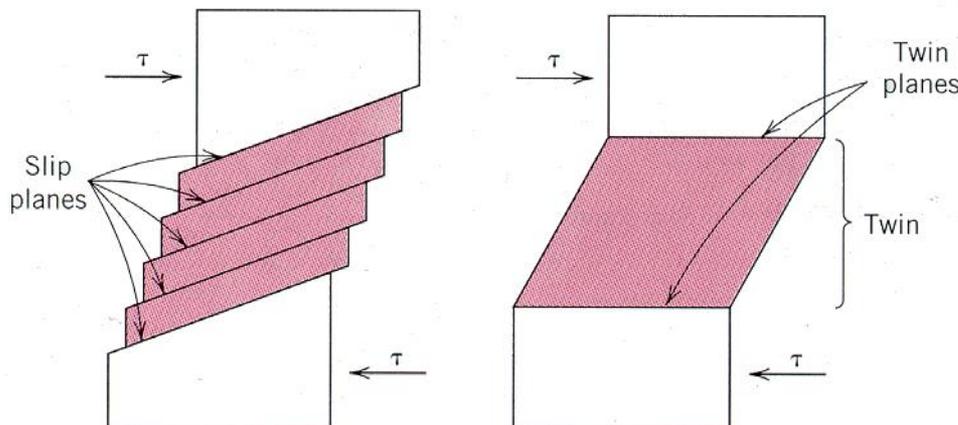
Escorregamento em um monocristal de zinco

Alteração da microestrutura de um metal policristalino em conseqüência da deformação plástica.



Deformação Plástica: Maclação

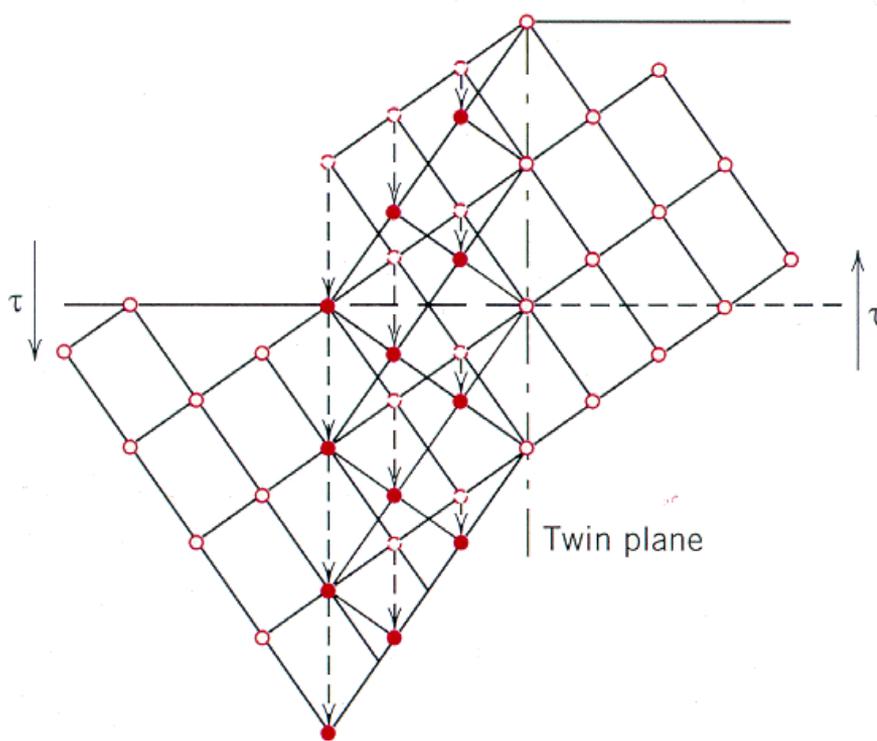
- A **MACLA** é um tipo de defeito cristalino que pode ocorrer durante a deformação plástica.
- A **MACLAÇÃO** ocorre em um plano cristalográfico determinado segundo uma direção cristalográfica específica. **Tal conjunto plano/direção** depende do tipo de estrutura cristalina.
- **DEFORMAÇÃO POR MACLAÇÃO** é um mecanismo importante na deformação plástica de metais HC e CCC, principalmente a baixas temperaturas e em altas velocidades de deformação.



Material antes da deformação plástica

Deformação Plástica: Maclação

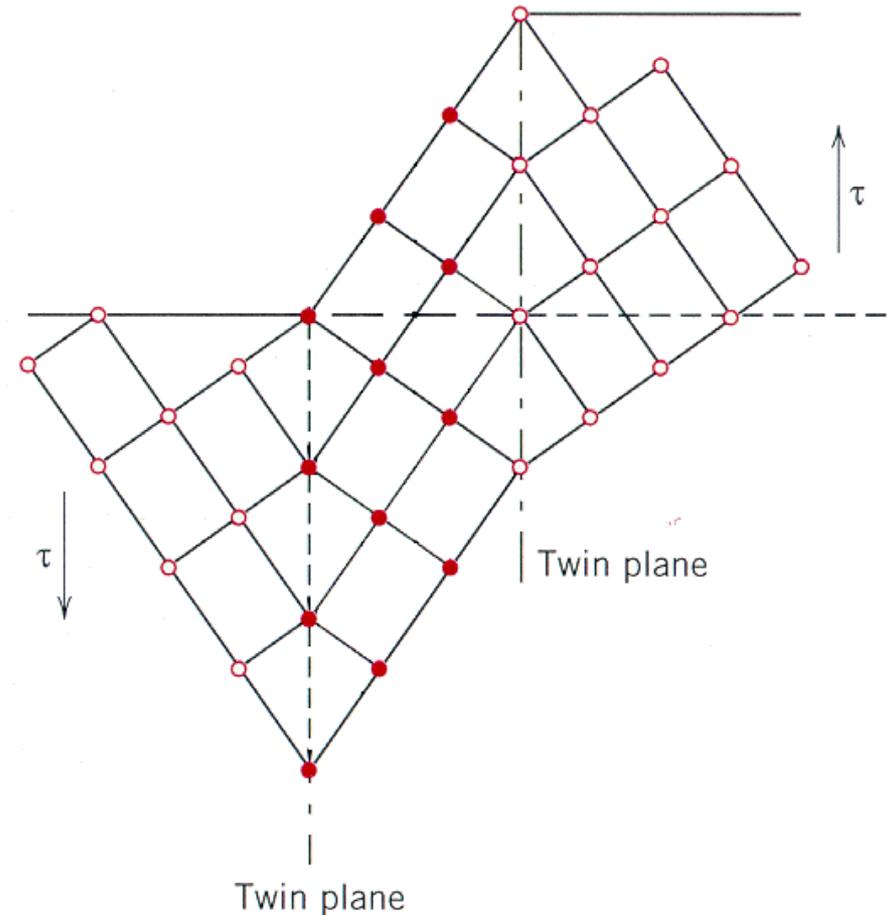
12



Material sofrendo a deformação plástica:

- os círculos vazios com linha pontilhada indicam as posições atômicas originais;
- os círculos vazios com linha sólida indicam os átomos que não alteram suas posições;
- os círculos cheios indicam as posições dos átomos após a movimentação.

Um dos planos de maclação (*twin plane*) é indicado.



Material ao final da deformação plástica:

- círculos cheios indicam os átomos que mudaram de posição;
- as linhas pontilhadas indicam os planos de maclação (*twin planes*).

Mecanismos de Endurecimento

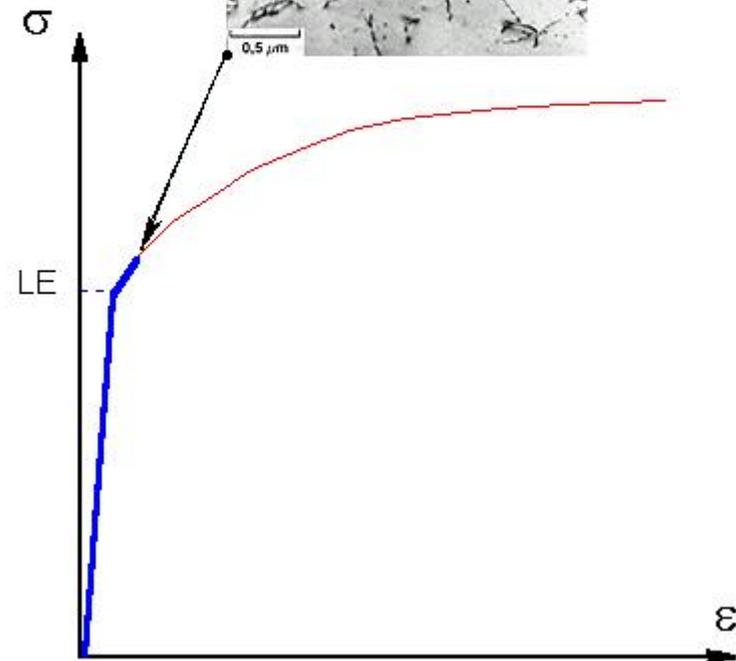
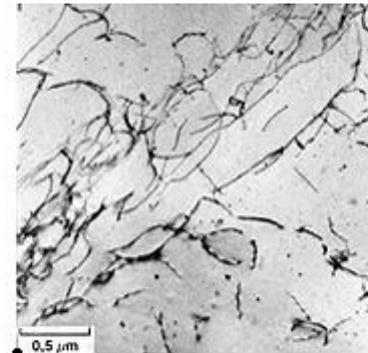
(em metais e ligas metálicas monofásicas)

- Restringir ou dificultar a movimentação das discordâncias torna os metais mais resistentes à deformação plástica, mais duros e menos dúcteis. Isso pode ser obtido por quatro maneiras diferentes:
 - ✓ Endurecimento por **deformação plástica (ENCRUAMENTO)** (*“strain hardening”* ou *“work hardening”*)
 - ✓ Endurecimento **por diminuição (REFINO)** do tamanho de grão (*“strengthening by grain size reduction”*)
 - ✓ Endurecimento por **SOLUÇÃO SÓLIDA** (*“solid solution strengthening”*)
 - ✓ Endurecimento por **PRECIPITAÇÃO** ou **DISPERSÃO**

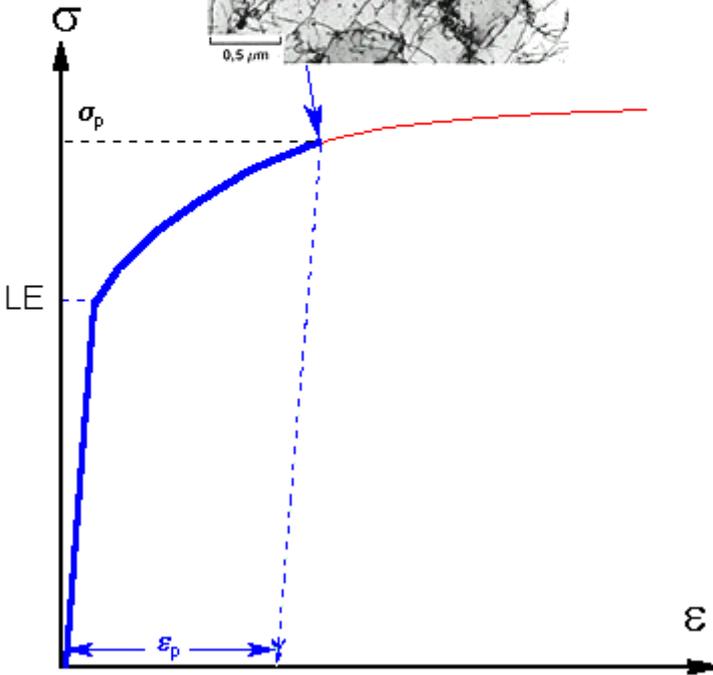
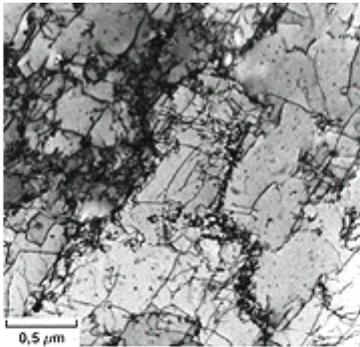
Endurecimento em Metais: Encruamento

- É o mais antigo e provavelmente o mais utilizado dentre os mecanismos de endurecimento de metais.
- O **encruamento** é o mecanismo pelo qual um material dúctil se torna mais duro e resistente depois de ter sido submetido a uma deformação plástica.
- Durante a deformação plástica, as discordâncias movimentam-se, multiplicam-se, interagem entre si formando “emaranhados”.
- Para que a movimentação das discordâncias ocorra passa a haver a necessidade de tensões crescentes.

Metal policristalino dúctil
Ferro deformado plasticamente
Densidade de discordâncias :
 $2 \times 10^8 \text{ cm/cm}^3$)

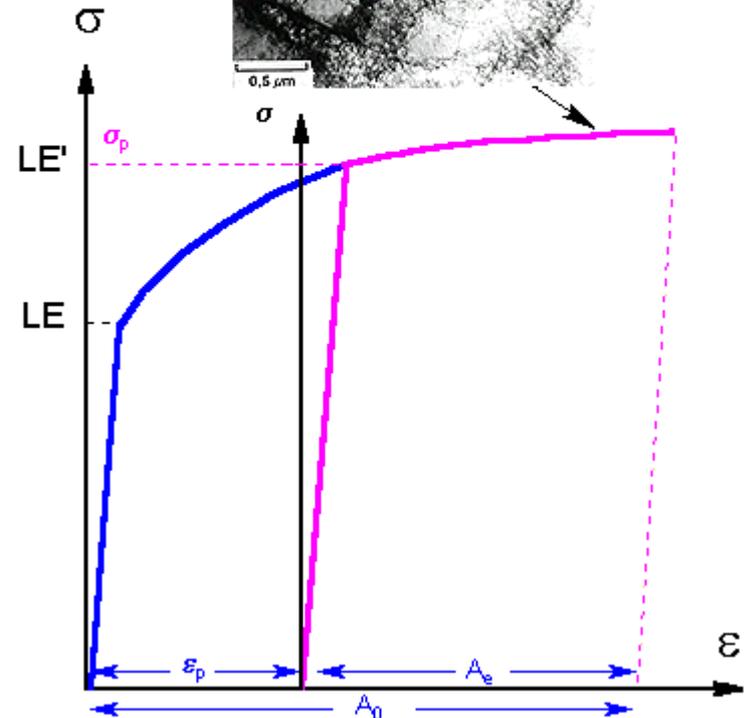
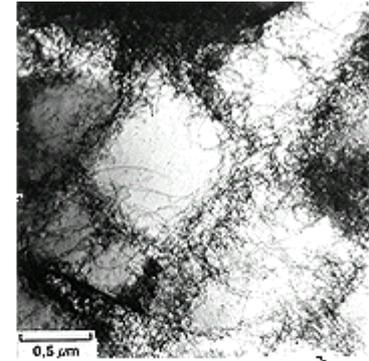


Endurecimento em Metais: Encruamento



Metal policristalino dúctil
Ferro deformado plasticamente
Densidade de discordâncias :
 $2 \times 10^{10} \text{ cm/cm}^3$

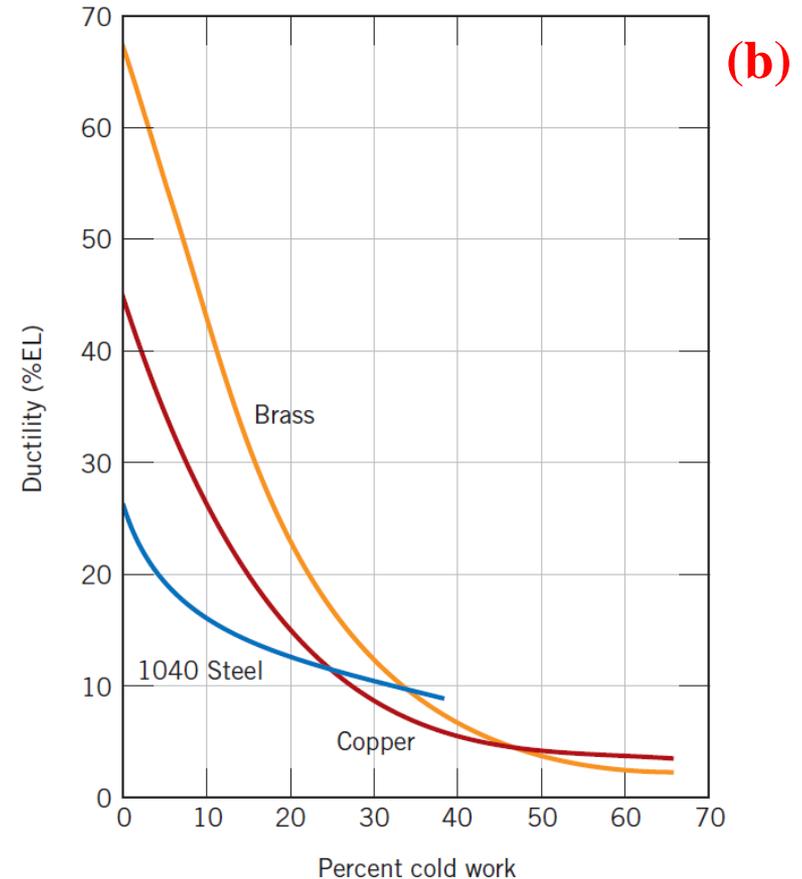
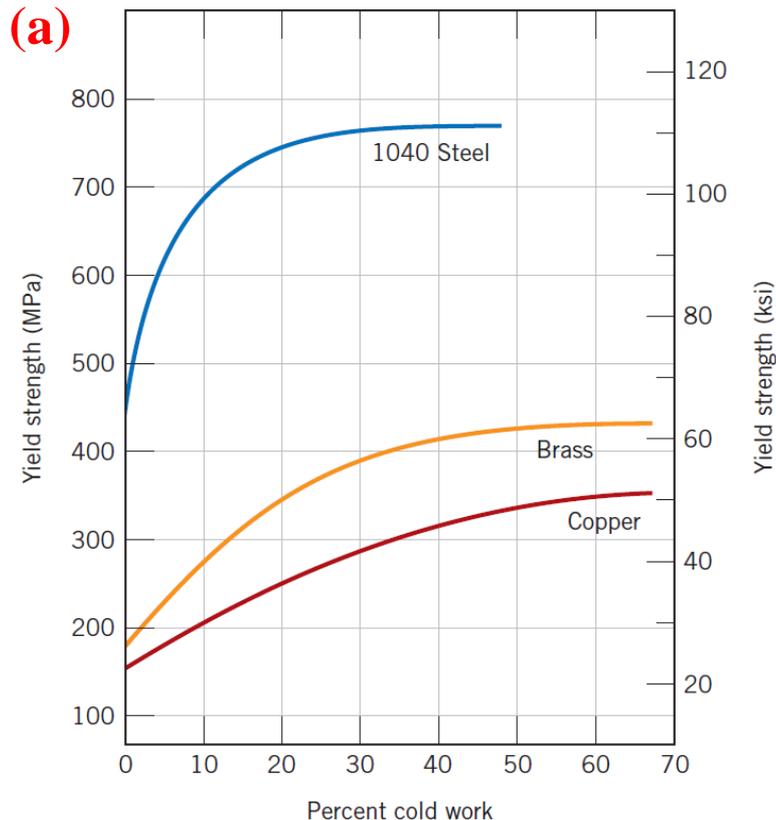
Metal policristalino dúctil
Ferro deformado plasticamente
Densidade de discordâncias :
 $2 \times 10^{11} \text{ cm/cm}^3$



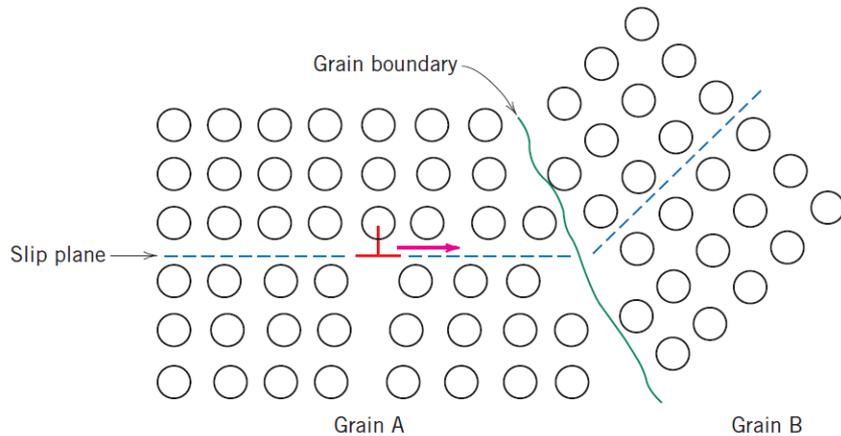
Endurecimento em Metais: Encruamento

$$\%CW = \left(\frac{A_o - A_f}{A_o} \right) \times 100\%$$

CW é trabalho a frio, A_o e A_f são áreas de seção transversal, respectivamente, antes e depois da deformação.



Varição de : (a) limite de escoamento e (b) ductilidade com o grau de deformação, em % de redução de área, %CW, para o aço AISI 1040, o latão e o Cu, trabalhados a frio.



Interação entre uma discordância em movimento e um contorno de grão.

- Nos materiais monofásicos, a variação do limite de escoamento (σ_y) com o tamanho do grão médio (d) é expressa por:

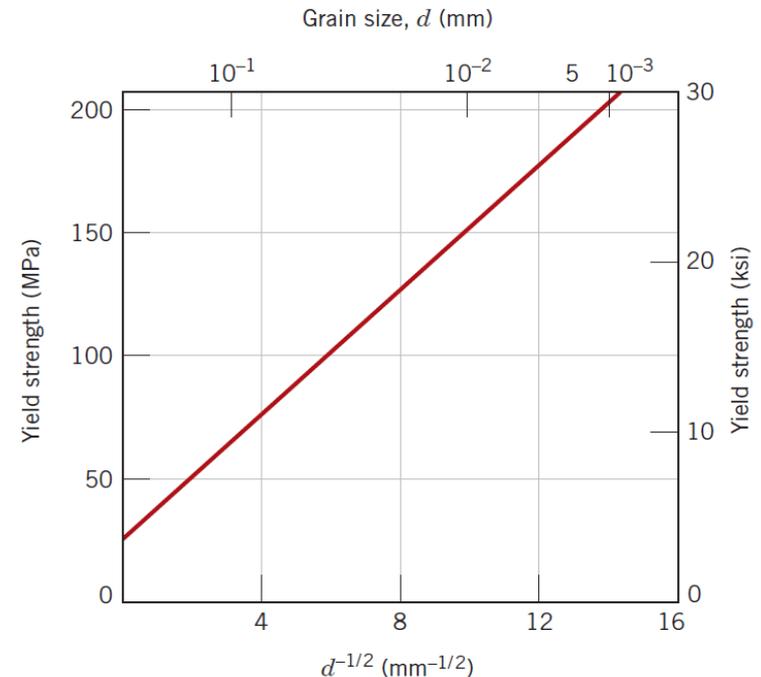
$$\sigma_y = \sigma_o + k_y d^{-1/2}$$

(Relação de Hall-Petch)

onde: σ_o e k_y são constantes características do material.

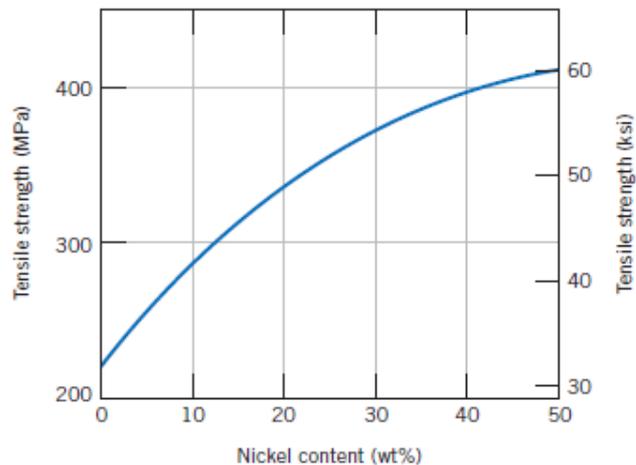
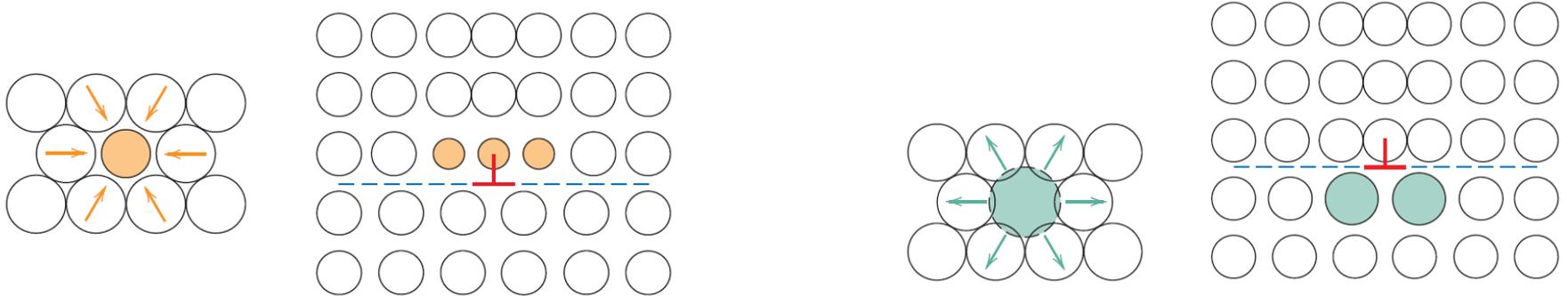
Contornos de grão são obstáculos para a movimentação de discordâncias.

Influência do tamanho de grão no limite de escoamento do latão 70%Cu – 30%Zn

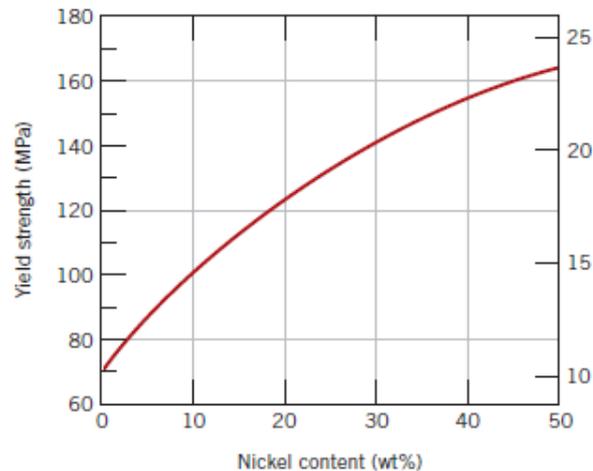


Endurecimento em Metais: Solução Sólida

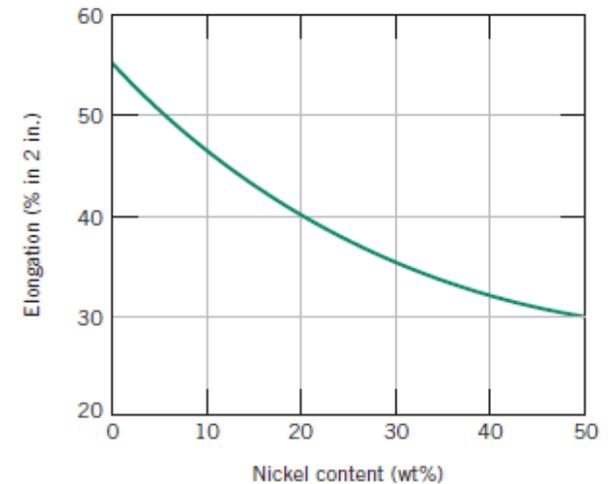
- Os campos de tensão gerados por átomos de soluto interagem com os campos de tensão das discordâncias, dificultando a movimentação das discordâncias e, conseqüentemente, promovendo endurecimento.



(a)



(b)

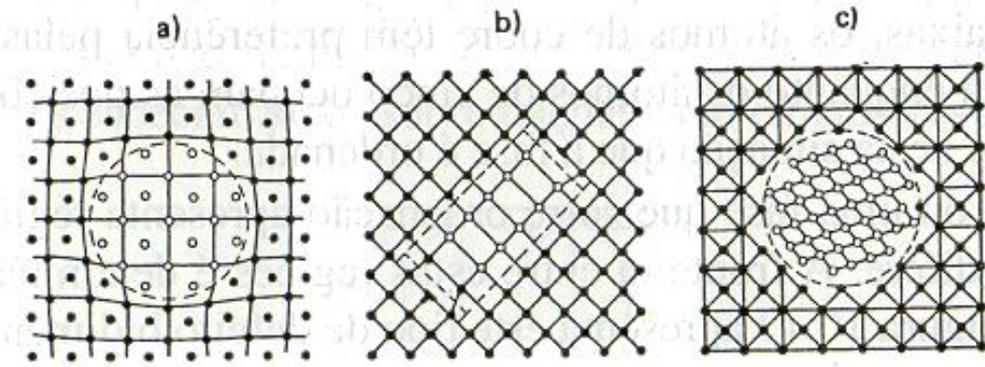


(c)

Varição de: (a) resistência à tração; (b) limite de escoamento (c) ductilidade com o teor de Ni para ligas Cu-Ni

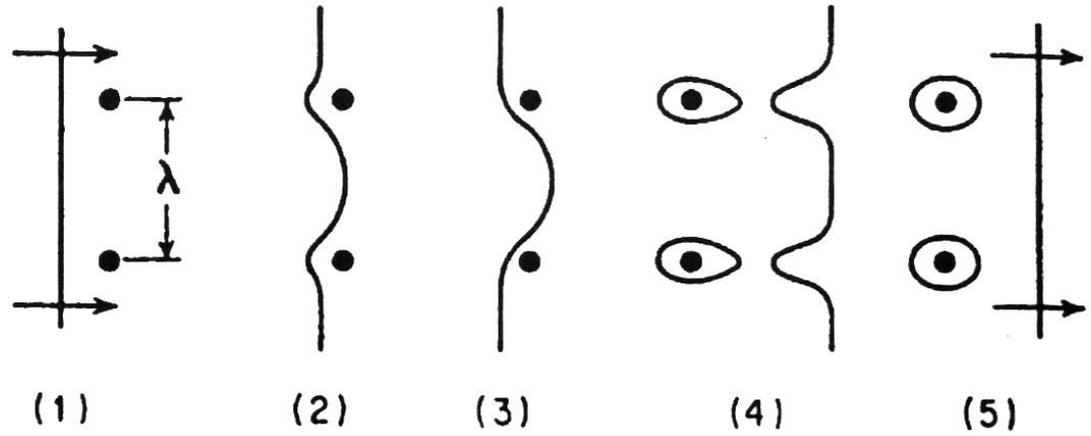
Endurecimento em Metais: Precipitação ou Dispersão¹⁹

- Os precipitados também dificultam o movimento das discordâncias.
- **PRECIPITADOS INCOERENTES**: não existe continuidade entre os planos cristalinos do precipitado e os da matriz, e as discordâncias terão que se curvar entre os precipitados → **MECANISMO DE OROWAN**



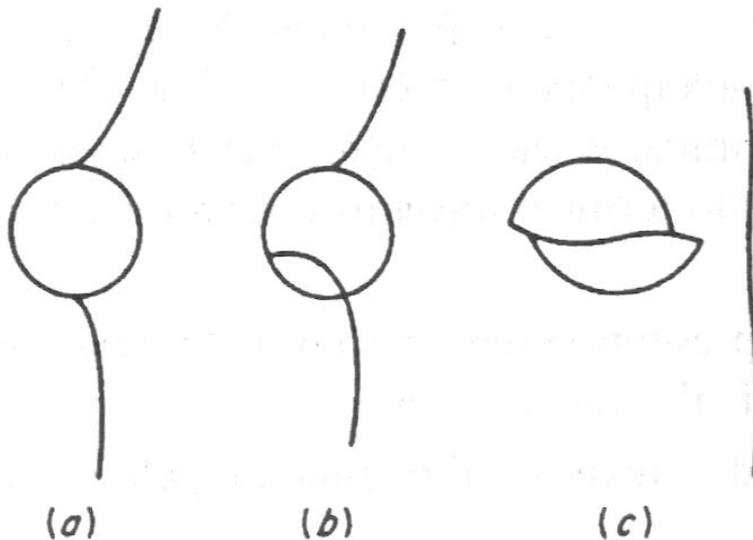
Arranjo dos átomos ao redor das interfaces:
a) coerente,
b) semicoerente,
c) incoerente.
(segundo E. Hornbogen)

Mecanismo de Orowan para a interação de discordâncias com partículas incoerentes.



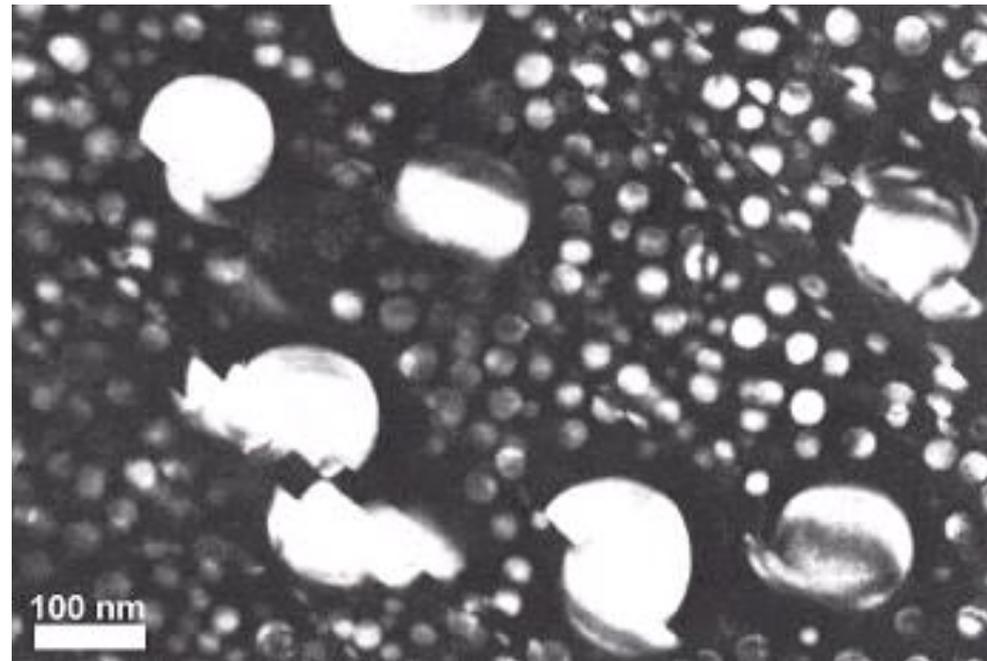
Endurecimento em Metais: Precipitação ou Dispersão

- Se os **PRECIPITADOS** forem **COERENTES**, as discordâncias em movimento poderão cortá-los ou cisalhá-los.
- Precipitados coerentes são muito menos comuns que precipitados incoerentes.

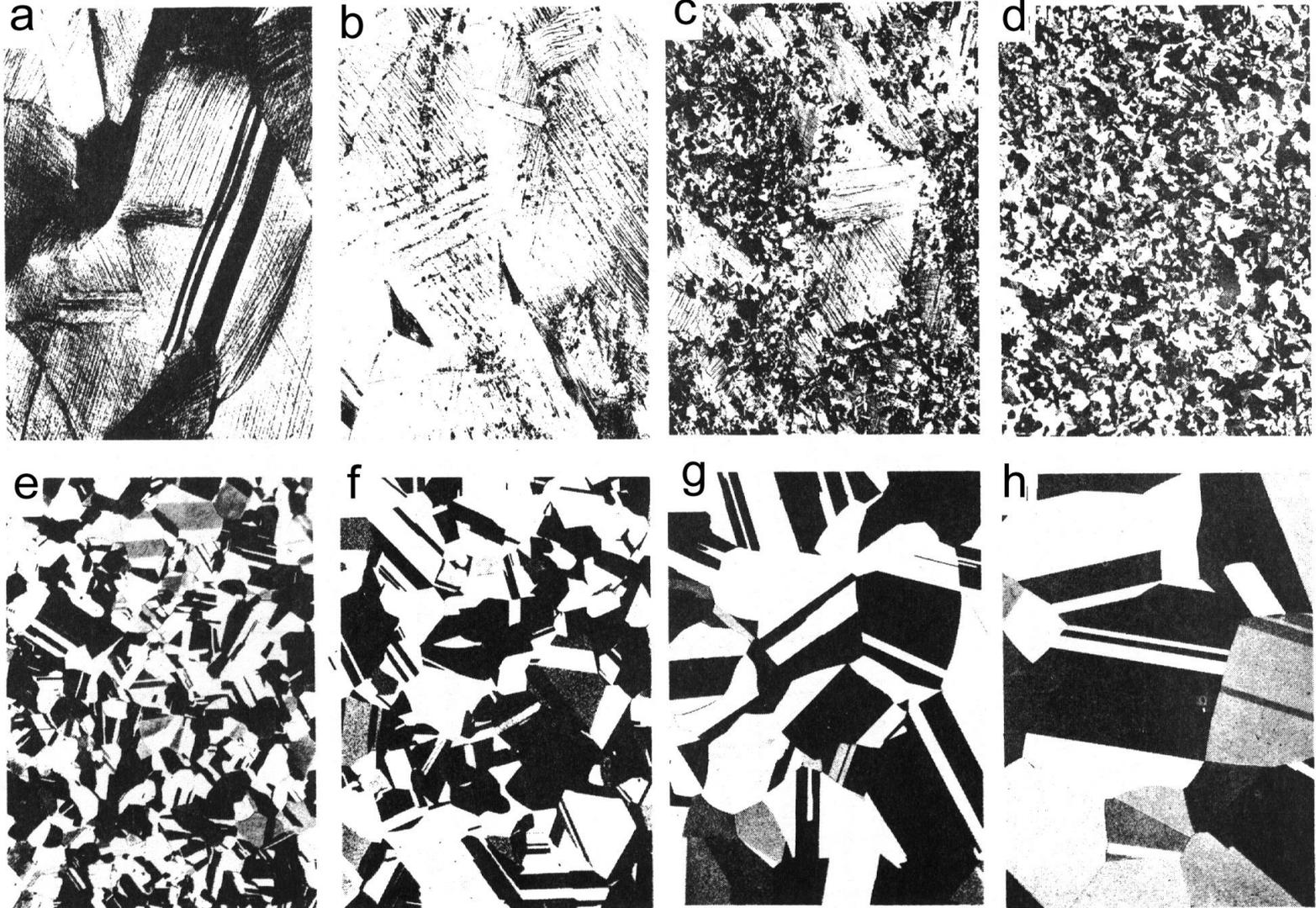


Cisalhamento de uma partícula causado pela passagem de uma discordância.

Precipitados coerentes de Ni_3Al em uma superliga (Waspalloy 650) cisalhados.
(MET – S.D. Antolovich – U.T. Compiègne)

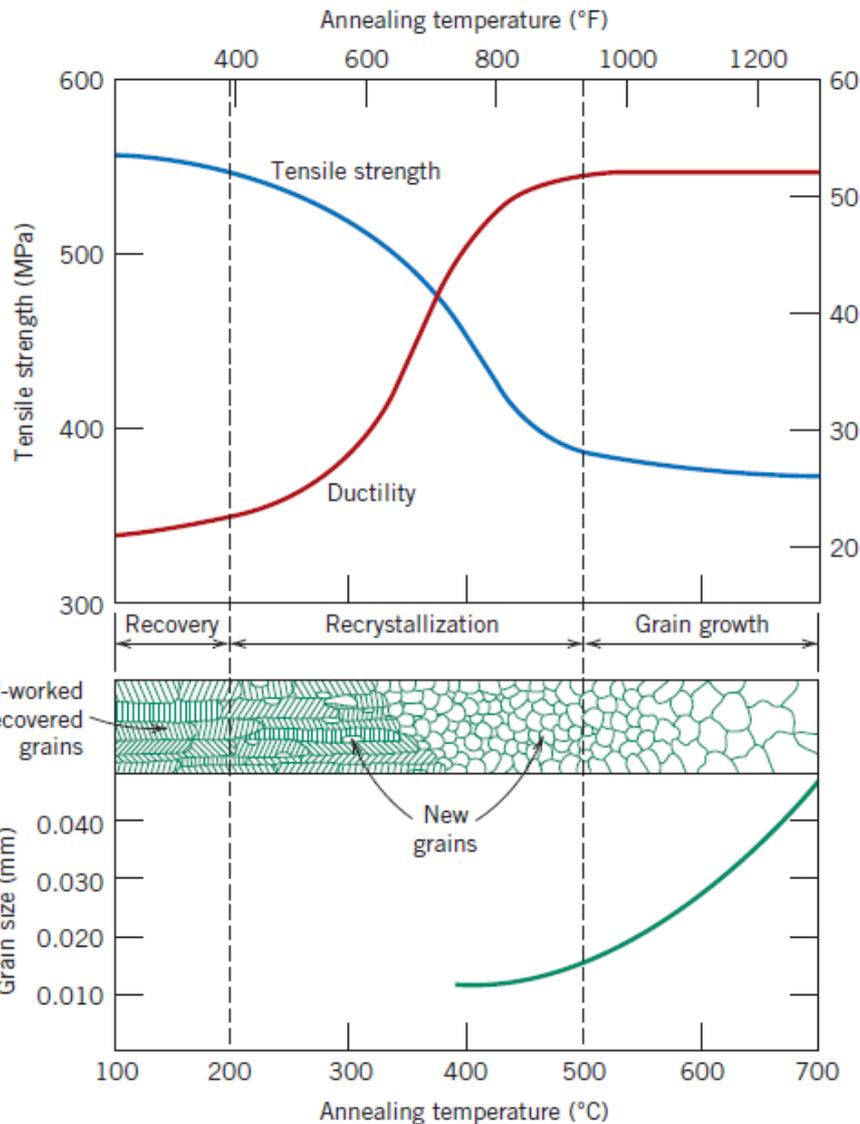


Recristalização



Recristalização de latão encruado (40X). De (a) a (h) pode-se ver a recristalização e o crescimento dos grãos em temperaturas elevadas.

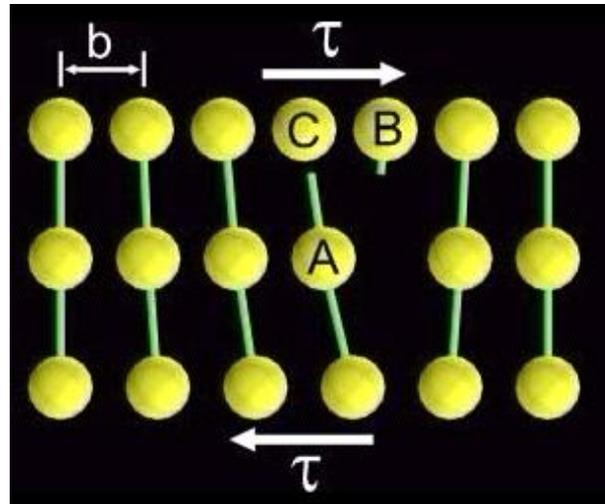
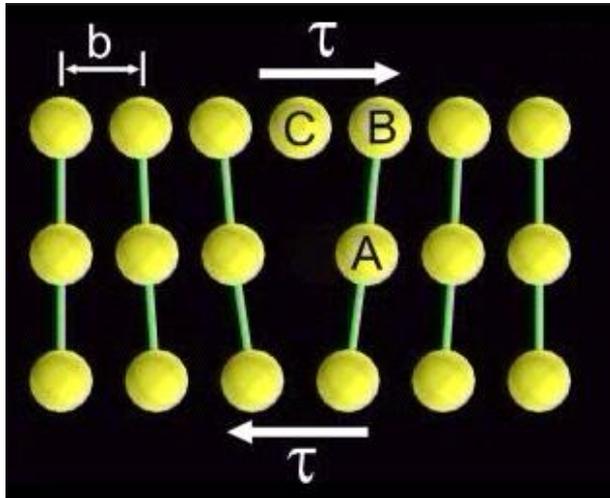
Recristalização



Ciclos de deformação a frio e recozimento (cápsula para cartuchos)

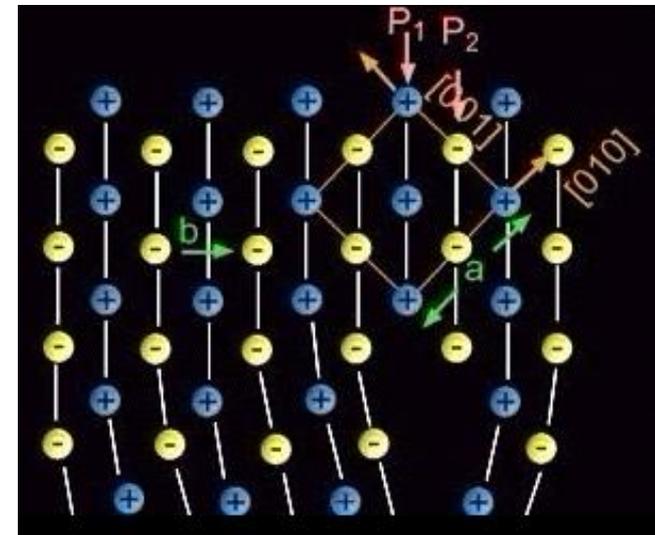
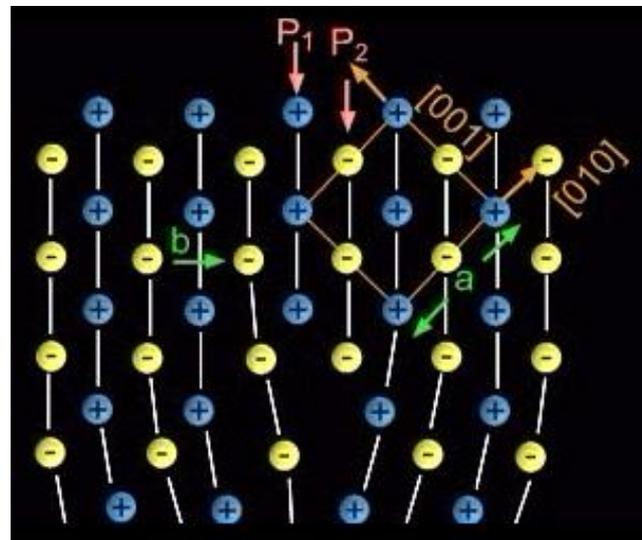
Influência da temperatura de recozimento na resistência à tração e na ductilidade de uma liga de Cu-Zn.

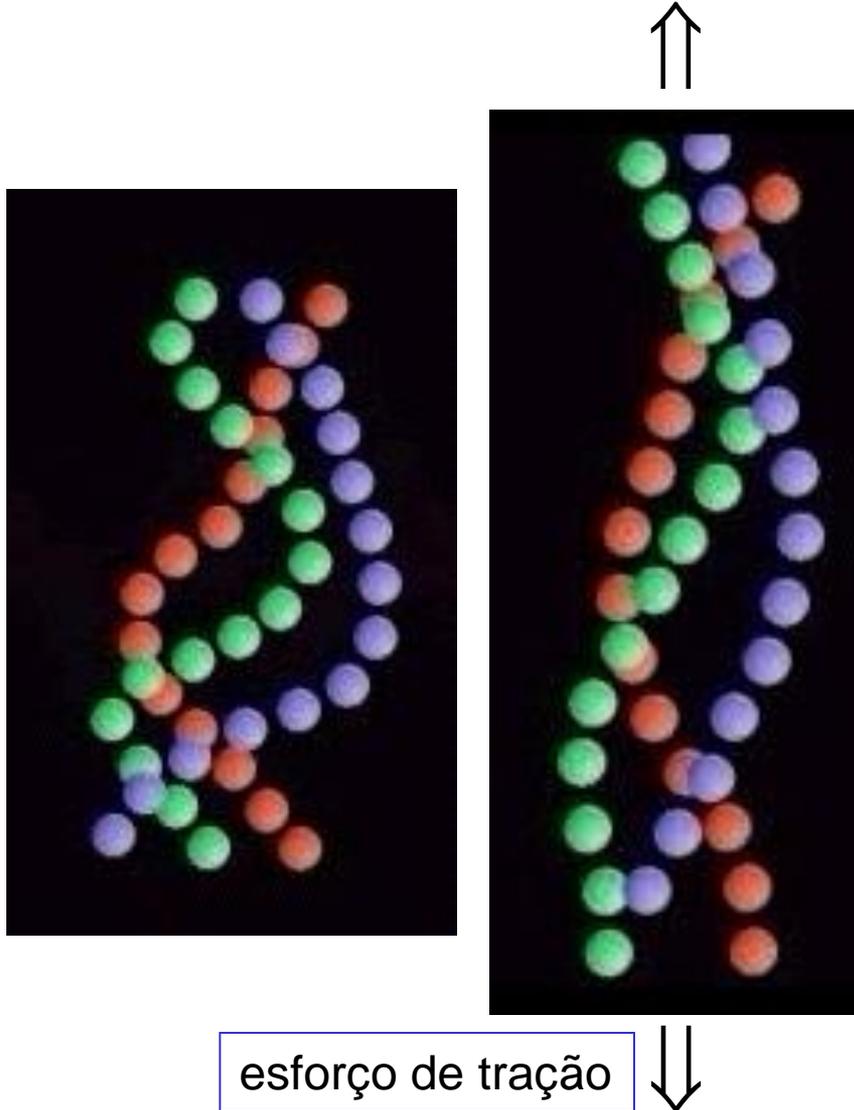
Deformação Plástica em Materiais Cerâmicos



Discordâncias não são prevalentes em cerâmicos. A movimentação de discordância em cunha em sólidos com ligações covalentes ocorre com quebra destas ligações fortes.

O mesmo ocorre na movimentação de discordância em cunha em sólidos com ligações iônicas





- Os materiais poliméricos apresentam comportamento mecânico pouco uniforme, dependendo do seu processamento.
- O comportamento mecânico é, principalmente, função do tipo de ligação e de ordenamento que existe entre as cadeias poliméricas, e não apenas do tipo de ligação existente no interior das cadeias.
- Por exemplo, a conformação de menor energia das cadeias poliméricas é a enovelada (novelo estatístico), a deformação plástica de polímeros ocorre com o “desdobramento” irreversível das cadeias sob o efeito da tensão aplicada.

RESUMO

- A deformação plástica em metais consiste, principalmente, no escorregamento de planos de através da movimentação das discordâncias. Esta movimentação se dá preferencialmente em planos e direções de maior densidade atômica (sistemas de escorregamento).
- A redução da movimentação das discordâncias torna os metais mais resistentes à deformação plástica e, portanto, mais rígidos e duros.
- O endurecimento do metal pode ocorrer por encruamento, refino de grão, solução sólida ou precipitação. Todos estes processos levam à redução da movimentação das discordâncias.
- A deformação imposta (CW - trabalho a frio) leva ao encruamento observado como aumento da tensão de escoamento e redução da ductilidade.
- A movimentação de discordâncias em cerâmicos é mais difícil. Os polímeros apresentam outros mecanismos de deformação plástica, mudanças na conformação das cadeias enoveladas, não associadas ao escorregamento de planos cristalinos.

- **Capítulo do Callister (7ª ed., 2008) tratado nesta aula**

- ✓ Capítulo 7, exceto item 7-13

- Texto complementar recomendado

- Callister, 5ª ed. - Capítulo 7, exceto item 7-13
 - Shackelford, J. F. Ciência dos Materiais, 6ª ed. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2008. – Capítulo 6: Seções 6.3
 - Padilha, A. F. – Materiais de Engenharia. São Paulo. Hemus. 1997.
 - Mecanismos de endurecimento de metais : pgs255-259
 - Discordâncias : pgs 145-180
 - Defeitos bidimensionais ou planares : pgs 181-199