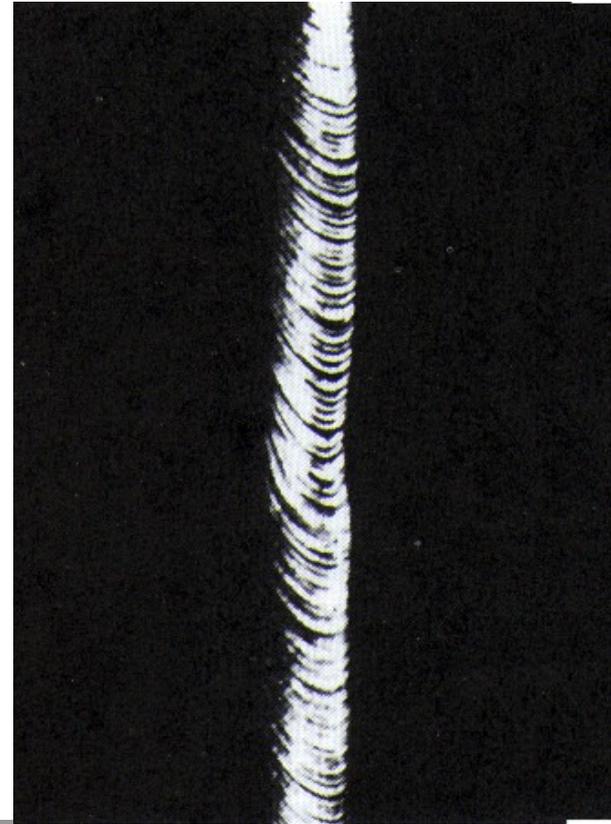


# Mecanismos de deformação plástica

## PMT 2200 - Ciência dos Materiais

Prof. Hélio Goldenstein  
Prof. Cláudio Geraldo Schön



# Roteiro da Aula

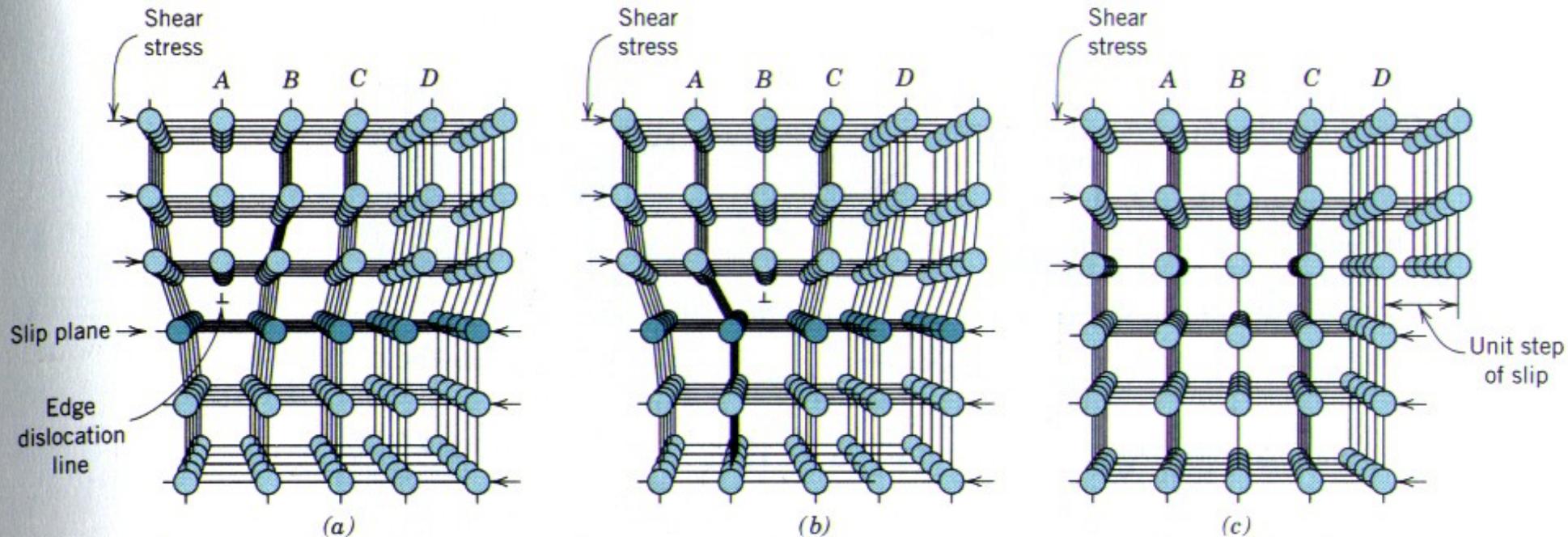
- ◆ Deformação plástica de metais
  - Revendo discordâncias
  - Sistemas de escorregamento
  - Deformação plástica em monocristais
  - Deformação plástica em policristais
  - Mecanismos de endurecimento
- ◆ Deformação plástica em materiais amorfos e semi-cristalinos
  - Deformação plástica em vidros metálicos
  - Deformação plástica em polímeros

# O Comportamento Dúctil em Metais

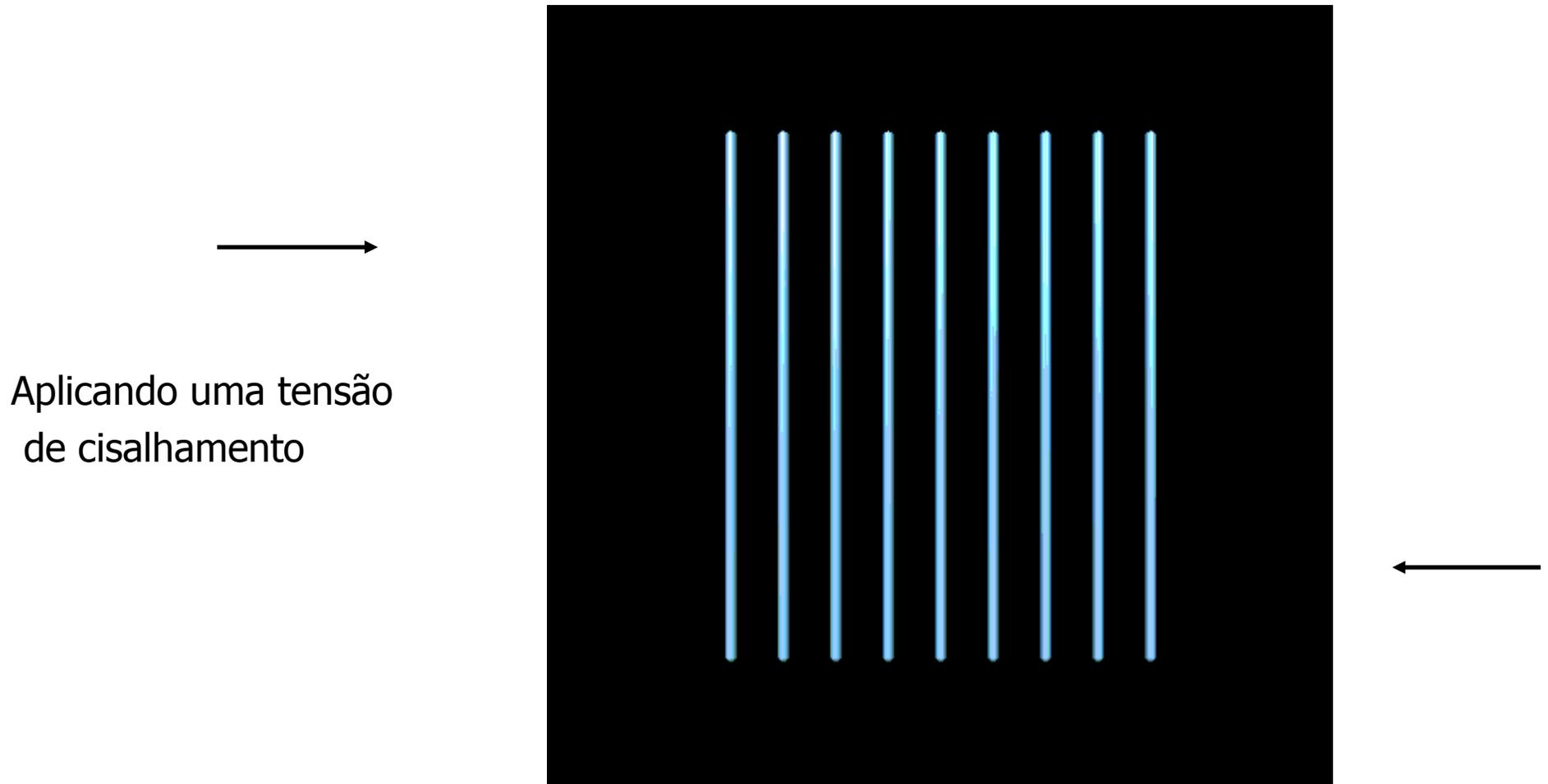
- ◆ Quando submetidos a tensões maiores do que o limite de escoamento os materiais dúcteis se deformam e eventualmente fraturam.
- ◆ O mecanismo de deformação na maioria dos materiais envolve o cisalhamento de algumas porções do material com relação as outras. Nos materiais cristalinos isso se dá ao longo de determinados planos atômicos (geralmente o mais compacto).
- ◆ Os cálculos teóricos para se determinar a tensão necessária para cisalhar um cristal pelo escorregamento simultâneo de todos os átomos de um plano compacto fornecem valores de tensão entre 20 e 100 GPa; estas tensões são várias ordens de grandeza maiores que as observadas experimentalmente.
- ◆ A busca de uma explicação para esse aparente paradoxo levou à descoberta das discordâncias no início do século XX.

# Relembrando: Discordâncias

- ◆ Rearranjo atômico que acompanha o movimento de uma discordância em resposta a uma tensão de cisalhamento.
  - Formação de degraus na superfície de um cristal pela movimentação de discordâncias.



# Nucleação e deslizamento de discordância em cunha

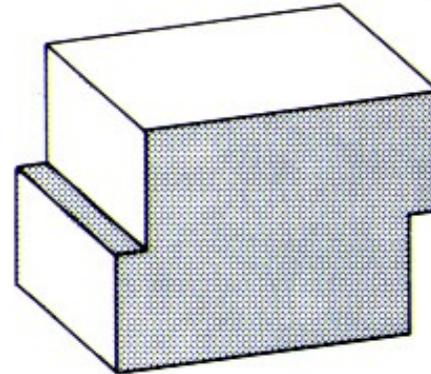
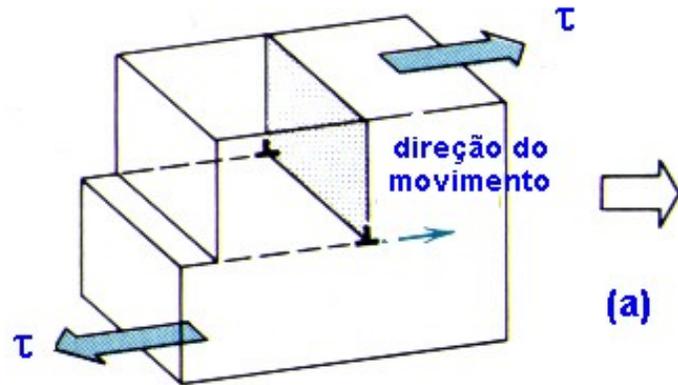


# Modelo de discordâncias em conjunto de bolhas (de sabão) sob tensão

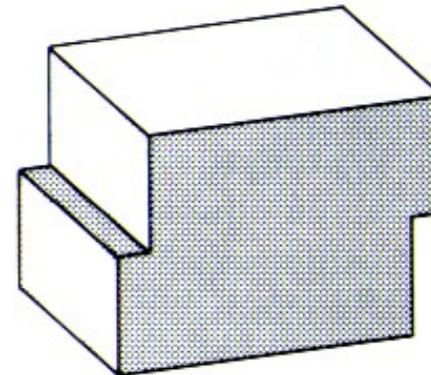
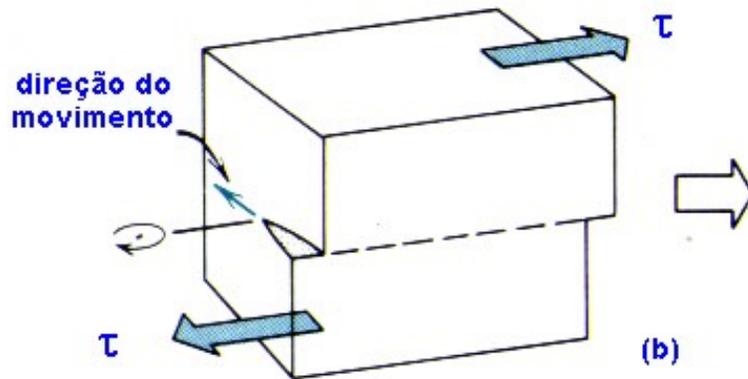
Filme das bolhas

Filme pode ser baixado do moodle

# Relembrando: Discordâncias

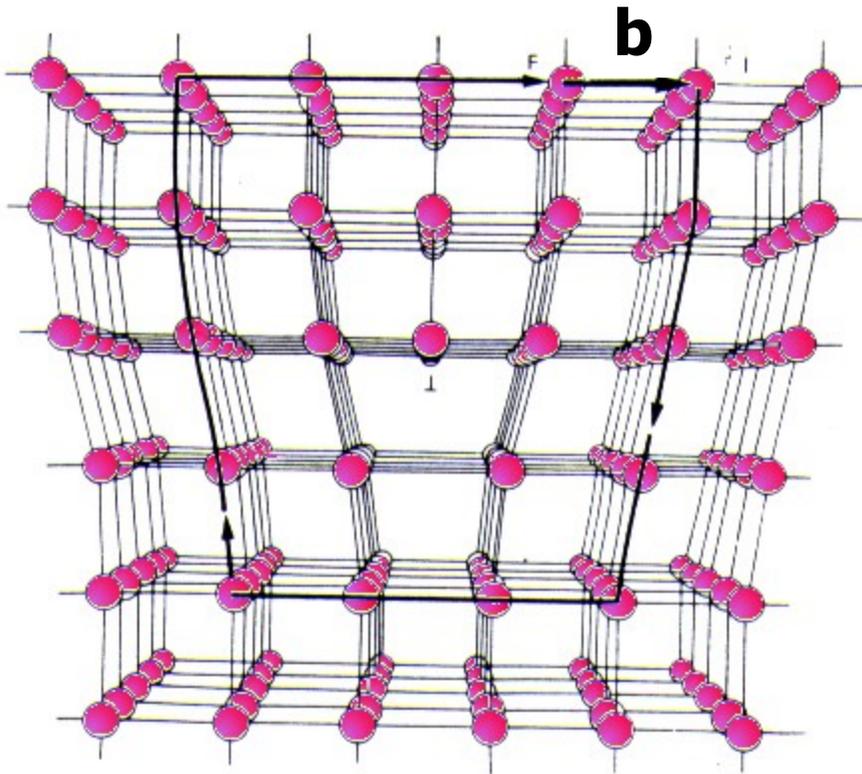


**(a) discordância em cunha: a linha de discordância move-se na direção paralela da tensão aplicada.**



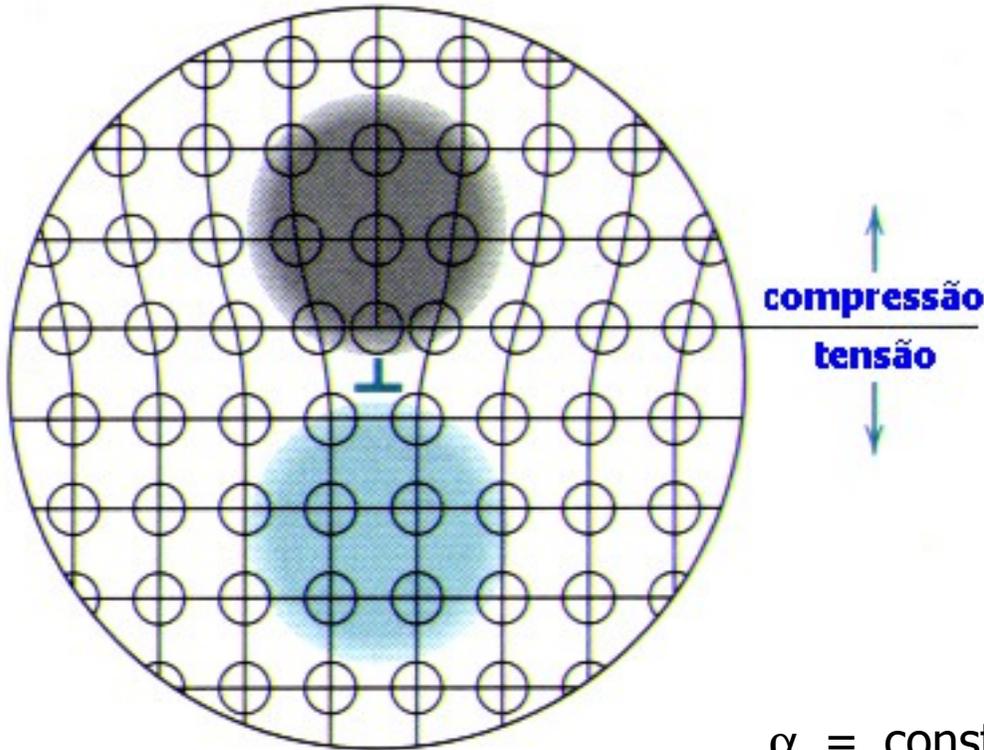
**(b) discordância em hélice: a linha de discordância move-se na direção perpendicular à tensão aplicada**

# Características das Discordâncias



- ◆ Uma discordância pode ser descrita pelo vetor de Burgers e pela direção da sua linha. O vetor de Burgers é obtido através do circuito de Burgers (linha escura na figura).
- ◆ O vetor de Burgers dá a magnitude e a direção da deformação resultante da passagem da discordância por um cristal.
- ◆ Um cristal contendo uma discordância tem energia maior (mais positiva) que um cristal perfeito.

# Características das Discordâncias



- A maior parte ( $\sim 90\%$ ) da energia da discordância está associada à deformação elástica do reticulado. A figura a lado mostra as regiões sob tração e compressão em torno de uma discordância em cunha.

- ◆ A energia elástica total ( $E_{tot}$ ) associada a qualquer tipo de discordância pode ser calculada e segue a expressão genérica:

$$E_{tot} \simeq \alpha l G b^2$$

$\alpha$  = constante que depende do caráter da discordância (hélice, cunha ou mista)

$l$  = comprimento da linha de discordância

$G$  = módulo de cisalhamento do cristal

$b$  = módulo do vetor de Burgers

# Reação entre discordâncias

- ◆ Como visto, a energia de uma discordância é proporcional ao quadrado do módulo do vetor de Burgers
- ◆ Duas discordâncias podem reagir, dando origem a uma terceira discordância:

$$\vec{b}_1 + \vec{b}_2 \rightarrow \vec{b}_3$$

- Se  $|\vec{b}_3|^2 < |\vec{b}_1|^2 + |\vec{b}_2|^2$  a reação produzirá uma redução da energia do cristal e, portanto, poderá ocorrer
- Exemplo (CFC, parâmetro de rede  $a_0$ ):  $\vec{b}_1 = \frac{a_0}{2}[0\ 1\ \bar{1}]$ ,  $\vec{b}_2 = \frac{a_0}{2}[1\ 0\ 1]$

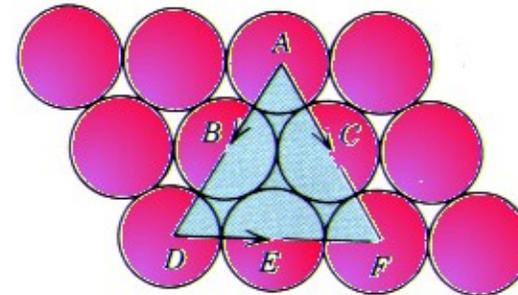
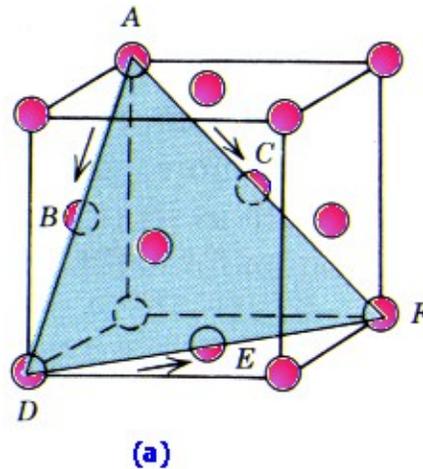
$$\vec{b}_3 = \vec{b}_1 + \vec{b}_2 = \frac{a_0}{2}[1\ 1\ 0]$$

# aviso

- ◆ Este conjunto de transparências pode ser obtido pelo Moodle.
- ◆ Alguém ainda não está cadastrado no moodle?
- ◆ Só 106 alunos fizeram o 1o teste, em 3/3 apenas 113 alunos estão inscritos na disciplina (de 129 matriculados).
- ◆ 1a Plenária é dia 17/3, no **anfiteatro (recém reformado) do PMT**.
- ◆ Dia 22 é a primeira aula sobre fratura.

# Sistemas de Escorregamento

- ◆ Discordâncias não se movem, mas “escorregam”, em planos e direções bem definidos. A combinação de um plano e uma direção de escorregamento é chamado de **sistema de escorregamento**.
- ◆ A figura abaixo mostra o sistema de escorregamento  $(111) \langle 110 \rangle$  em um cristal CFC. Em cada plano  $\{111\}$  existem três direções possíveis  $\langle 110 \rangle$  de escorregamento (b). Os cristais cúbicos apresentam muitos sistemas de escorregamento. Outros, como os hexagonais, apresentam menos opções (mas não são necessariamente frágeis).



# Equações fundamentais

$$\bar{v} = K_1 \sigma^n \exp \left[ -\frac{Q}{k_B T} \right]$$

Velocidade média das discordâncias  
 $K_1 > 0$  e  $n > 1$  são constantes,  $\sigma$  é a tensão aplicada e  $Q$  é a energia de ativação do processo de deformação plástica.

$$\dot{\varepsilon} = \rho \vec{b} \bar{v}$$

Equação de Orowan: relaciona a taxa de deformação à densidade de discordâncias, ao seu vetor de Burgers e à sua velocidade média.

$$\sigma = \sigma_0 + \alpha_T G |b| \sqrt{\rho}$$

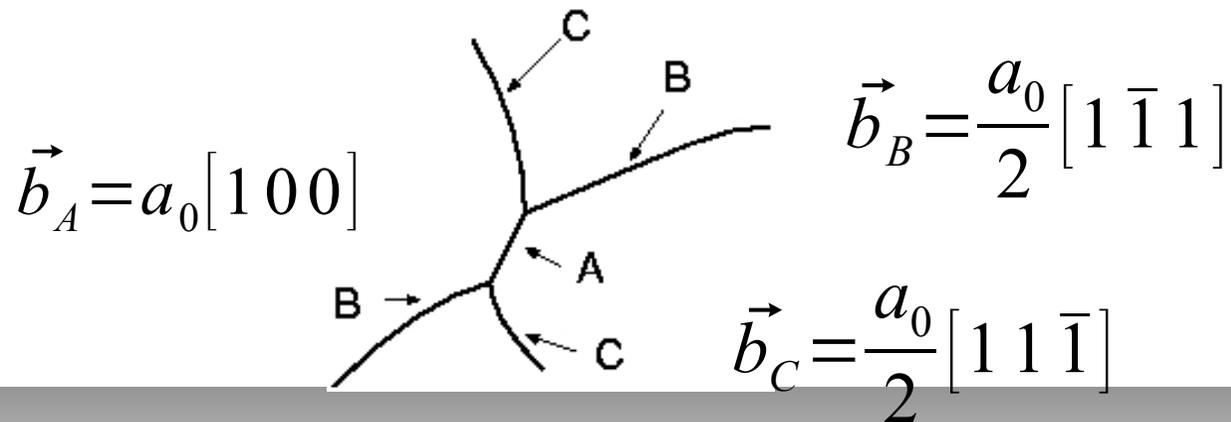
Equação de Taylor: relaciona a tensão aplicada à densidade de discordâncias ( $\sigma_0$  é o atrito intrínseco do reticulado,  $\alpha_T$  é uma constante dependente do material e  $G$  é o módulo da cisalhamento).

# Discordâncias móveis (glísseis) e imóveis (sésseis)

- ◆ Uma condição necessária para que uma discordância possa se mover é que seu vetor de Burgers esteja contido no plano de escorregamento. Discordâncias que obedecem esta restrição são ditas discordâncias “glísseis”.
- ◆ Em alguns casos uma discordância pode ser levada para fora de seu plano de escorregamento (por exemplo, devido a uma reação), neste caso ela fica imobilizada e é dita “sésil”.
- ◆ O vetor de Burgers de uma discordância pertencerá a um dado plano de escorregamento se o produto escalar deste vetor pelo vetor da normal do plano se anular.

# exercício

- ◆ **Dois pesquisadores (B. K. Kad e J. L. Horton, *Mater. Sci. Eng.* A239-240, 1997, p. 118) investigaram a estrutura de discordâncias produzidas na deformação a 800 oC de uma liga de ferro contendo 28 % atômico de alumínio (estrutura cristalina CCC com parâmetro de rede  $a_0$ ).** Estes autores identificaram por meio da técnica de microscopia eletrônica de transmissão (MET) configurações de discordâncias como a representada na Figura abaixo. Por meio de um procedimento experimental específico desta técnica microscópica (que não vem ao caso aqui) os autores identificaram os vetores de Burgers de cada segmento indicado, sendo que os segmentos marcados pelas letras A, B e C possuem vetor de Burgers dados abaixo. Esta configuração corresponde a um estágio intermediário de uma reação envolvendo a discordância A e as discordâncias B + C no ponto onde os três trechos se encontram. A configuração apresentada na figura surge da interrupção da reação pelo resfriamento rápido do material após o fim da deformação plástica (isto é uma afirmação), porém o sentido da reação (ou seja, se  $A \rightarrow B + C$  ou  $B + C \rightarrow A$ ) não pode ser determinado apenas pela análise da figura. Com base nestas informações e no que você aprendeu, determine:
  - O sentido da reação, tal que a energia elástica do produto seja menor que a do reagente.
  - Suponha que as discordâncias deslizam em (011). Prove que os três trechos indicados na figura serão glísseis (móveis) neste plano.



# Barreira de Lomer-Cottrell

Considere duas discordâncias:  $\vec{b}_1 = \frac{a_0}{2} [0\ 1\ \bar{1}]$ ,  $\vec{b}_2 = \frac{a_0}{2} [1\ 0\ 1]$

Deslizando respectivamente nos planos  $(1\ 1\ 1)$  e  $(1\ 1\ \bar{1})$

que reagem na intersecção dos planos para formar

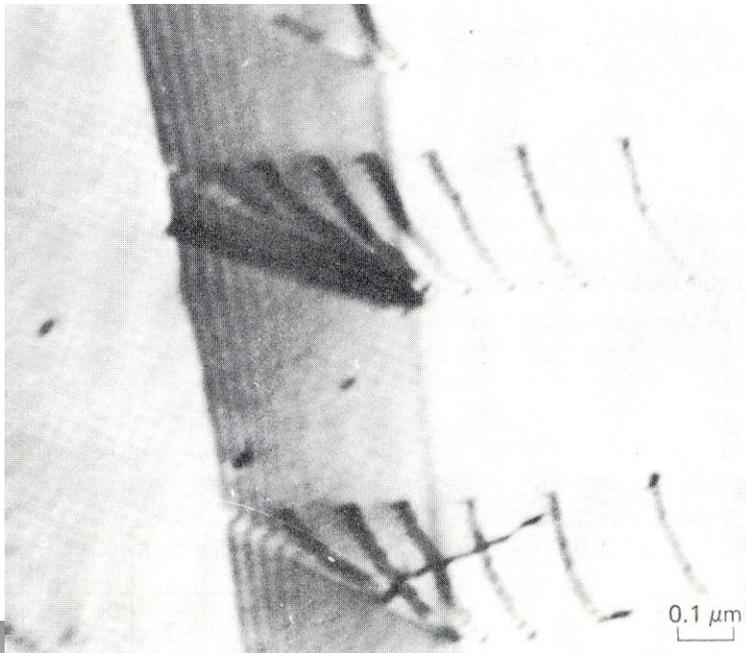
$$\vec{b}_3 = \vec{b}_1 + \vec{b}_2 = \frac{a_0}{2} [1\ 1\ 0]$$

É fácil verificar que o produto da reação não será glíssil em nenhum dos dois planos de escorregamento. Se a reação ocorrer, portanto, a discordância ficará imobilizada → não migra para a superfície → aumento de  $\rho$  → **Encruamento**

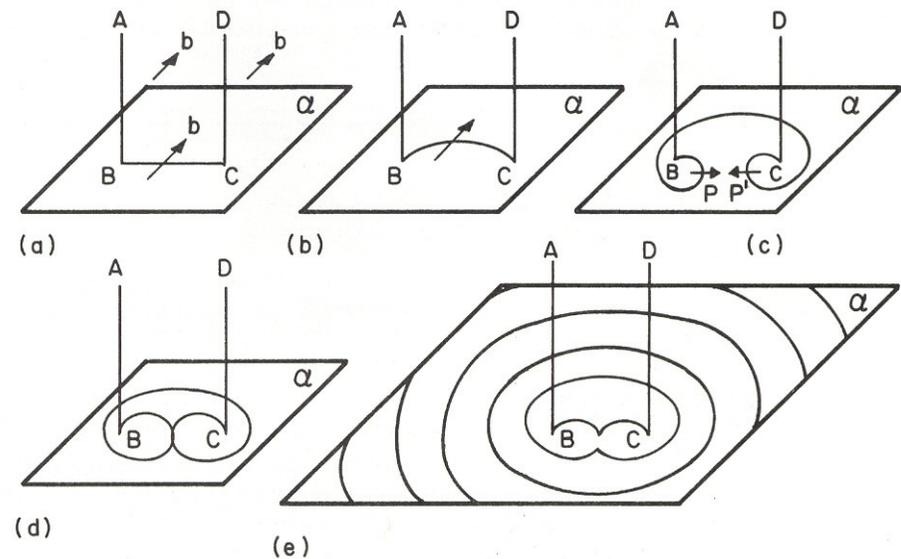
# Multiplicação de discordâncias

- ◆ Experimentalmente observa-se que a densidade de discordâncias aumenta com a deformação plástica → Multiplicação de discordâncias

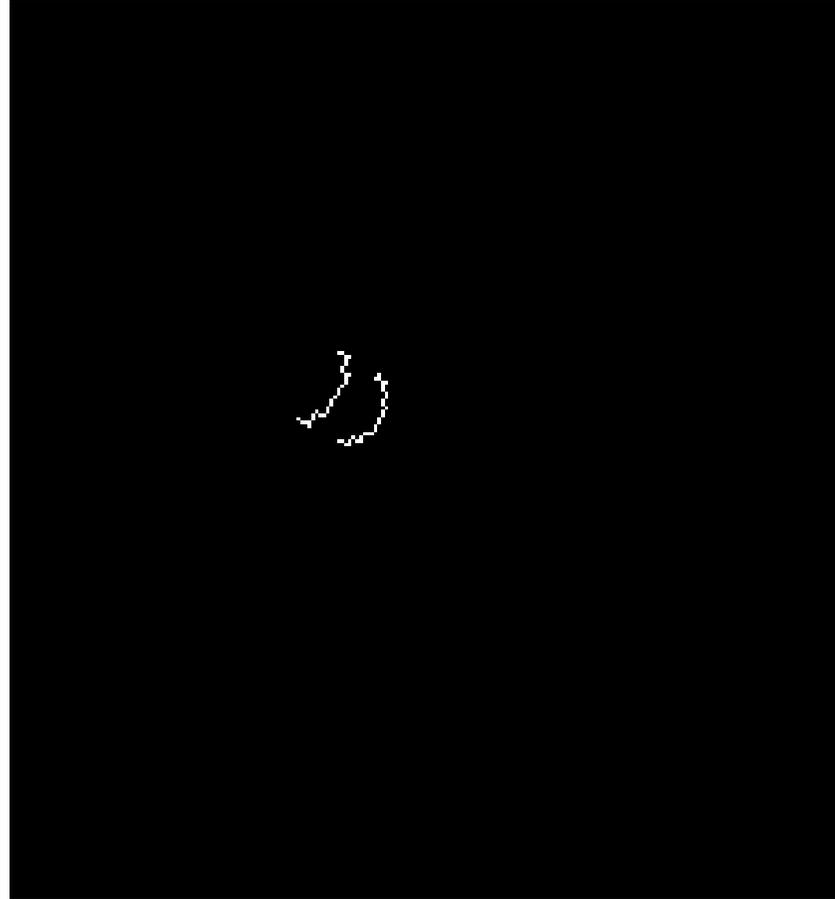
Fonte em Contorno de Grão (MET)



Fonte de Frank-Read



# Fonte de Frank Read



# Filme mostrando deslizamento de discordâncias

<http://www.youtube.com/watch?v=9UeRrZFR5k&feature=related>

Filme feito em microscópio eletrônico de transmissão  
mostrando uma fonte de Frank-Read em operação  
Amostra de um aço inoxidável em deformação plástica durante a obtenção da imagem

# Deslizamento com desvio ("cross slip")

- ◆ Em algumas circunstâncias discordâncias imobilizadas por barreiras (como a de Lomer-Cottrell) ou precipitados podem se libertar destes obstáculos mudando de plano de escorregamento. Este fenômeno é denominado deslizamento com desvio (em inglês, "cross slip").

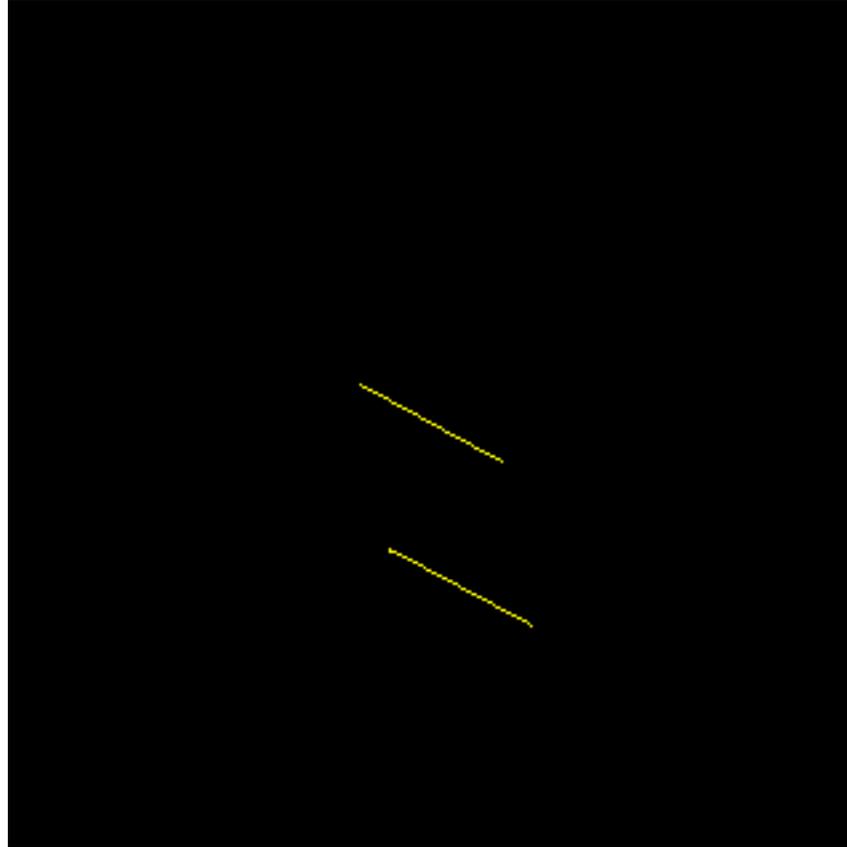
Exemplo:

A discordância  $\vec{b} = \frac{a_0}{2} [01 \bar{1}]$  em um cristal CFC pode escorregar

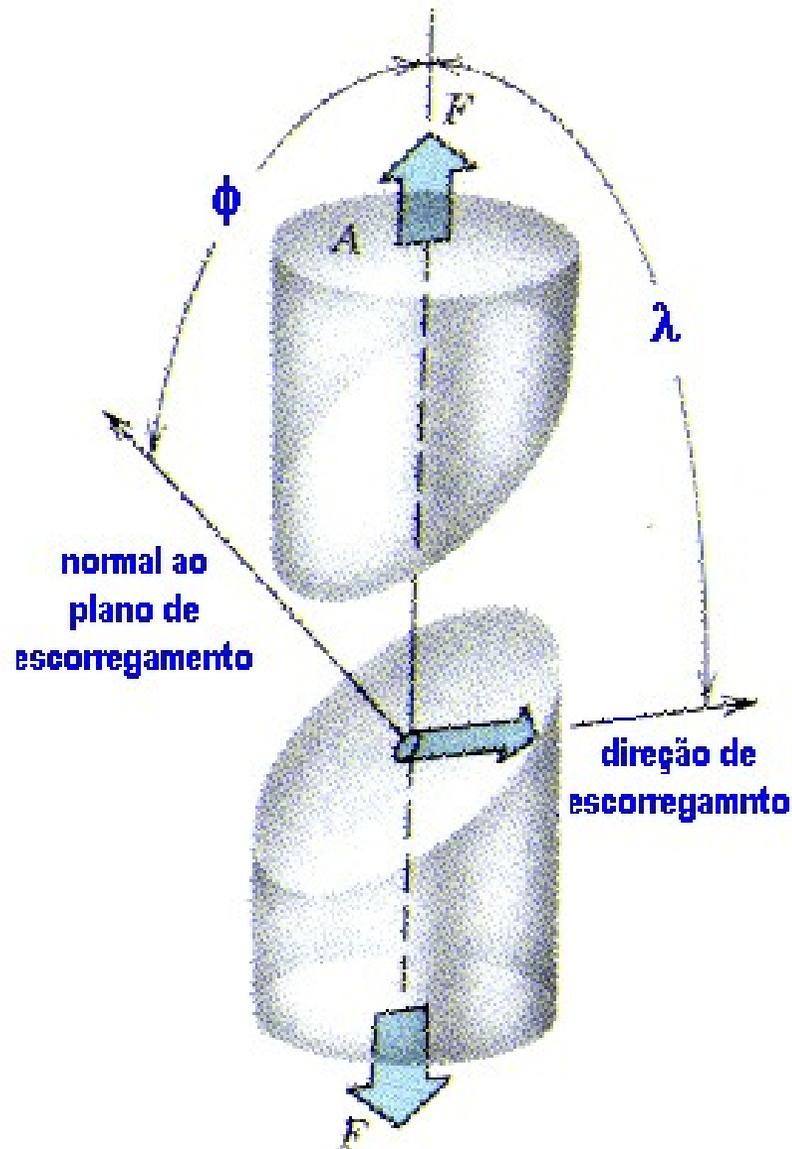
tanto no plano  $(111)$ , quanto no plano  $(\bar{1}11)$ .

Apenas discordâncias em hélice podem realizar deslizamento com desvio pois o vetor de Burgers precisa ser paralelo à linha da discordância (por quê?).

# Deslizamento com desvio



# Tensão necessária para o escorregamento em monocristais



- ◆ Para cada tensão externa (tração ou compressão) aplicada a um cristal podemos calcular uma componente de cisalhamento agindo em um dado sistema de escorregamento deste cristal. Esta componente é dada por

$$\tau = \sigma \cos \phi \cos \lambda$$

- ◆ A componente de cisalhamento é máxima quando a tensão  $\sigma$  aplicada está a  $45^\circ$  do plano e da direção de escorregamento ( $\phi = \lambda = 45^\circ$ ) e é zero quando ( $\phi = 0^\circ$  ou  $90^\circ$ )  $\Rightarrow$  ( $\lambda = 90^\circ$  ou  $0^\circ$ ).

# Lei de Schmid

A discordância irá deslizar caso  $\tau > \tau_{\text{CRSS}}$  (CRSS = “Critical resolved shear stress” ou tensão de cisalhamento projetada crítica), sendo esta última uma propriedade do sistema de escorregamento.

Nota: A Lei de Schmid é observada em diversos sistemas, notadamente metais HCP e CFC, porém desvios podem ser observados, por exemplo:

- Quando mais de um sistema de escorregamento é ativado logo no início da deformação plástica.
- Quando maclação mecânica é ativada logo no início da deformação plástica
- Em alguns metais CCC devido a particularidades da estrutura das discordâncias.

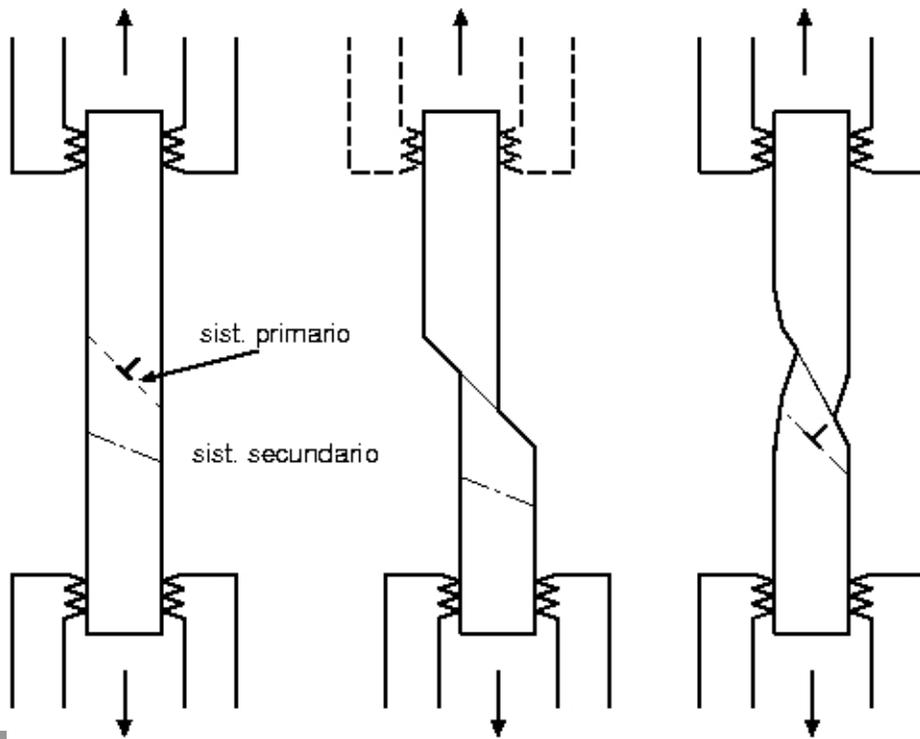
# Fim da parte 1

# Exercício

- ◆ a prata tem estrutura CFC e deforma pelo sistema  $\langle 110 \rangle \{111\}$ . Prata contendo 99,99% de pureza, tem  $\tau_{\text{CRSS}} = 48 \text{ g/mm}^2$  e prata com 99,93% de pureza,  $\tau_{\text{CRSS}} = 131 \text{ g/mm}^2$  ( $1 \text{ Kg/mm}^2 = 9,806 \text{ N/mm}^2 = 9,806 \text{ MPa}$ ). Com base nestas informações responda:
  - ◆ a. Qual o fator responsável pelo aumento da resistência da prata quando seu grau de pureza é reduzido?
  - ◆ b. Suponha que ensaiemos um monocristal de Ag de 99,99% de pureza orientado ao longo da direção  $[125]$ , qual será seu limite de escoamento estimado, se foi constatado por microscopia eletrônica que a direção do vetor de Burgers da discordância ativada é  $[101]$ ?
- ◆ Dica: lembre-se do conceito de cosseno diretor entre dois vetores (AlgeLin)!

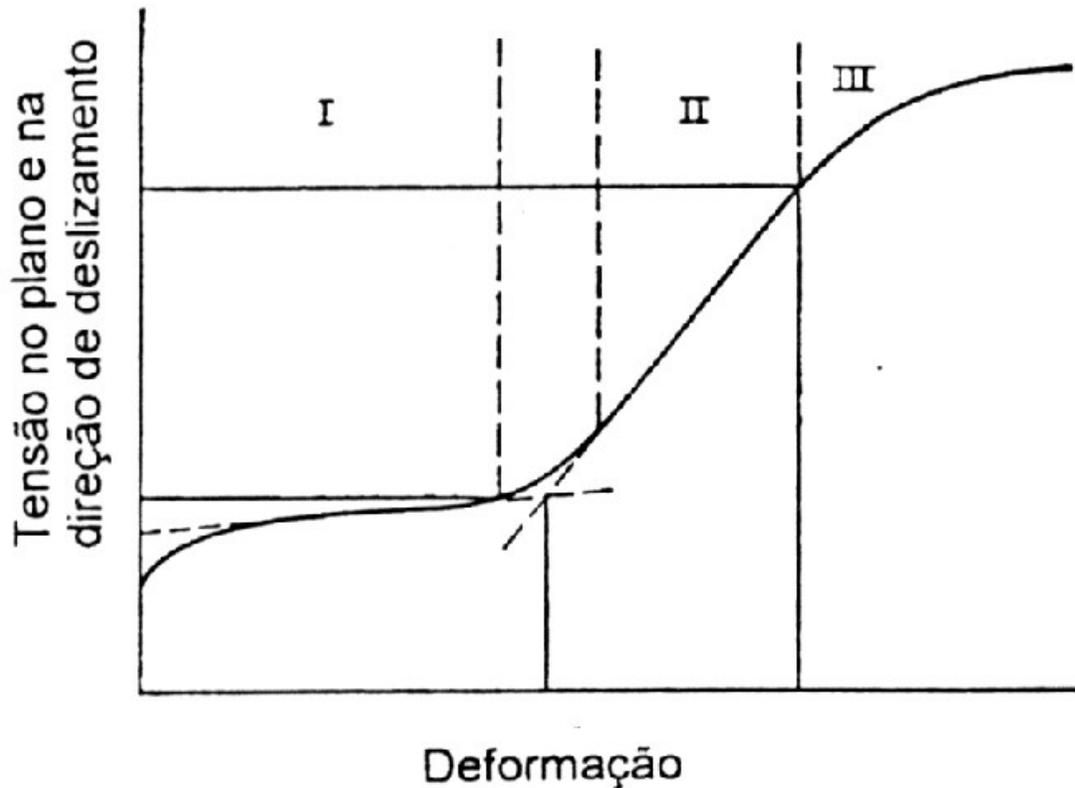
# Rotação do reticulado

Com o progresso da deformação plástica a orientação do monocristal se altera (o reticulado “roda” no espaço):



- Mesmo que o cristal esteja orientado de tal forma a ativar apenas um sistema de escorregamento no início da deformação plástica (→ monodeslizamento), o progresso da mesma irá orientar favoravelmente outros sistemas, ativando-os (→ polideslizamento → encruamento).
- Em um material policristalino esta rotação ocorre em cada grão e resulta em uma redistribuição das orientações cristalinas dos mesmos → textura cristalográfica.

# Deformação Plástica de Monocristal CFC



- ♦ **O estágio I** - estágio de deslizamento fácil ("easy glide"). As discordâncias praticamente não encontram obstáculos ao escorregamento. Apenas um sistema é ativado. Taxa de encruamento muito baixa.
- ♦ **O estágio II** - endurecimento linear. Outros sistemas de escorregamento são ativados e ocorre interação entre discordâncias formando emaranhados ("tangles") que provocam encruamento. Aqui se forma a subestrutura de células, com uma escala cada vez menor.
- ♦ **O estágio III** - endurecimento parabólico. Neste estágio ocorre escorregamento com desvio ("cross slip"), em que discordâncias mudam de sistema de escorregamento. A escala da estrutura de células permanece inalterada.

# Deformação Plástica em Policristais

- ◆ Na deformação plástica de um policristal cada grão deve sofrer localmente a mesma deformação macroscópica que os seus vizinhos. Caso contrário o material fratura ao longo do contorno de grão. Para que isto ocorra diversos sistemas de escorregamento devem ser ativados ao mesmo tempo (estimado em pelo menos 5). Por este motivo a deformação já se inicia no estágio II e caminha rapidamente para o estágio III.
- ◆ Policristais são mais resistentes do que monocristais: além da necessidade de deformação simultânea de grãos com diferentes orientações, os contornos de grãos agem como barreiras para a movimentação das discordâncias. Por este motivo um material de grãos finos é mais duro e mais resistente do que o mesmo material com grãos grosseiros. Esta propriedade é descrita pela relação de Hall-Petch:

$$\sigma_e = \sigma_0 + k d^{-\frac{1}{2}}$$

onde  $\sigma_e$  é o limite de escoamento,  $\sigma_0$ ,  $k$  são constantes do material e  $d$  é o tamanho médio dos grãos.

# Discordâncias e contornos de grão

Constata-se que o LE  
É inversamente proporcional  
À raiz quadrada do  
Tamanho de grão,  
Para muitos materiais.

Quanto menor TG,  
Maior a resistência.

Hall e Petch propuseram  
Modelo explicativo

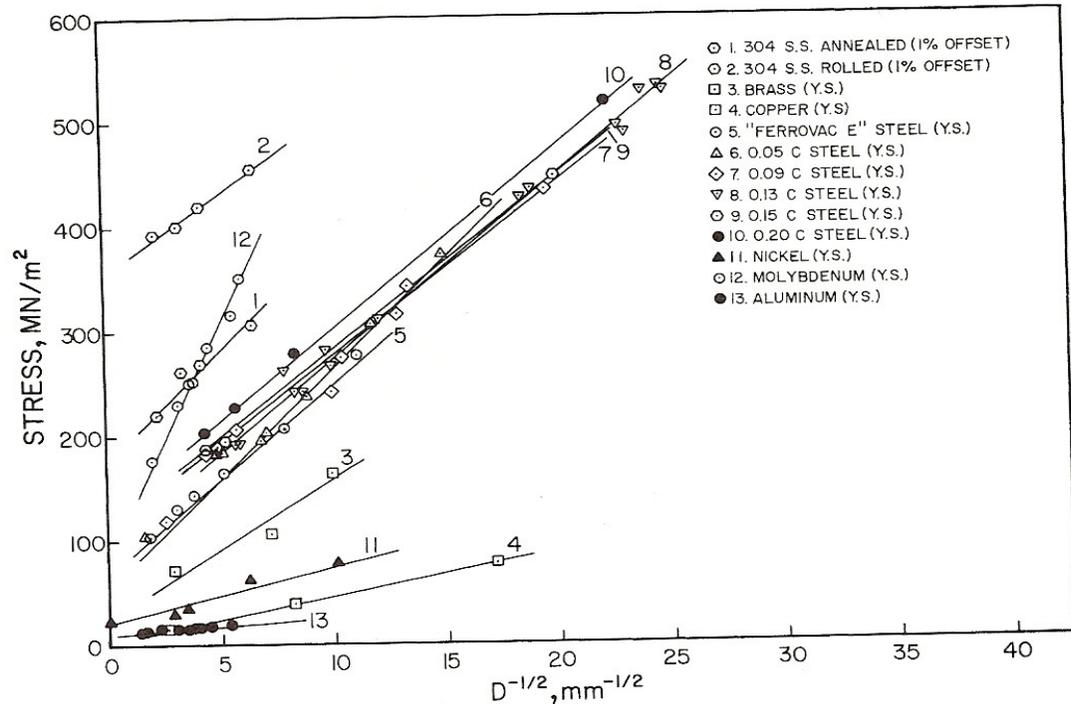


Figure 5.20 Hall-Petch plot for a number of metals and alloys.

$$\sigma(\epsilon) = \sigma_0(\epsilon) + k(\epsilon) d^{-1/2}$$

# Endurecimento por Encruamento

- ◆ Todos mecanismos de endurecimento colocam obstáculos à movimentação das discordâncias. O endurecimento por deformação (“strain hardening”) ou encruamento é o endurecimento observado nos metais devido à própria deformação plástica.
- ◆ Os obstáculos ao movimento de discordâncias neste caso são as próprias discordâncias que vão sendo criadas com o processo de deformação. Durante a deformação as discordâncias movimentam-se, multiplicando-se e interagindo entre si; adquirindo degraus e formando emaranhados e assim ficando bloqueadas.
- ◆ A equação de Taylor é uma tentativa de quantificar o fenômeno:

$$\sigma = \sigma_0 + \alpha_T G |b| \sqrt{\rho}$$

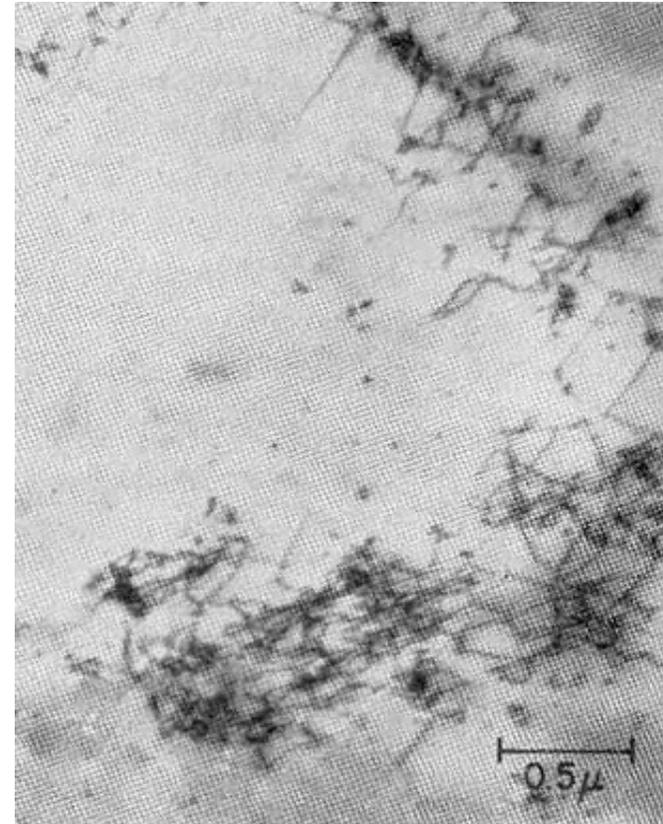
Onde  $\sigma_0$ ,  $\alpha_T$  são constantes,  $G$  é o módulo de cisalhamento e  $\rho$  é a densidade de discordâncias (em  $\text{cm}/\text{cm}^3$ ).

## Concentração de discordâncias x deformação plástica



e com 1% deformação: Emaranhados de discordâncias

$3 \cdot 10^9$  cm/cm<sup>3</sup> de discordâncias



Fe com 3,5% deformação

$6 \cdot 10^9$  cm/cm<sup>3</sup> de discordâncias

# discordâncias



Células de discordâncias com 9% e 20% de deformação  
13 e 23 \*10<sup>9</sup> cm/cm<sup>3</sup> de discordâncias

# Exercício: cálculo de densidade de discord

Assumir que, para ser transparente aos elétrons, a espessura da lâmina fina deve ser da ordem de 100nm



$3 \cdot 10^9 \text{ cm/cm}^3$  de discordâncias

# Fator de Taylor

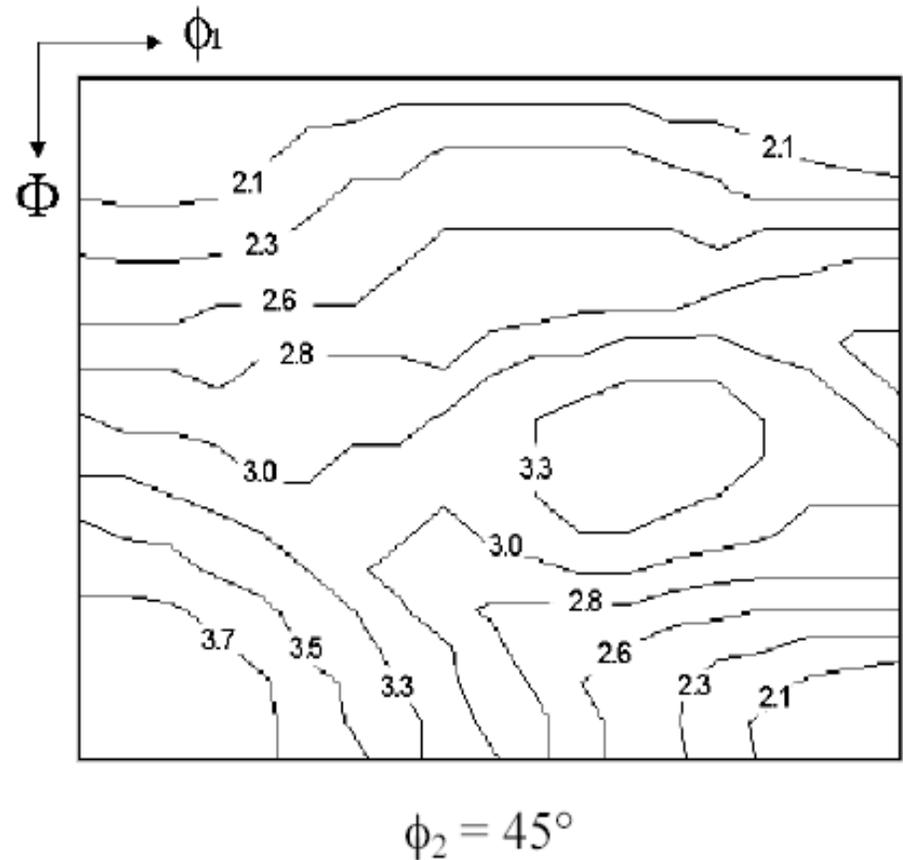
- ◆ Nos policristais, o encruamento não é igual em todos os grãos.
- ◆ O fator de Taylor  $M$  é um parâmetro do grau de encruamento para cada orientação: baseia-se no cálculo da quantidade de deformação por cisalhamento ( $\gamma$ ) necessária para produzir certa deformação por tração ( $\epsilon$ ):

$$\sigma = M\tau_c \therefore M = \frac{\sum \delta\gamma}{\delta\epsilon_x}$$

- ◆ Em materiais CCC o fator de Taylor varia de 2 a 3,6, dependendo da relação entre a direção de aplicação da carga e a direção cristalina, resultando em encruamentos diferentes de grão a grão.

# Taylor no espaço de Euler

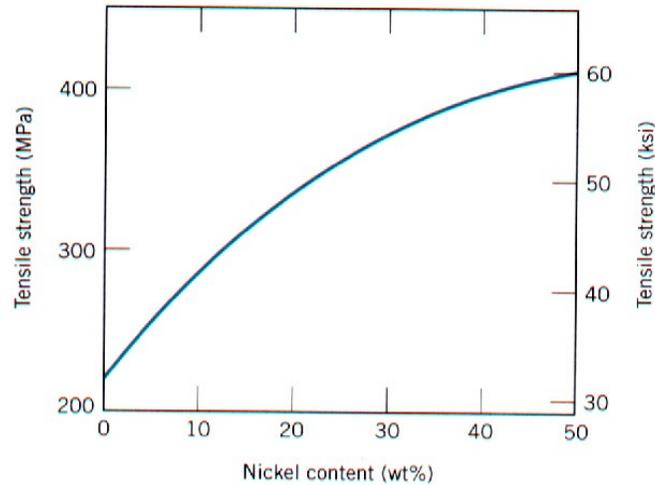
- ◆ É possível representar a variação do fator de Taylor para as diferentes orientações, usando os cortes do espaço de Euler.
- ◆ Fator de Taylor (aula 2)  
$$M = \Sigma \mathbf{v} / \epsilon$$
- ◆ Prevê máximo encruamento ( $M_{\max}$ ) para orientações próximas a  $\{110\}\langle 110\rangle$



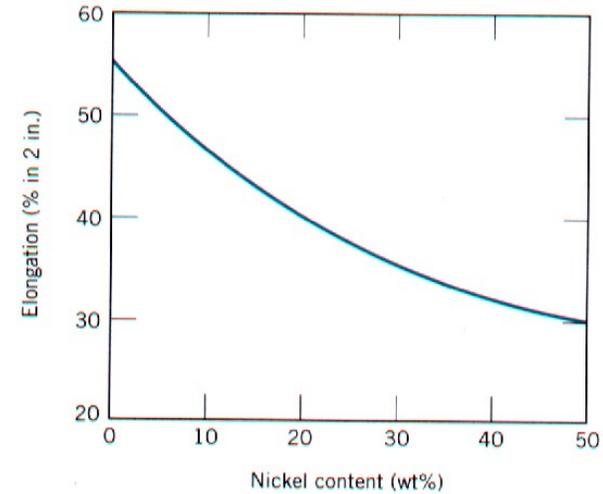
# Endurecimento por solução sólida

- ◆ A introdução de solutos substitucionais e intersticiais provoca aumento da resistência mecânica.
- ◆ Os átomos de soluto provocam tensões elásticas no reticulado devido à diferença dos raios atômicos. As discordâncias interagem fortemente com estes campos elásticos e, desta forma, tem seu movimento restringido.
- ◆ Lacunas, neste sentido, também podem ser consideradas como “solutos” já que também provocam distorções elásticas no reticulado e, portanto, endurecimento.

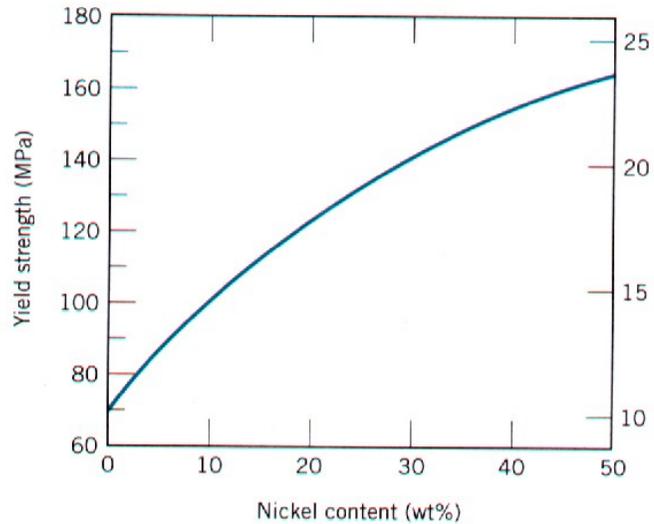
# Endurecimento por solução sólida



(a)



(c)



(b)

Efeito do teor de Ni em liga Cu-Ni

- a) no limite de resistência
- b) no limite do escoamento
- c) na ductilidade (% alongamento)

# Endurecimento por solução sólida

- ◆ A interação elástica entre o soluto e a discordância é aproximadamente proporcional à deformação produzida pelo soluto no reticulado. Este fator pode ser descrito pelo parâmetro  $\delta$  definido como ( $a$  é o parâmetro de rede e  $c$  é a concentração do soluto):

$$\delta = \frac{1}{a} \frac{\partial a}{\partial c}$$

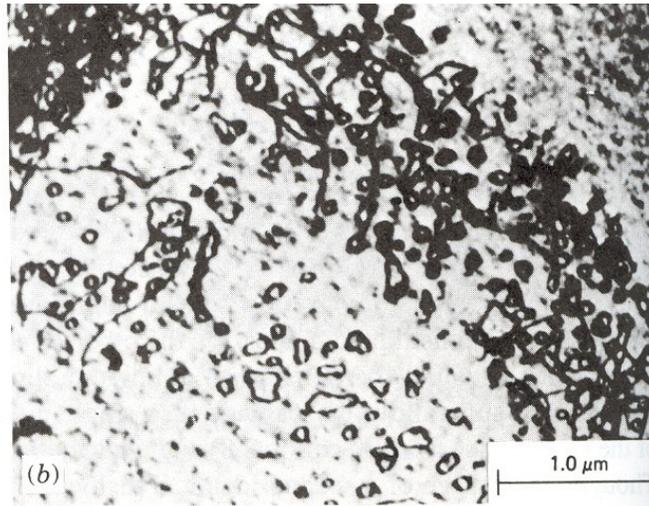
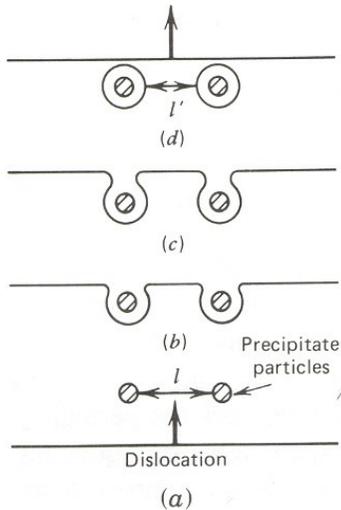
- A derivação de uma expressão para o incremento da resistência da liga em função da concentração é complexa e requer uma análise trabalhosa baseada na teoria da elasticidade. Uma expressão aproximada, entretanto, pode ser obtida para o caso de aços carbono (C dissolvido em Ferro CCC) e fornece:

$$\sigma = \sigma_0 + k\sqrt{c}$$

# Endurecimento por Dispersão de Partículas Incoerentes

## ◆ Mecanismo de Orowan

- As discordâncias não cortam o precipitado e necessitam se curvar aumentando o comprimento da linha de discordância.



- (a) Representação esquemática do mecanismo de Orowan (note a redução do espaçamento efetivo após a passagem da discordância).
- (b) Evidência de “loops” associados a partículas em liga Al-Li. MET

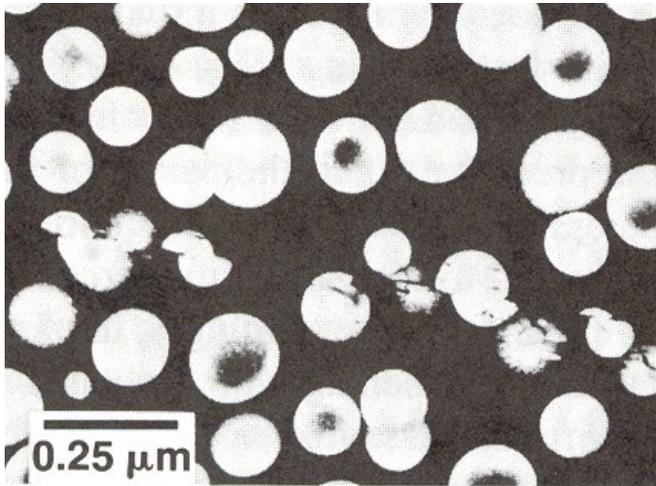
Equação de Orowan para endurecimento por dispersão de partículas:

$$\sigma = \sigma_0 + K G \frac{b}{\lambda}$$

onde  $\lambda$  é a distância média entre as partículas

# Endurecimento por Cisalhamento de Partículas Coerentes

Quando as discordâncias são capazes de cisalhar precipitados



A figura ao lado mostra uma imagem de MET em liga Al-Li com precipitados esféricos coerentes. O endurecimento é causado pelo aumento da área de interface causado pelo cisalhamento da partícula, criação de contornos de anti-fase em partículas ordenadas, tensões de coerência, diferença de módulo de elasticidade.

$$\sigma = \sigma_0 + K r^m (V_v)^n$$

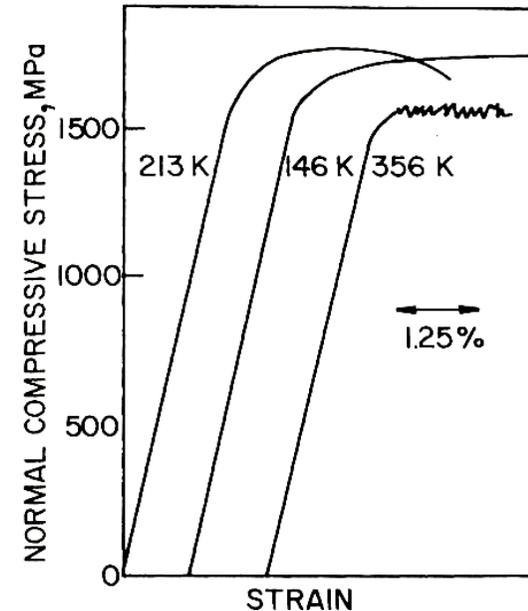
$K$ ,  $m$  e  $n$  são constantes positivas

$r$  é o raio dos precipitados

$V_v$  é a fração volumétrica de precipitados

# Deformação plástica em materiais amorfos

- ◆ Materiais amorfos nem sempre são frágeis. Eventualmente eles podem apresentar um considerável alongamento antes da ruptura. Um caso particularmente interessante é o dos vidros metálicos (ligas de baixo ponto de fusão que podem ser congeladas no estado vítreo usando-se uma velocidade de resfriamento ultra-rápida). Nestes materiais observa-se alongamentos muito elevados já que a estrição não se forma.



Curvas tensão-deformação de um metal amorfo (liga Pd<sub>77.5</sub>Cu<sub>6</sub>Si<sub>16.5</sub>) deformada a diferentes temperaturas

# Mecanismos de deformação em materiais amorfos

- ◆ Metais amorfos se deformam em regiões localizadas, orientadas ao longo da direção de máxima tensão de cisalhamento (aprox.  $45^\circ$  do eixo de tração ou de compressão). Estas regiões são conhecidas como “bandas de cisalhamento” (shear bands).

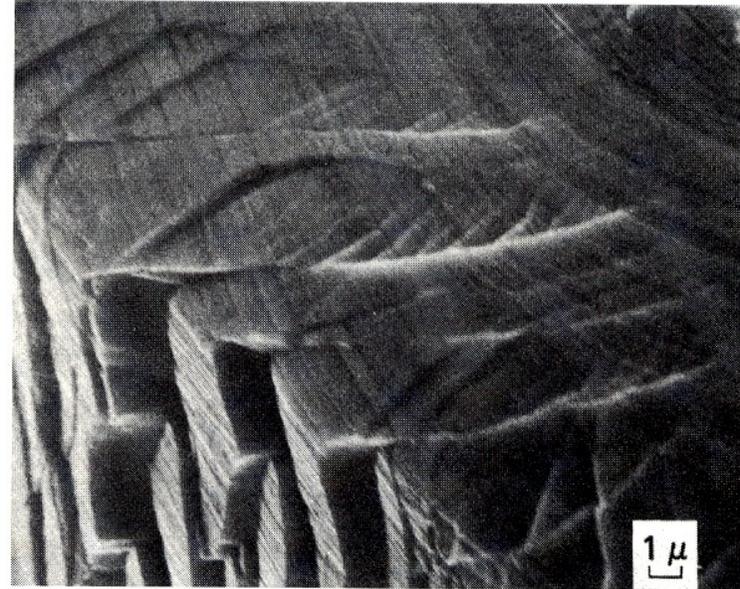
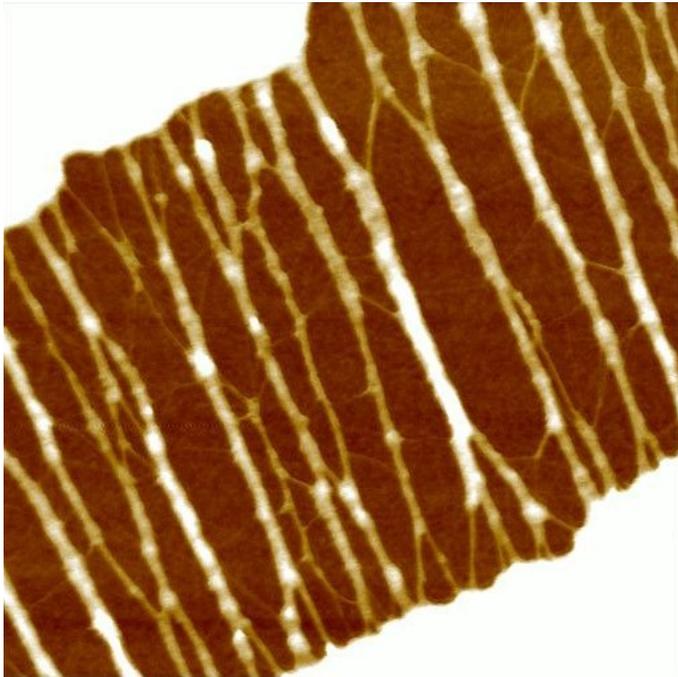


Imagem de microscopia eletrônica de varredura de fita de metal amorfo (liga  $\text{Ni}_{82.4}\text{Cr}_7\text{Fe}_3\text{Si}_{4.5}\text{B}_{3.1}$ ) deformada em tração, mostrando evidência de degraus nos pontos onde as bandas de cisalhamento intersectam a superfície.

# Mecanismos de deformação em polímeros

- ◆ Polímeros se caracterizam por longas cadeias moleculares. Isto se reflete nos modos de deformação, que se baseiam na reorientação das macromoléculas. Dois tipos principais (competitivos) em polímeros amorfos: bandas de cisalhamento e microfibrilamento (MFB ou "crazing" em inglês). Polímeros que se deformam por MFB são mais frágeis que polímeros que se deformam por bandas de cisalhamento.



A figura ao lado mostra uma trinca em uma membrana de filme fino polimérico (10 nm de espessura) mostrando uma configuração provavelmente similar a um MFB em amostra maciça. As duas faces da trinca são ligadas por fibrilas (compostas por cadeias alinhadas) de 0,5 nm de diâmetro. Portanto apenas poucas cadeias compõem cada fibrila!

Imagem de microscópio de força atômica, os lados da figura tem  $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ .

Fonte: Kari-Dalnoki-Veress

<http://www.physics.mcmasters.ca/crazing.html> acessado em 06/02/2003

# Estiramento a frio

- ◆ Polímeros semi-cristalinos formam um “pescoço” quanto solicitados em tração. Nesta região as cadeias poliméricas ficam alinhadas na direção de aplicação da força e o limite de resistência do material aumenta na mesma direção.
- ◆ Isto levou ao desenvolvimento de um processo chamado estiramento a frio (“cold drawing”), que tem por objetivo alinhar as cadeias poliméricas aumentando a resistência do polímero.
- ◆ Este processo é importante na confecção de fibras poliméricas resistentes (como no caso do Nylon, por exemplo).

# Referências

Padilha, A. F. “*Materiais de Engenharia: microestrutura e propriedades*” Ed. Hemus, São Paulo-SP, 1997

- Cap. 9 “Defeitos de linha (discordâncias), pp. 145-180

- Cap. 15 “Propriedades mecânicas”, pp. 251-260 (na biblioteca do PMT)

Eleno, L. T. F.; Schön, C. G. “*Deformação de vidros metálicos*” Boletim Técnico do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, número BT-PMT 03/03, 2003.

Callister      Cap 7. (não tem toda matéria).

# Sites interessantes

- ◆ <http://www.matter.org.uk/matscicdrom/manual/di.html>