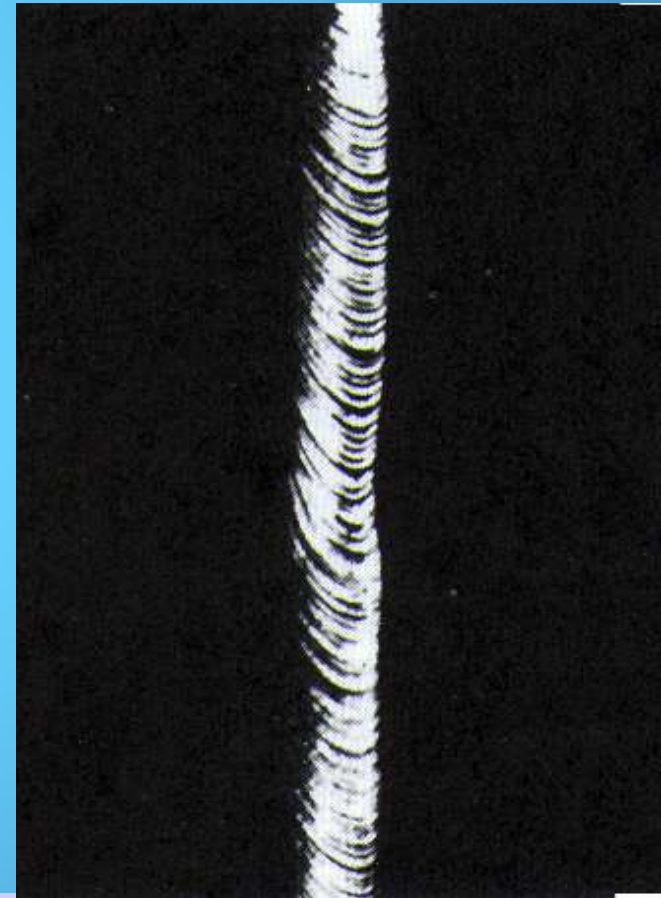


# Mecanismos de deformação plástica

## PMT 2200 - Ciência dos Materiais

Prof. Hélio Goldenstein  
Prof. Cláudio Geraldo Schön  
Prof. Eduardo Monlevade



# Por que estudar deformação plástica?

## ◆ Projeto Mecânico

- Elementos de construção de máquinas

## ◆ Projeto de estruturas

- Resistência dos materiais (vocês vão ter umas quatro disciplinas disso)

**NADA DEFORMA!!!!**

**NÃO**

**MESMO???**

# A DEFORMAÇÃO É IMPORTANTE EM

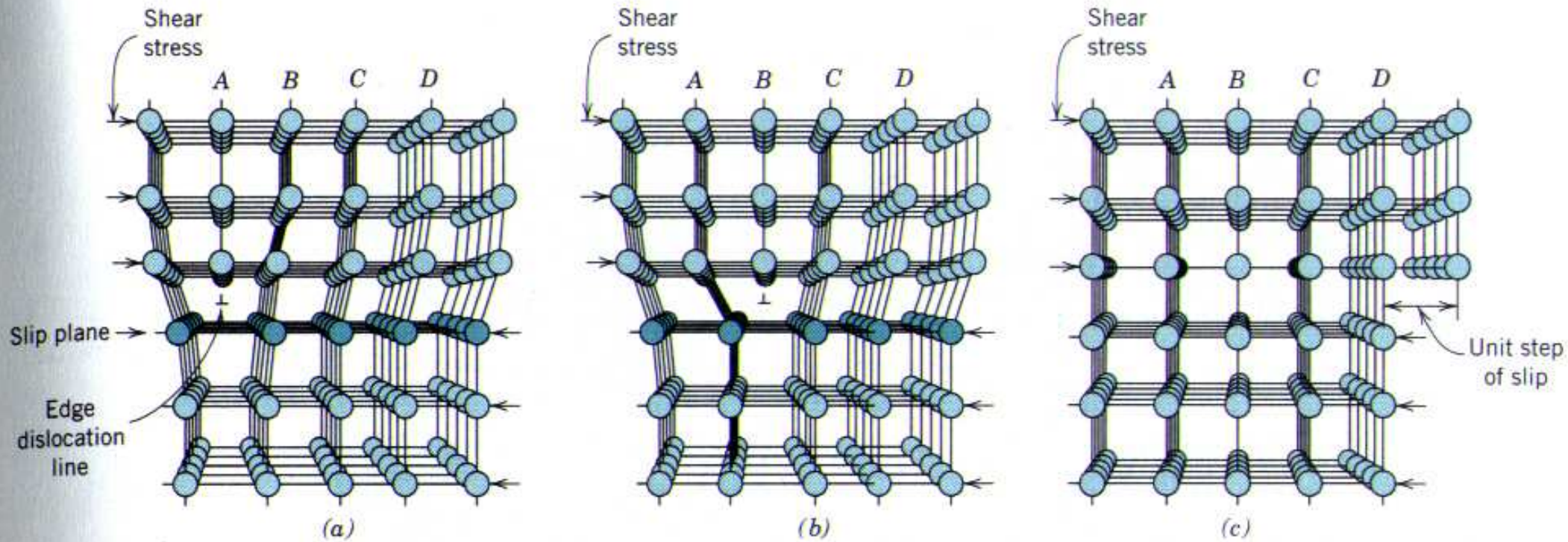
- ◆ Conformação de peças
  - Como transformar um lingote de aço em uma peça adequada para ser usada em um carro?
  - E o escoamento descontínuo?
- ◆ Uso inadequado ou solicitações inesperadas
  - O carro é feito para que cada vez mais energia seja dissipada durante um acidente
- ◆ Desgaste
  - Regiões que sofrem desgaste apresentam grande deformação plásticas
  - Ou você acha que as freadas de trens não afetam a roda nem o trilho?

# O Comportamento Dúctil em Metais

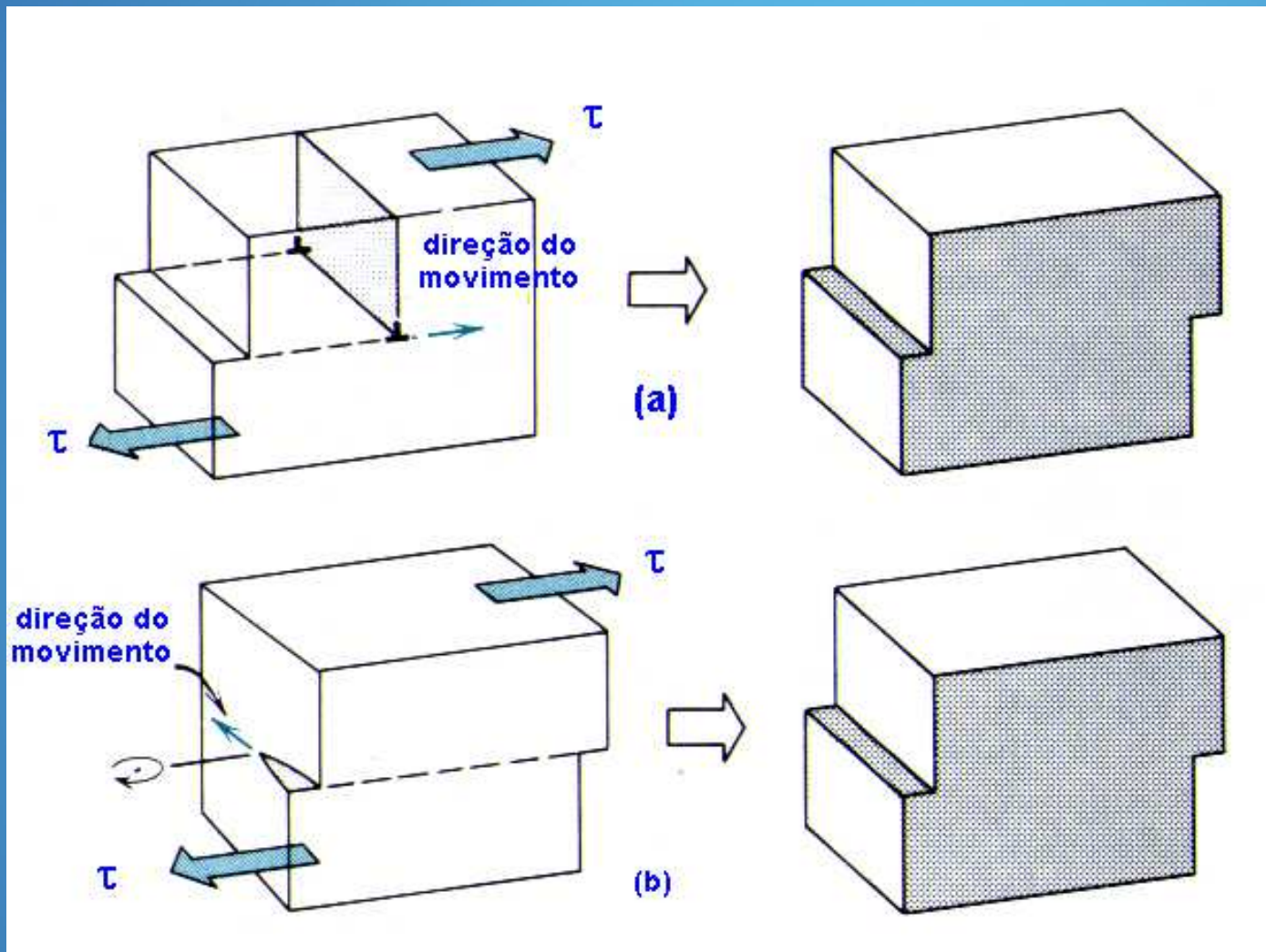
- ◆ Quando submetidos a tensões maiores do que o limite de escoamento os materiais dúcteis se deformam e, após um tanto de carga, fraturam.
- ◆ O mecanismo de deformação na maioria dos materiais envolve o cisalhamento de algumas porções do material com relação as outras. Nos materiais cristalinos isso 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 proposição 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.



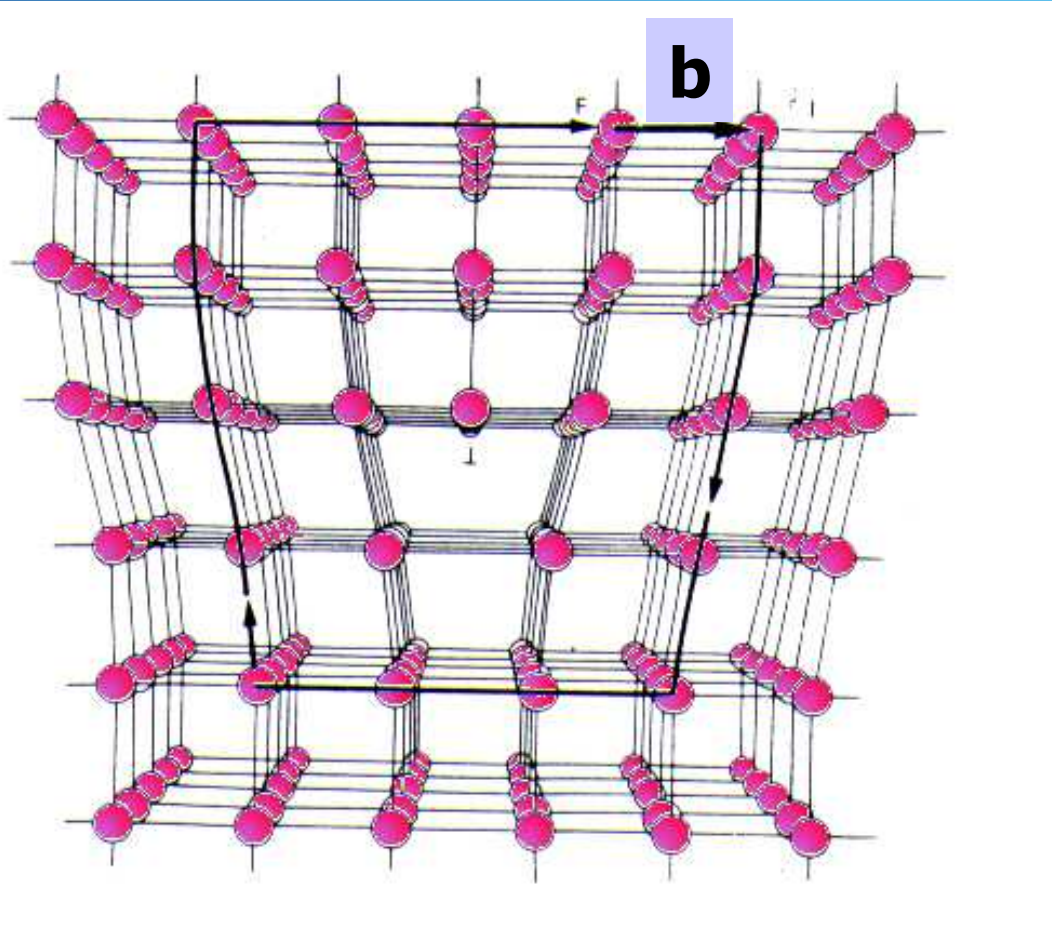
# Relembrando: Discordâncias



**(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**

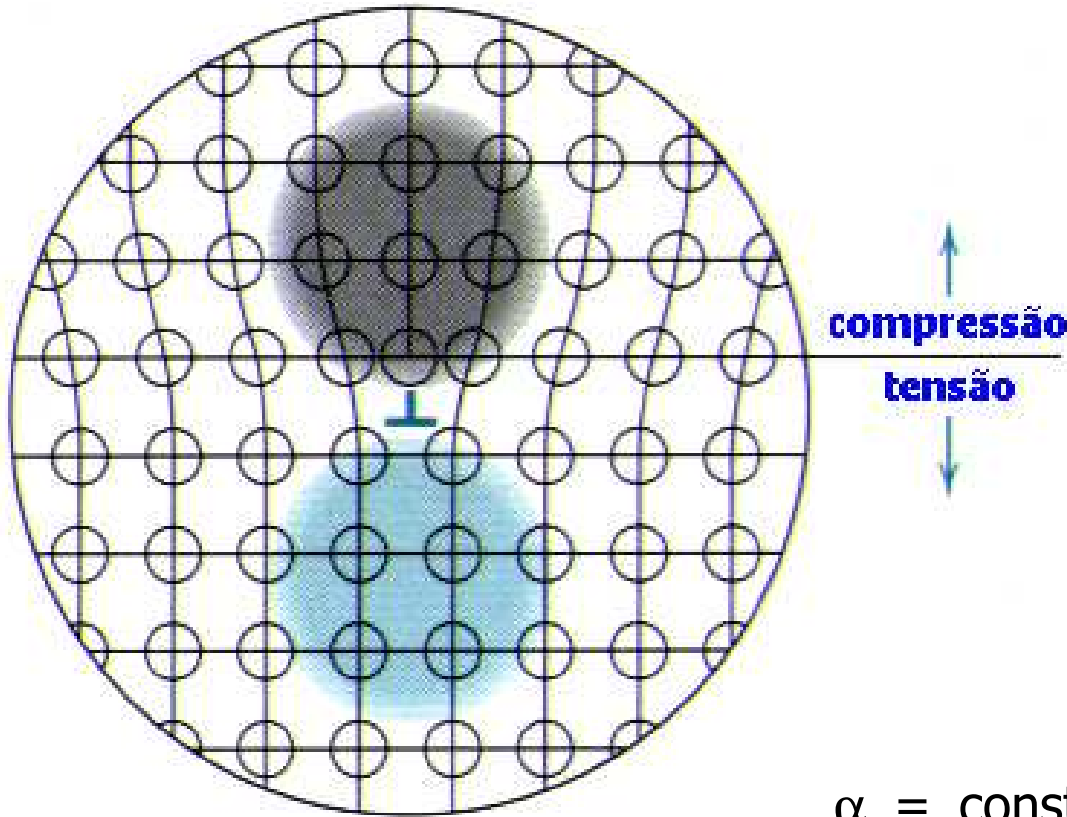
# Características das Discordâncias



- ◆ 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.
- ◆ Um cristal contendo uma discordância tem energia maior que um cristal perfeito.



# Características das Discordâncias



$$E \approx \alpha l G b^2$$

◆ A maior parte (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 associada a qualquer tipo de discordância pode ser calculada e segue a expressão genérica:

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

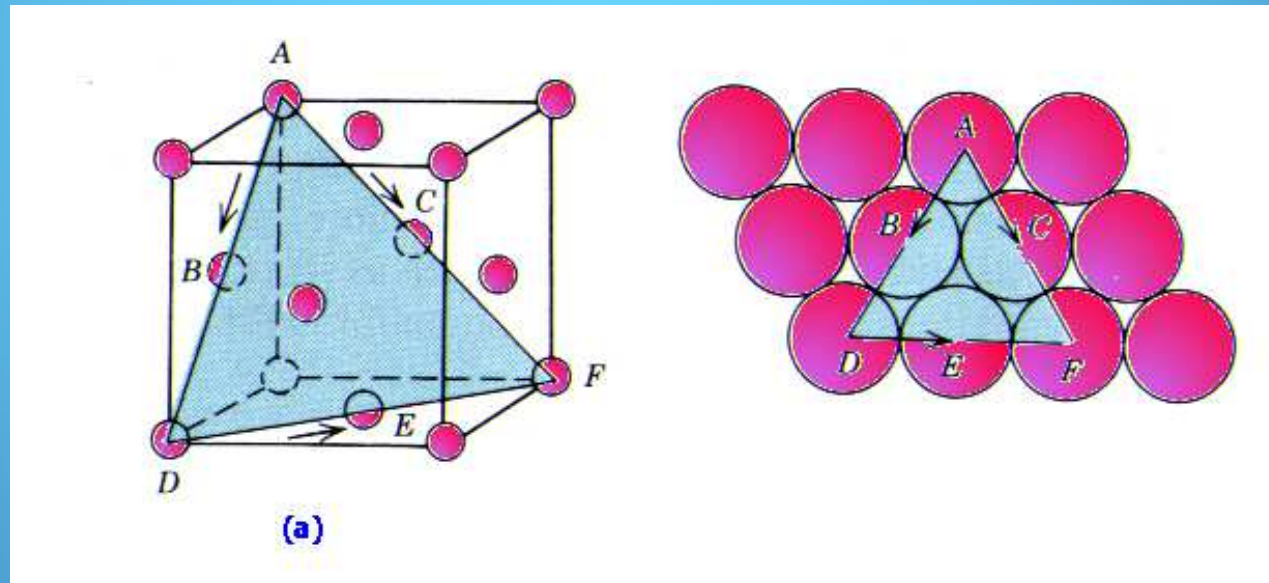
$l$  = comprimento da linha de discordância

$G$  = módulo de cisalhamento do cristal

$b$  = módulo do vetor de Burgers

# 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.



# 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 barreira de ativação do processo.

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

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

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

Equação de Taylor: relaciona a tensão aplicada à densidade de discordâncias ( $\sigma_0$  é o atrito intrínseco do reticulado,  $\alpha$  é uma constante 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 “sésseis”.
- ◆ 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.

# 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").

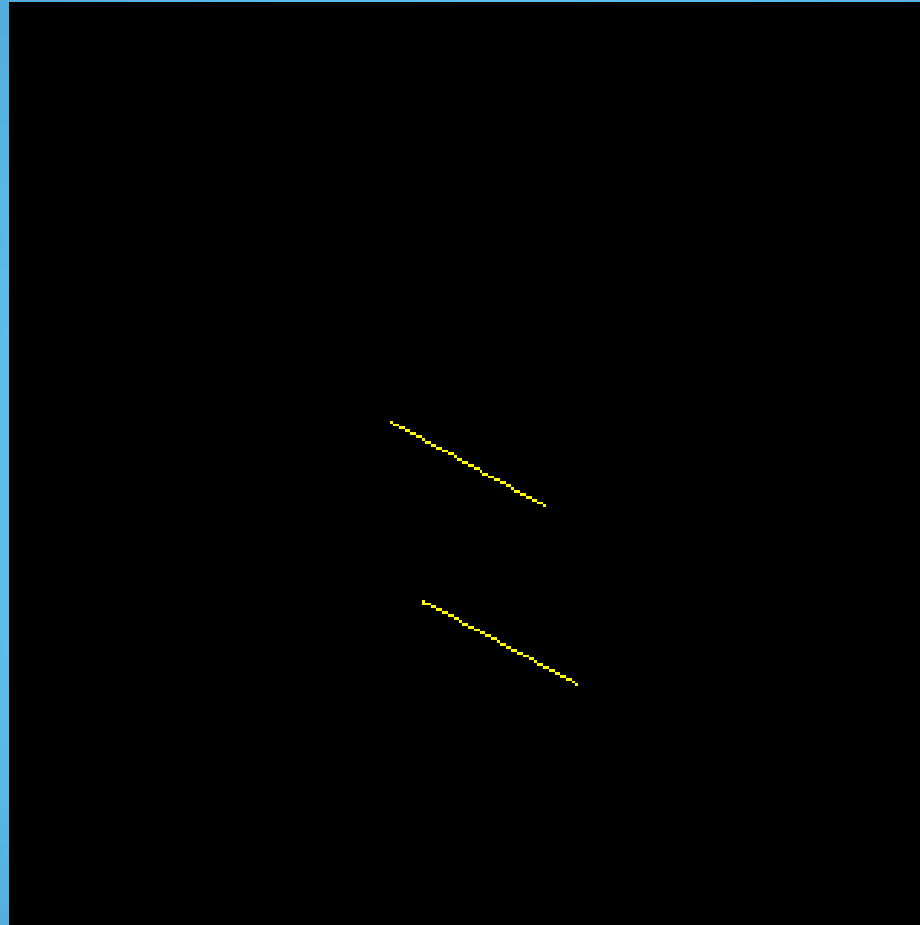
Exemplo:

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

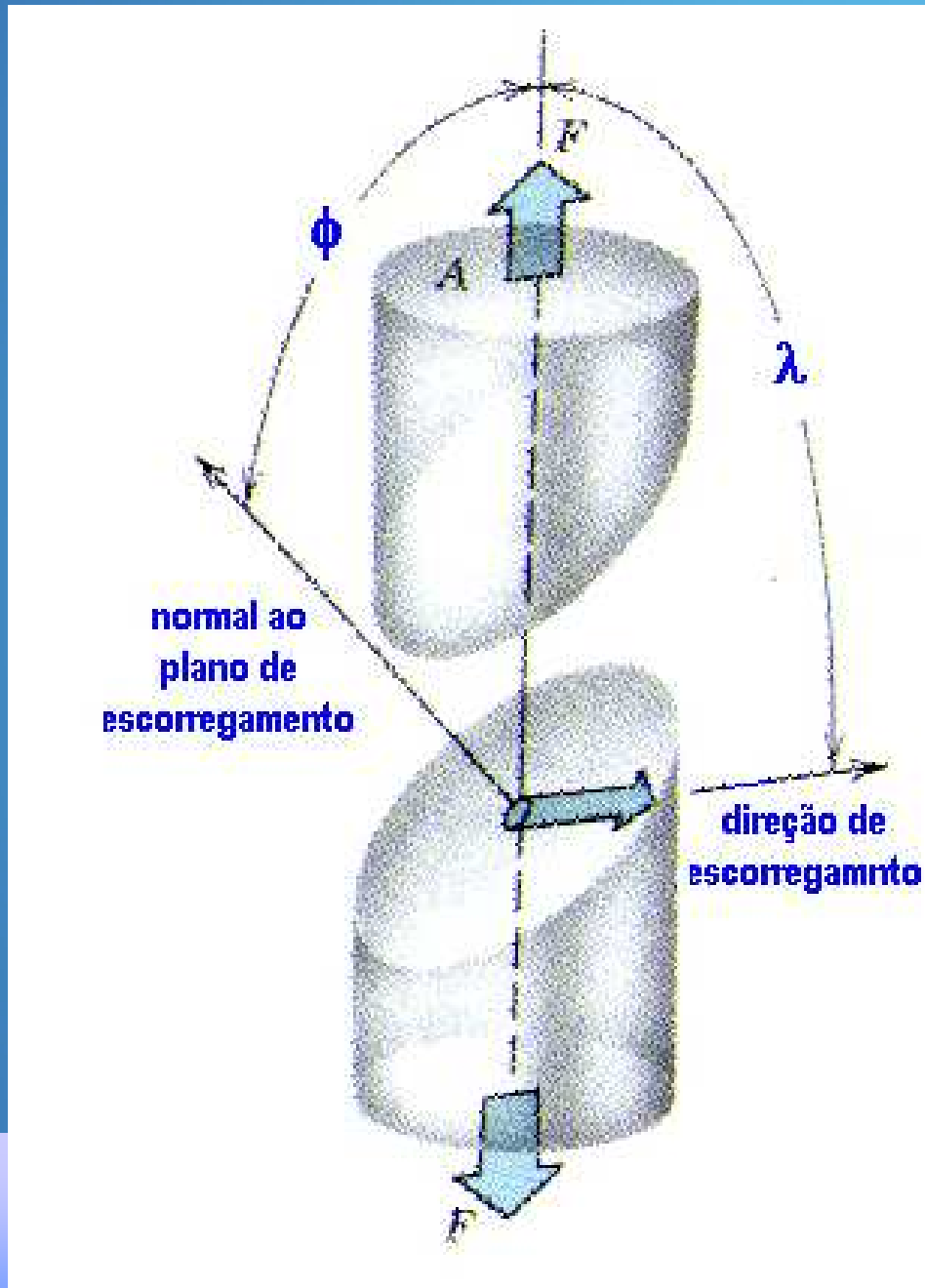
tanto no plano (111), quanto no plano ( $\bar{1}11$ ).

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

# 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.

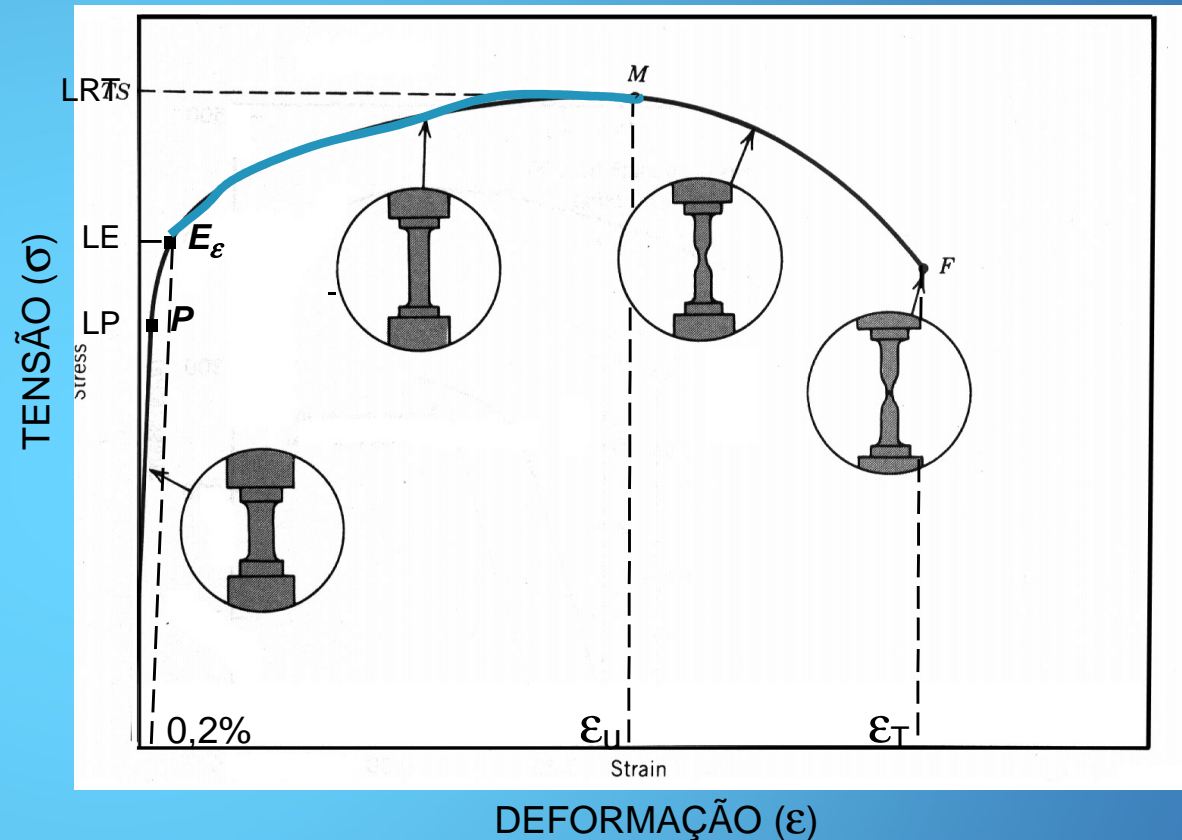
Nota: A Lei de Schmid é observada em diversos sistemas, notadamente metais HCP e CFC, porém desvios podem ser observados, por exemplo:

- 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.



# Encruamento

- ◆ À medida em que o material é deformado plasticamente, ocorre um endurecimento gradual (encruamento)
- ◆ Se a deformação plástica ocorre por movimentação de discordâncias, como se dá o endurecimento?
  - As discordâncias têm cada vez mais dificuldade de se movimentar!



# Como as discordâncias ajudam a endurecer o material?

- ◆ Multiplicação das discordâncias
- ◆ Dissociação de discordâncias em parciais
- ◆ Interação das discordâncias com outros defeitos:
  - Partículas
  - Outras discordâncias
  - Átomos de soluto
  - Contornos de grão

# Discordâncias Parciais

- ◆ Discordâncias podem dissociar-se em parciais;
- ◆ Para isso é necessário que a dissociação seja:
  - Algebricamente possível
  - Energeticamente favorável
- ◆ Se uma discordância parcial sofrer escorregamento com desvio, outras discordâncias no mesmo plano terão seu caminho bloqueado.

# Discordâncias Parciais

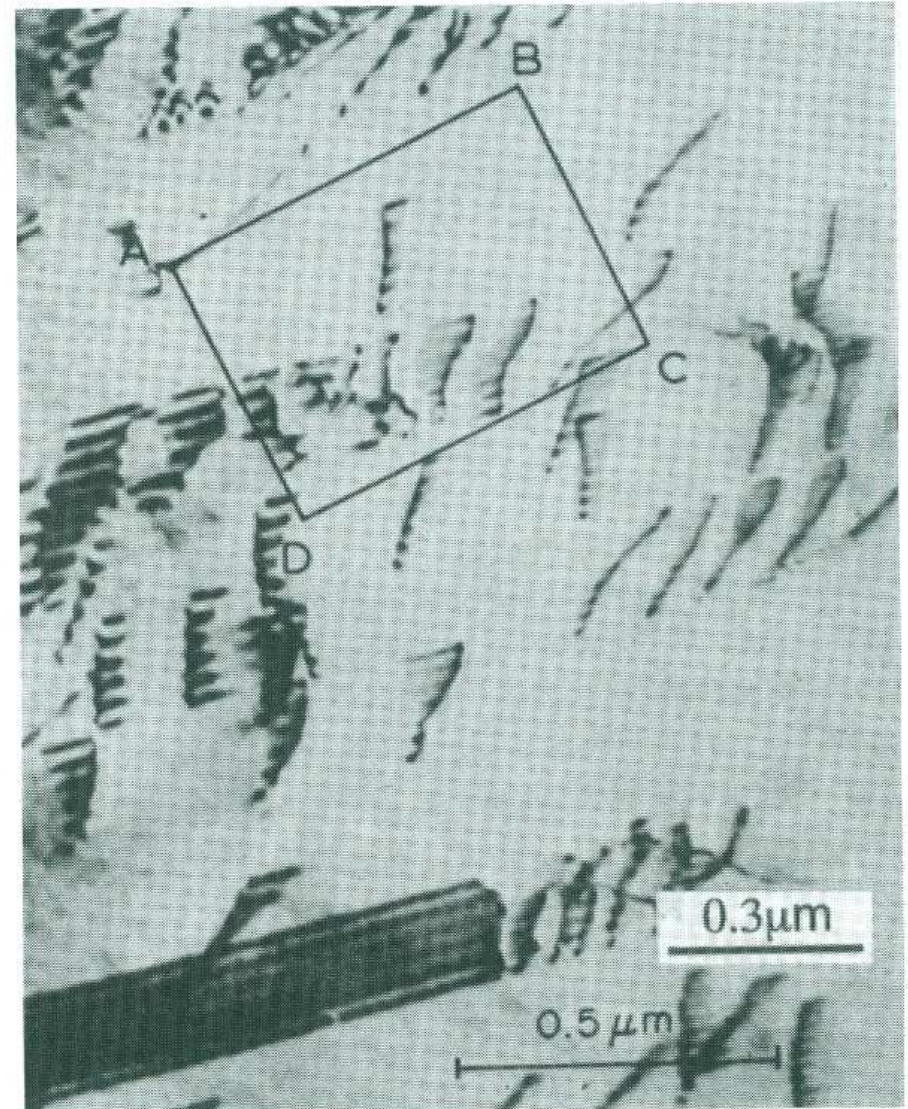
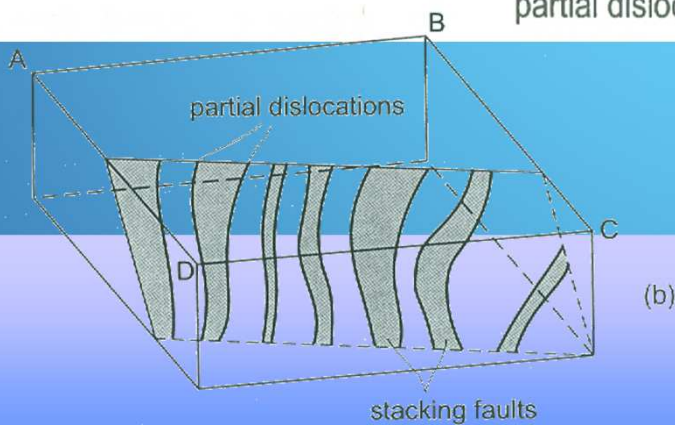
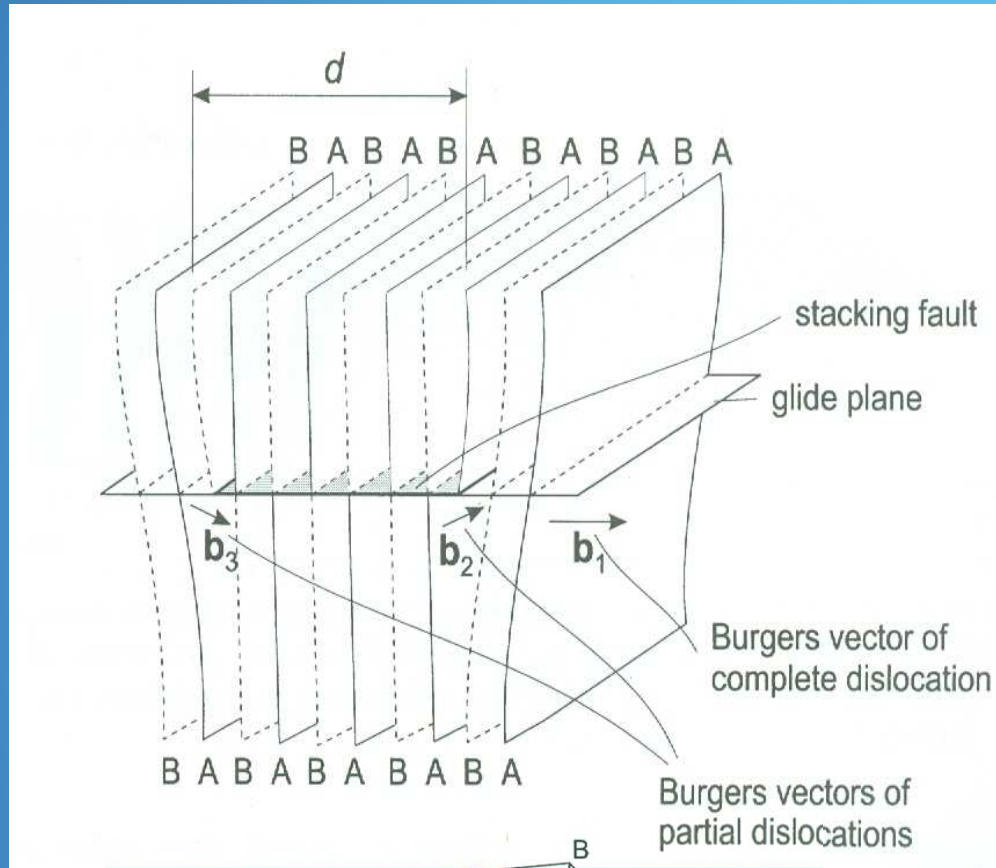
◆ Exemplo: no sistema CFC, no plano (111)

◆  $\frac{a}{2} [110] \rightarrow \frac{a}{6} [21\bar{1}] + \frac{a}{6} [121]$

◆ Energia das discordâncias

◆  $\frac{a^2}{2} > \frac{a^2}{6} + \frac{a^2}{6}$

# Discordâncias parciais



# Discordâncias parciais

- ◆ Vetores de Burgers das discordâncias parciais somados são necessariamente iguais a um vetor de Burgers no cristal perfeito.
- ◆ Energia da discordância é proporcional ao quadrado do vetor de Burgers
- ◆ Discordâncias em hélice dissociadas podem sofrer escorregamento com desvio.

# Energia de falha de empilhamento

- ◆ É a energia associada à falha de empilhamento determinada por um par de discordâncias dissociadas;
- ◆ Alta energia: discordâncias dissociadas não se afastam muito, recompõem-se rapidamente; discordâncias têm alta mobilidade
- ◆ Baixa energia: discordâncias dissociadas se afastam grandes distâncias; menor mobilidade
- ◆ Afeta a distribuição das discordâncias no material encruado

# Energia de falha de empilhamento

- ◆ Baixa
- ◆ Discordâncias parciais se afastam bastante e impedem a ocorrência de escorregamento com desvio e escalada;
- ◆ Pouca tendência à formação de células de discordâncias durante a deformação



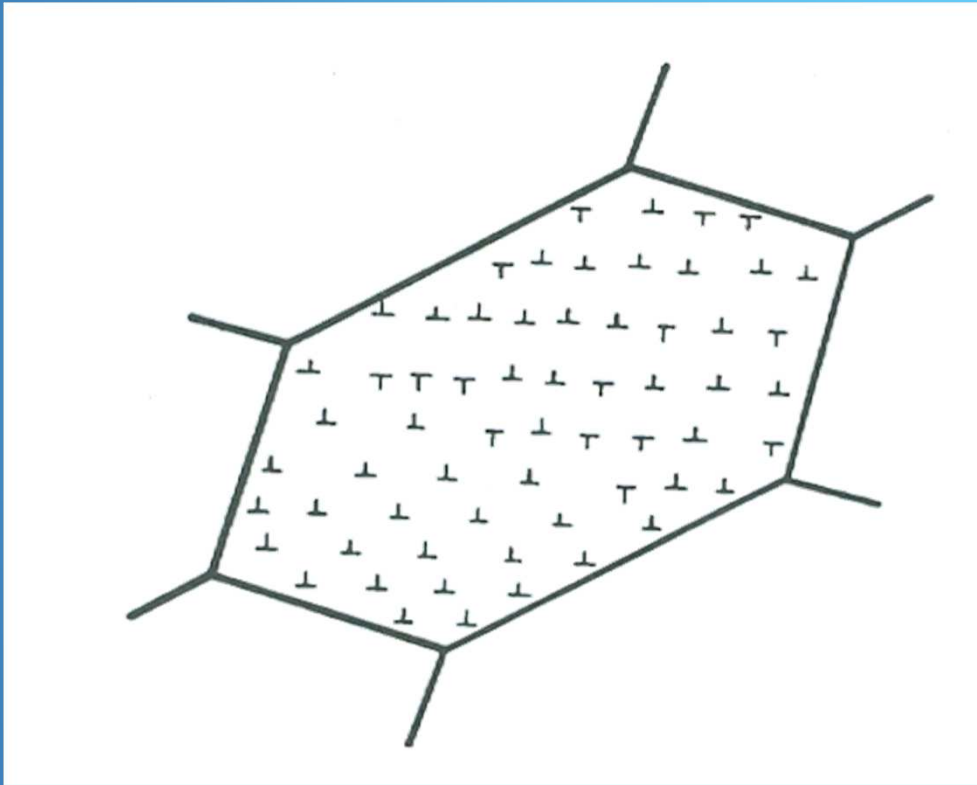
# Energia de falha de empilhamento

## ◆ Alta

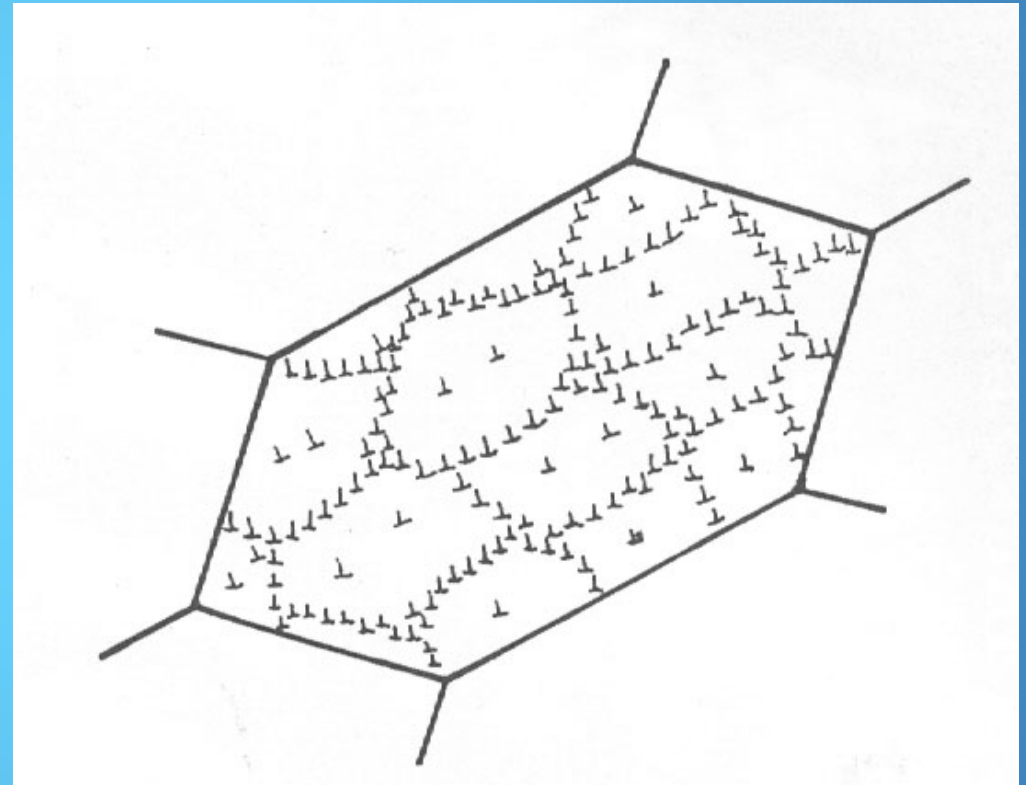
- Discordâncias parciais não se afastam muito
- As discordâncias rapidamente se recombinaem, podendo sofrer processos de escalada ou escorregamento com desvio
- Discordâncias têm alta mobilidade e alta tendência de rearranjo e aniquilação
- Maior tendência à formação de células de discordâncias

# Energia de falha de empilhamento

Baixa EFE



Alta EFE



# Empilhamento de discordâncias

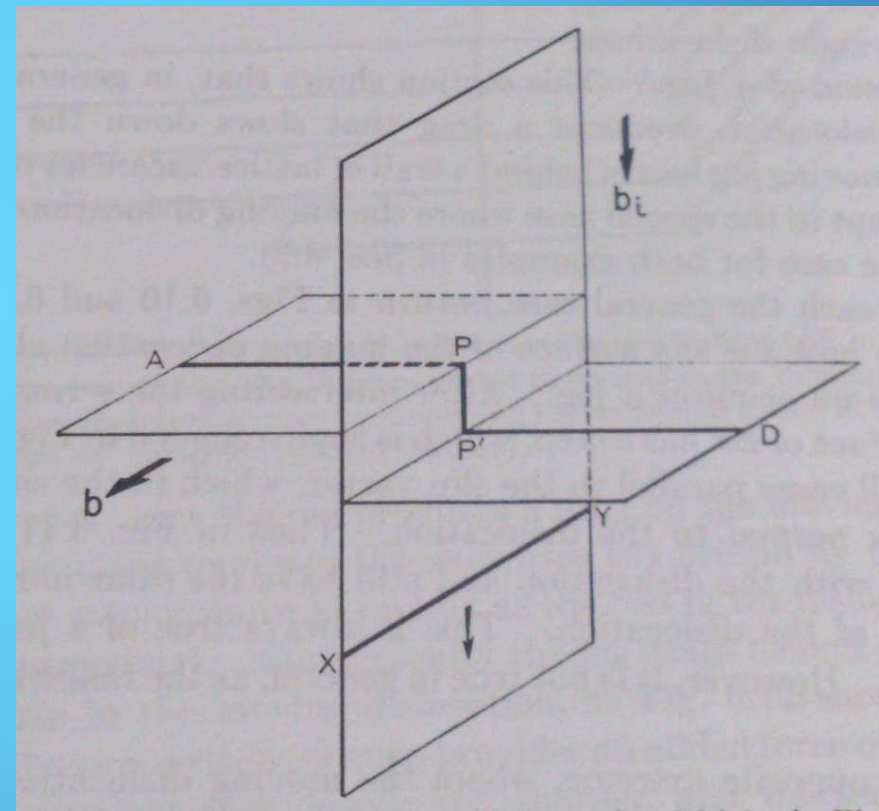
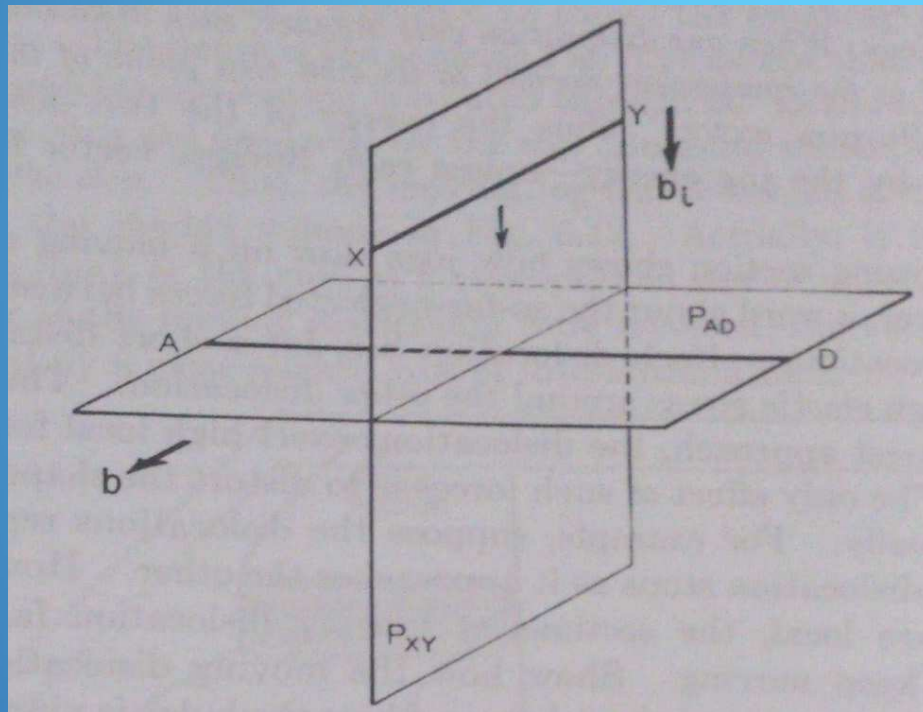
- ◆ Discordâncias com obstáculo intransponível à frente começam a se acumular na vizinhança do obstáculo
- ◆ Obstáculo pode ser um precipitado, um degrau causado por uma intersecção de discordâncias, etc.



# Intersecção de discordâncias

- ◆ Causam o aparecimento de um degrau, com o comprimento igual ao do vetor de Burgers da discordância que a cruzou
- ◆ O degrau pode ser glíssil (como no caso de duas discordâncias em cunha) ou séssil
- ◆ Um degrau composto de discordância em hélice pode se mover por escalada acompanhando o movimento da linha de discordância

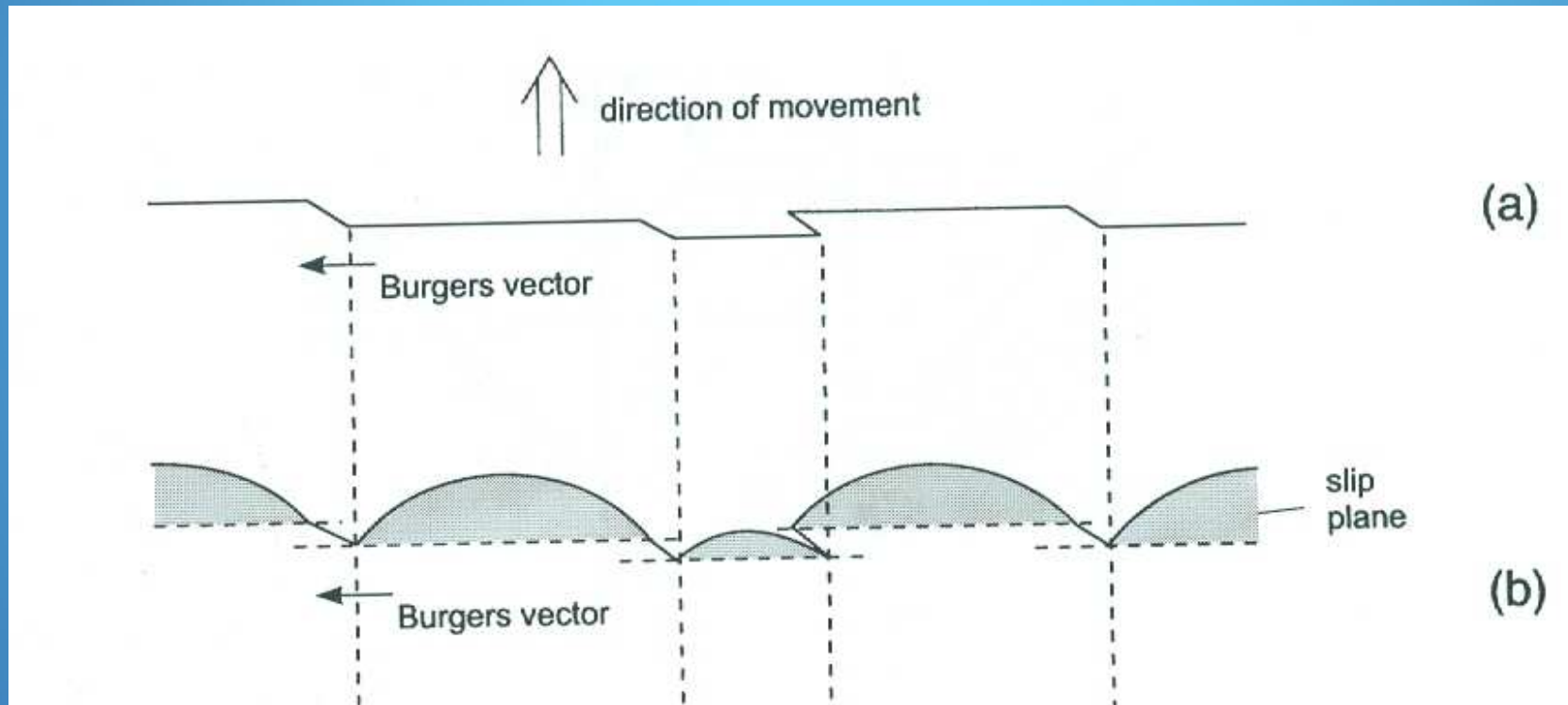
# Intersecção de discordâncias



# Intersecção de discordâncias

## ◆ Degraus sésseis

- Ancoram a movimentação das discordâncias



# Interação das discordâncias

## ◆ Barreiras de Lomer-Cottrell

1. Discordâncias de planos diferentes reagem entre si formando uma nova, séssil nos dois planos (pois o vetor de Burgers resultante está fora do plano de escorregamento)

- ❖ A combinação precisa ser energeticamente favorável.
- ❖ A discordância séssil age como barreira à movimentação de outras discordâncias

# Barreira de Lomer-Cottrell

Considere duas discordâncias:  $\vec{b}_1 = \frac{a_0}{2} [01 \bar{1}]$ ,  $\vec{b}_2 = \frac{a_0}{2} [101]$

Deslizando respectivamente nos planos  $(111)$  e  $(11 \bar{1})$

e reagindo na intersecção dos planos para formar

$$\vec{b}_3 = \vec{b}_1 + \vec{b}_2 = \frac{a_0}{2} [110]$$

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 → **Encruamento**



# Barreira de Lomer-Cottrell

◆ No plano (111)

$$b_1 = \frac{a}{2}[0\bar{1}1]$$

$$b_2 = \frac{a}{2}[\bar{1}01]$$

$$b_3 = \frac{a}{2}[\bar{1}10]$$

◆ No plano  $(\bar{1}11)$

$$b_4 = \frac{a}{2}[01\bar{1}]$$

$$b_5 = \frac{a}{2}[101]$$

$$b_6 = \frac{a}{2}[110]$$

# Barreira de Lomer-Cottrell

- ◆  $b_1$  e  $b_4$  são discordâncias com vetores opostos, e se aniquilam.
- ◆  $b_2$  e  $b_5$ , por exemplo:
- ◆ A energia dessas discordância é igual:

$$b_2 + b_5 = \frac{a}{2}[\bar{1}01] + \frac{a}{2}[101] = \frac{a}{2}[002] = a[001]$$

$$\frac{a^2}{2} + \frac{a^2}{2} = a^2$$

# Barreira de Lomer-Cottrell

- ◆ Por outro lado, se  $b_3$  e  $b_5$  reagem:

$$b_3 + b_5 = \frac{a}{2}[\bar{1}10] + \frac{a}{2}[101] = \frac{a}{2}[011]$$

$$\frac{a^2}{2} + \frac{a^2}{2} \rangle \frac{a^2}{2}$$

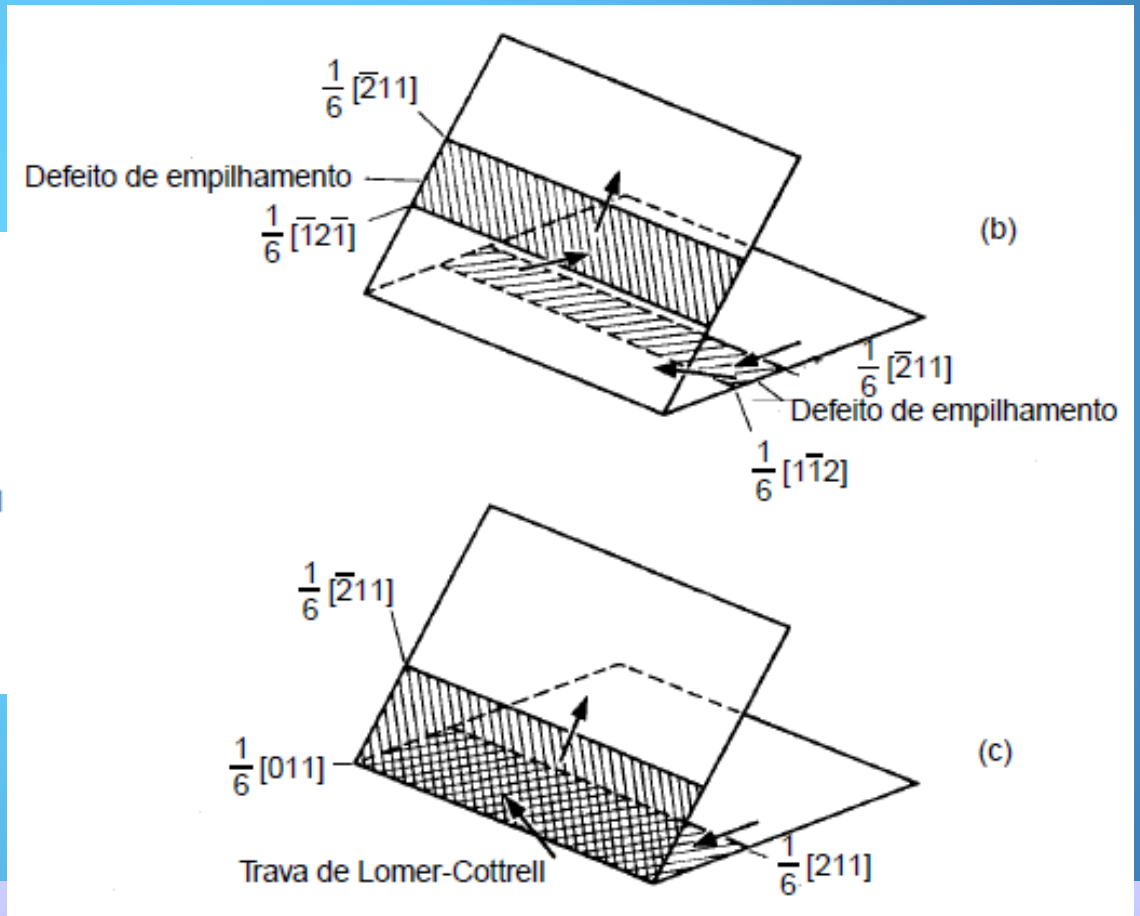
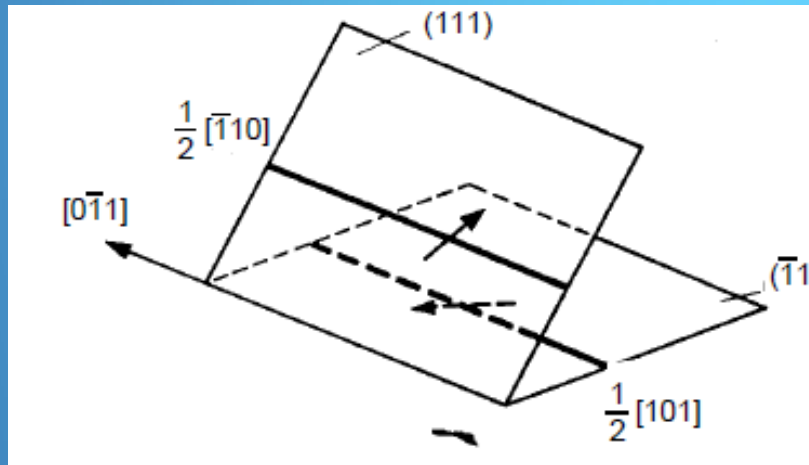
- ◆ Há um ganho energético, PORÉM:
  - O vetor de Burgers não está no plano, e a discordância não pode se mover.

# Interações de discordâncias

## ◆ Barreiras de Lomer-Cottrell

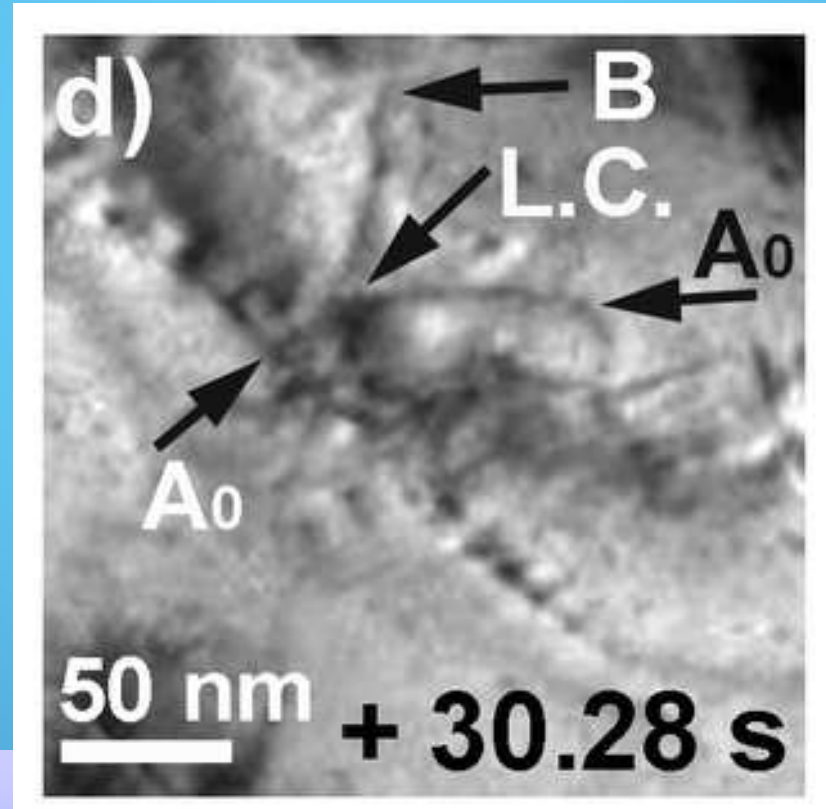
2. Discordâncias parciais de dissociações distintas se combinam (materiais de baixa EDE)
  - A nova discordância “perfeita” não pode se mover, ou por ser séssil nos planos de escorregamento ou porque o defeito de empilhamento não é compatível com seu vetor de Burgers
  - As parciais restantes não podem se recombinar, e o conjunto atua como barreira à movimentação de outras discordâncias

# Barreira de Lomer-Cottrell (discordâncias parciais)



# Barreira de Lomer-Cottrell

- ◆ Observadas ao MET

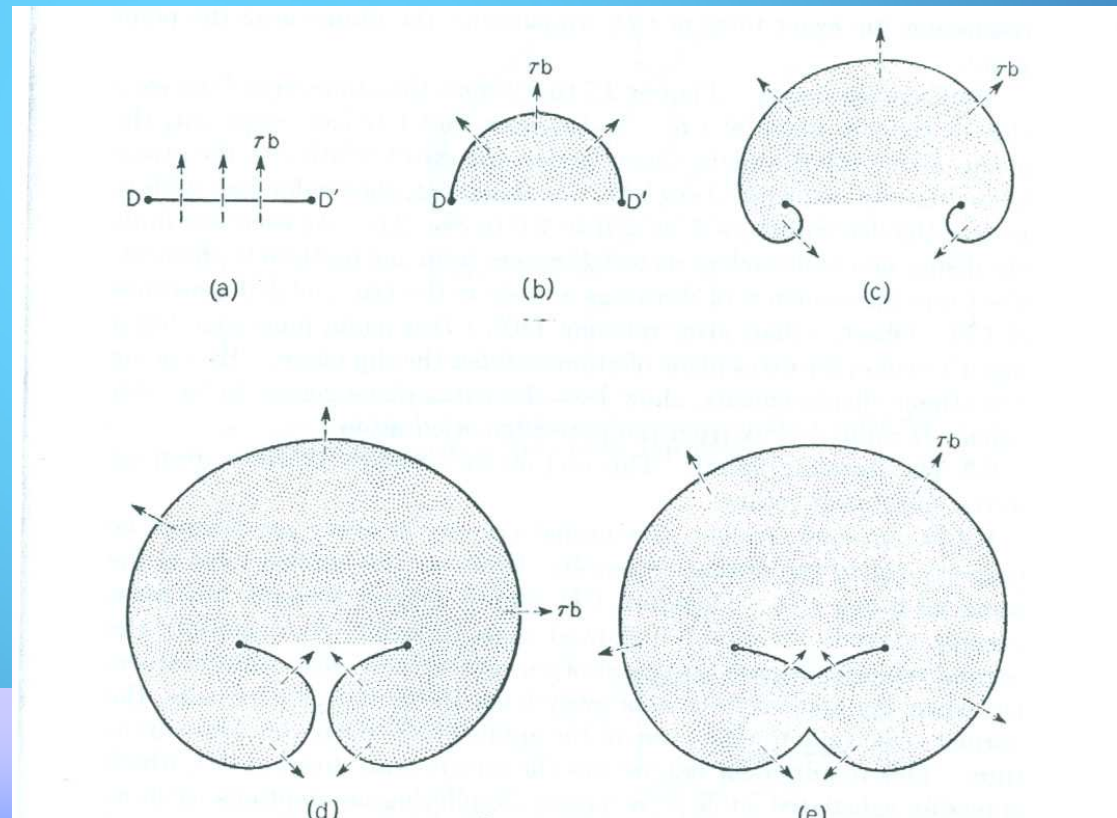


# Multiplicação de discordâncias

- ◆ Interação com precipitados
  - Fonte de Frank-Read
  - Formação de espirais
  - Formação de anéis
- ◆ Intersecção
- ◆ Dissociação

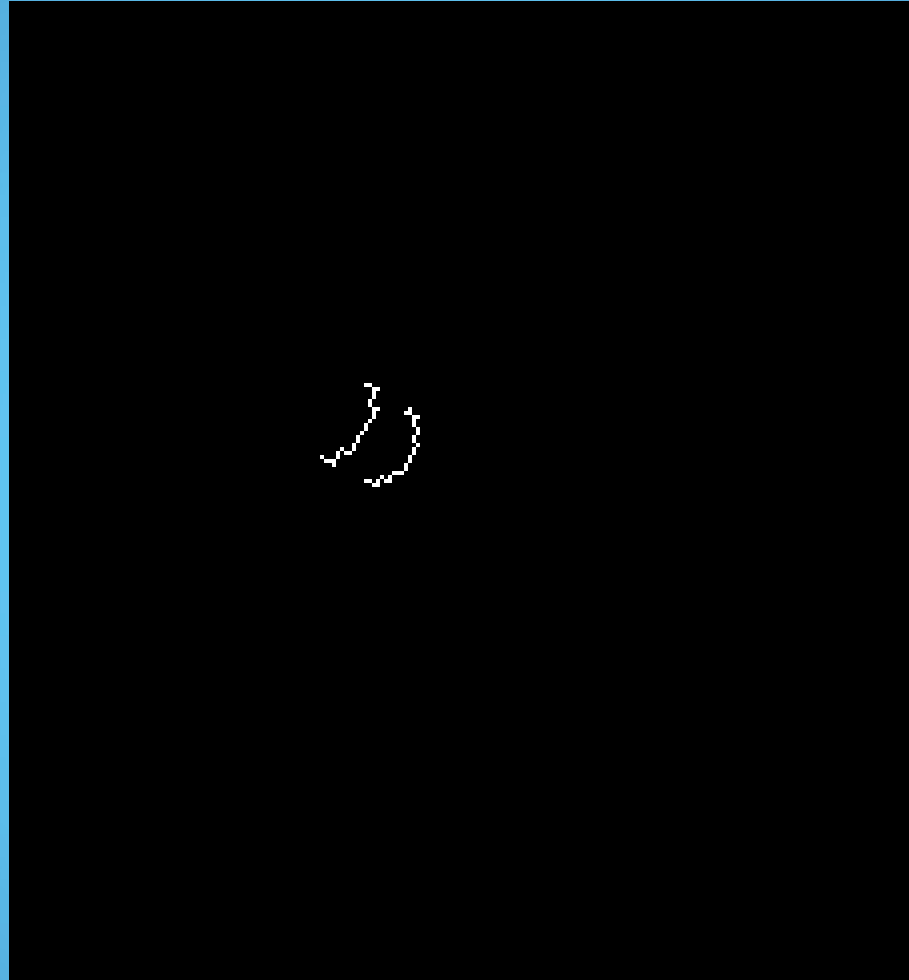
# Fonte de Frank-Read

- ◆ Discordância ancorada por dois precipitados;
- ◆ Movimentação dá origem a anéis de discordâncias.



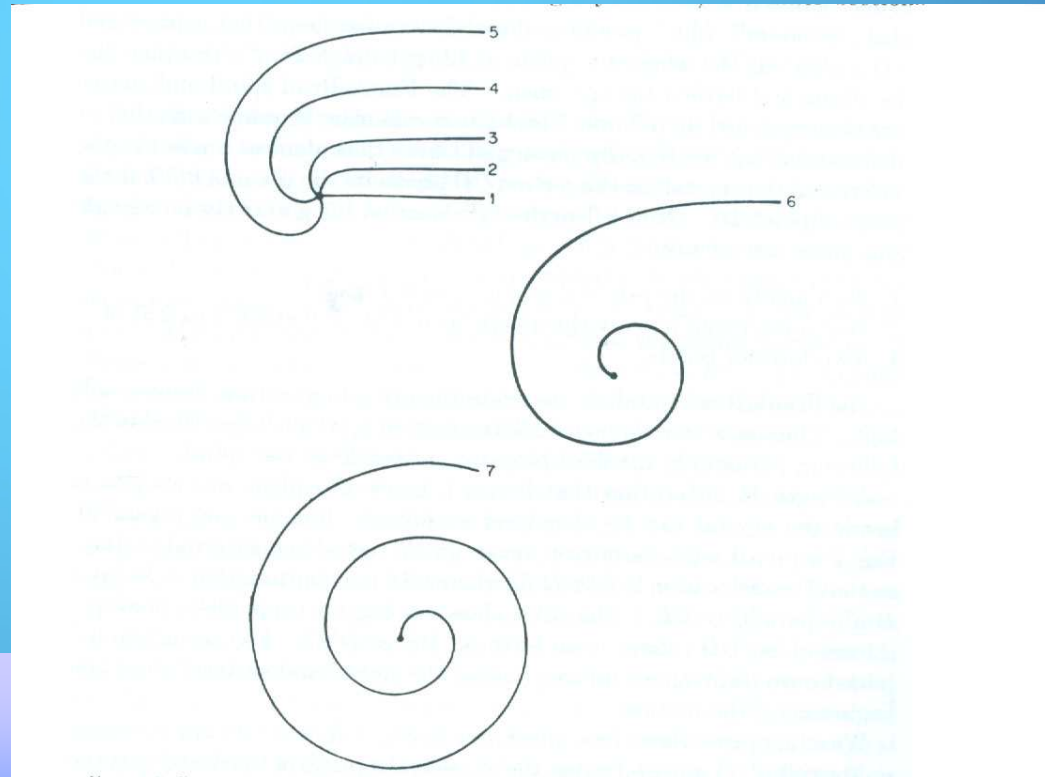


# Fonte de Frank Read



# Formação de espirais

- ◆ Discordância ancorada por um precipitado;
- ◆ Sua movimentação dá origem a uma espiral de discordância

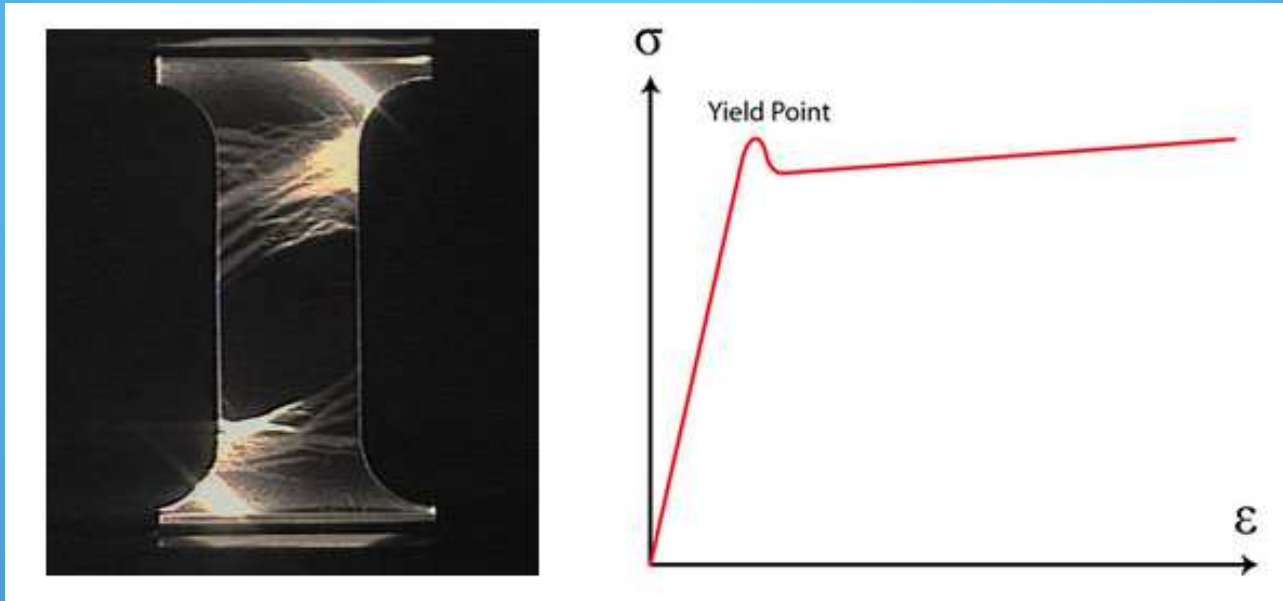


# Interação de discordâncias com átomos de soluto

- ◆ Atmosfera de Cottrell - Átomos intersticiais se difundem para as discordâncias, aumentando a tensão necessária à sua movimentação, devido ao campo de tensões formado
- ◆ Uma vez que a tensão seja vencida, a discordância “se livra” do átomo intersticial e pode se mover normalmente

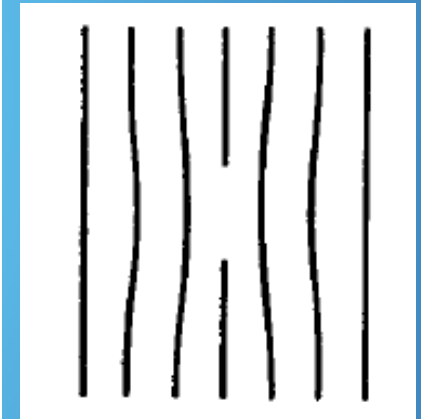
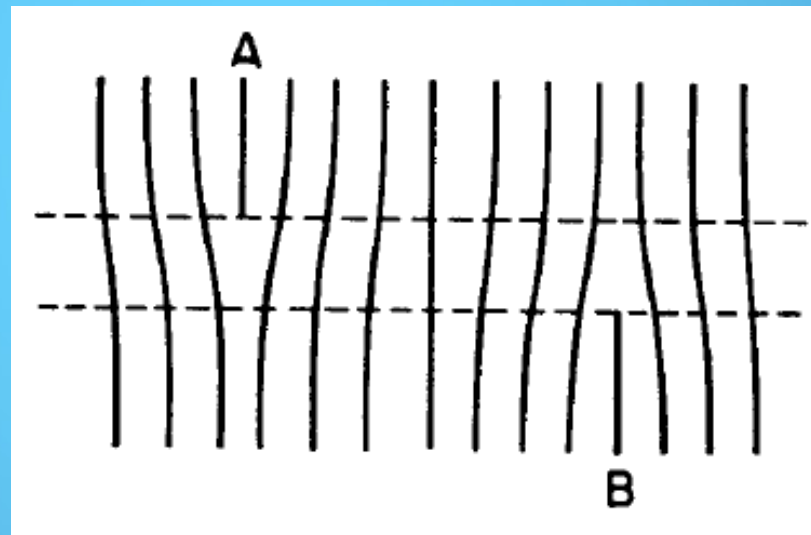
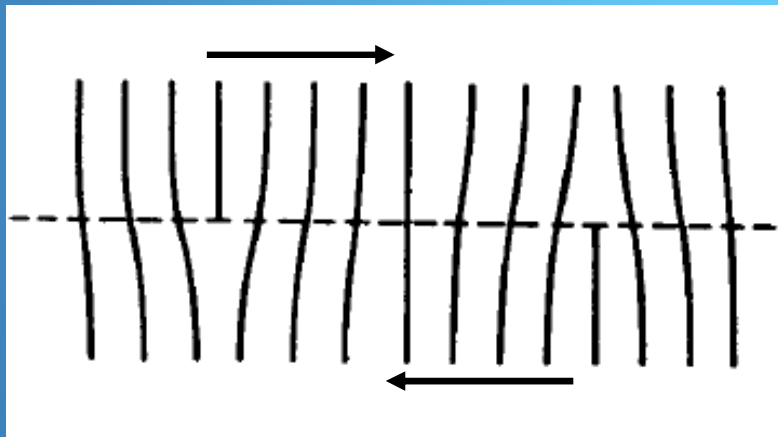
# Interação das discordâncias com átomos de soluto

- ◆ Efeito da atmosfera de Cottrell:
  - “Pico de escoamento” ou escoamento descontínuo
  - Bandas de Lüders – Mesmo aços com baixos teores de carbono como o 1006 têm tendência a esse fenômeno.



# Aniquilação de discordâncias

- ◆ Discordâncias no mesmo plano de escorregamento com vetores de Burgers opostos
- ◆ Ao se encontrarem, aniquilam-se, podendo dar origem a uma fileira de lacunas ou a um plano perfeito.



# Aniquilação de discordâncias



Dislocation processes in  
precipitation-hardened alloys

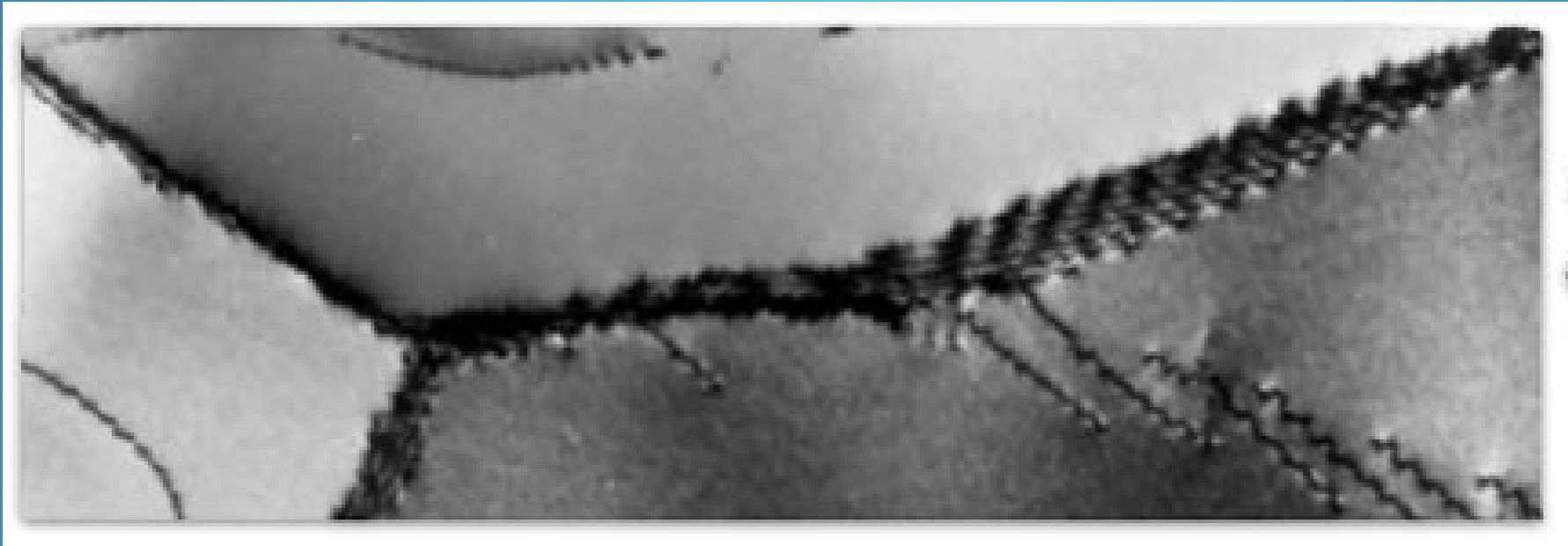
M. Bartsch, U. Messerschmidt

Max Planck Institute of  
Microstructure Physics  
Halle(Saale)

# Interação com contornos de grão

- ◆ Dependendo do plano de escorregamento, as discordâncias podem se acumular junto aos contornos de grão;
- ◆ Os contornos de grão também podem atuar como fontes de discordâncias durante a deformação plástica
- ◆ Ao microscópio, é muito difícil diferenciar quando um empilhamento de uma fonte de discordâncias no contorno

# Interação com contornos de grão

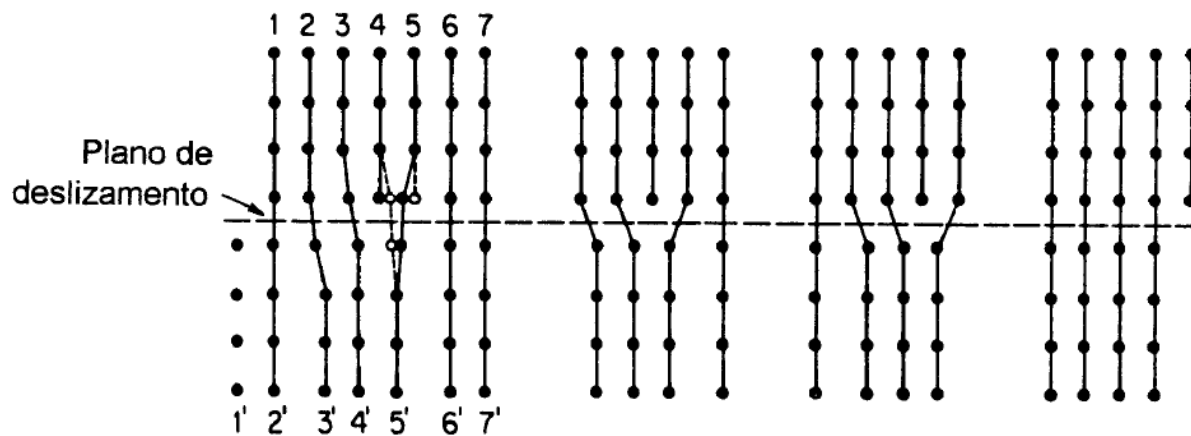
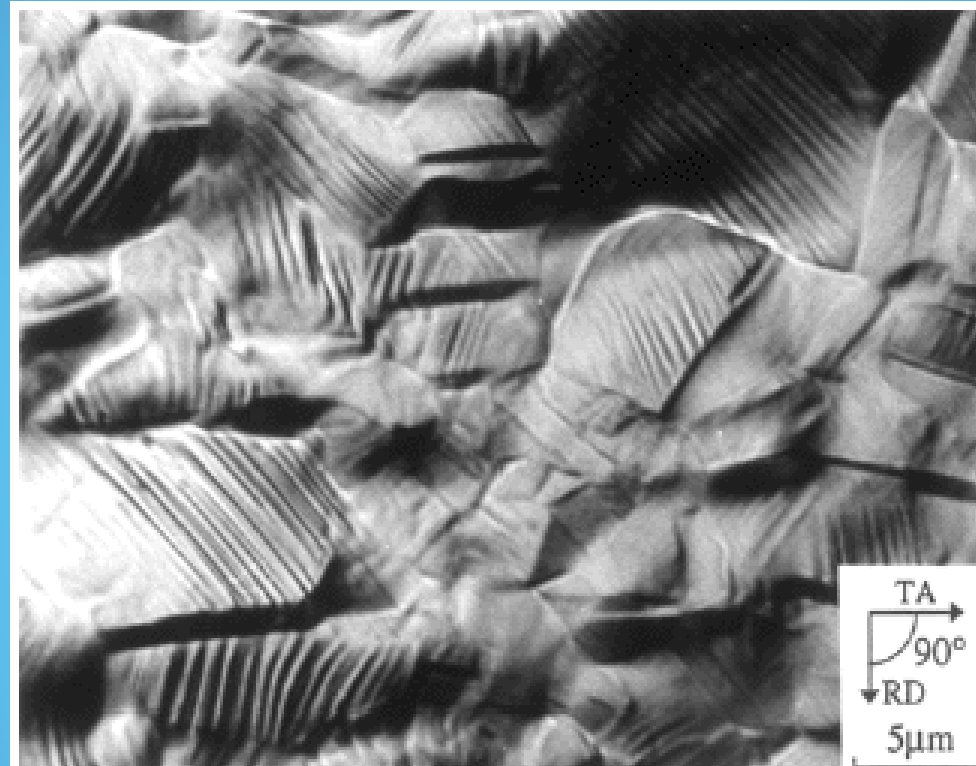




# Interação com a superfície externa

- ◆ Discordâncias que chegam à superfície externa do cristal são eliminadas, levando à formação de um degrau de extensão igual à do vetor de Burgers da discordância.
- ◆ Quando muitas discordâncias saem do cristal, o degrau pode ser visto ao MEV ou MO, formando linhas de escorregamento

# Interação com a superfície externa



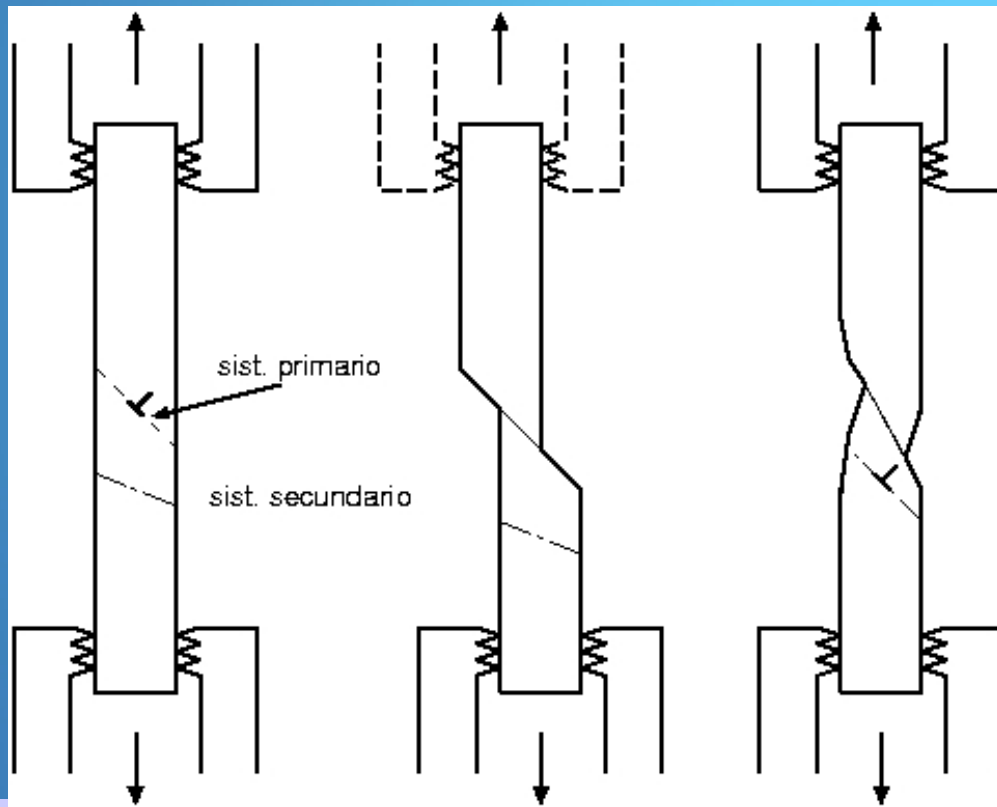
Fim da parte 1

# 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)!

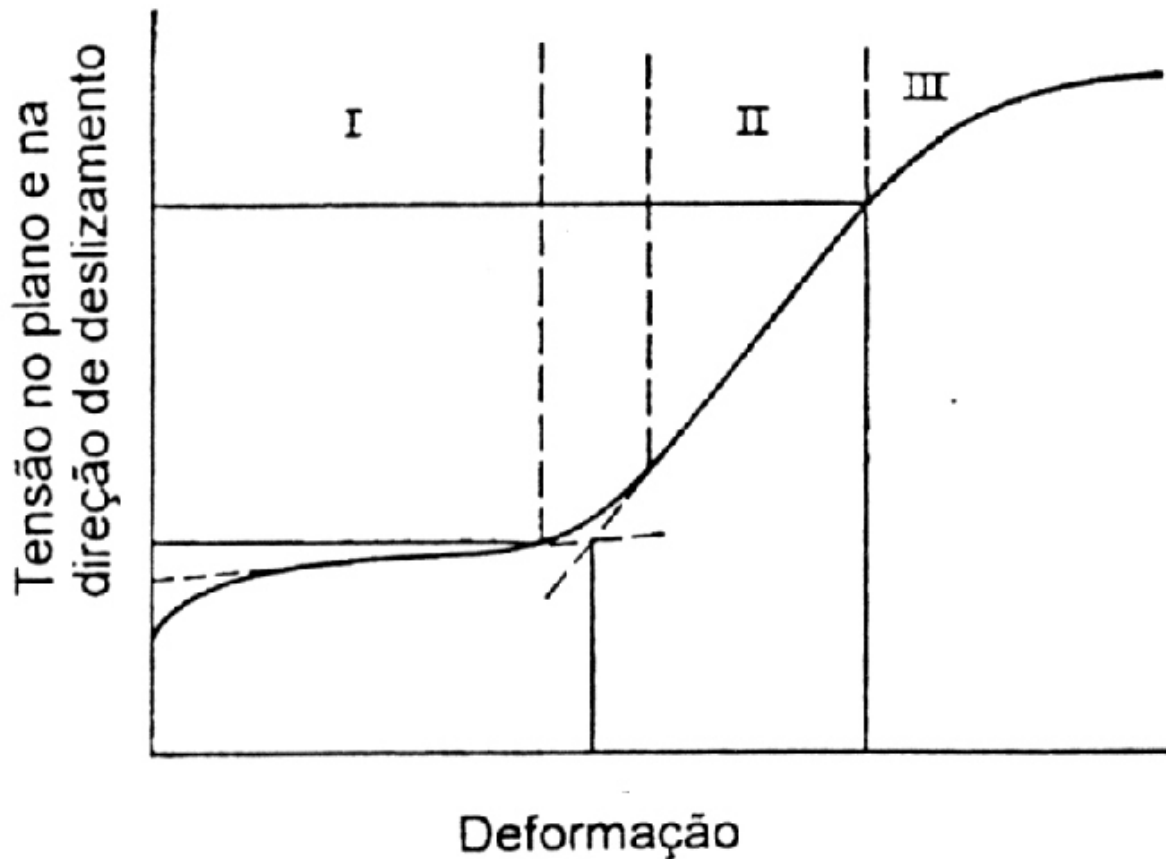
# Rotação do reticulado

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 ( $\Rightarrow$  monodeslizamento), o progresso da mesma irá orientar favoravelmente outros sistemas, ativando-os ( $\Rightarrow$  polideslizamento  $\Rightarrow$  encruamento).
- Em um material policristalino esta rotação ocorre em cada grão e resulta em uma redistribuição das orientações cristalinas dos mesmos  $\Rightarrow$  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 (supostamente 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:

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

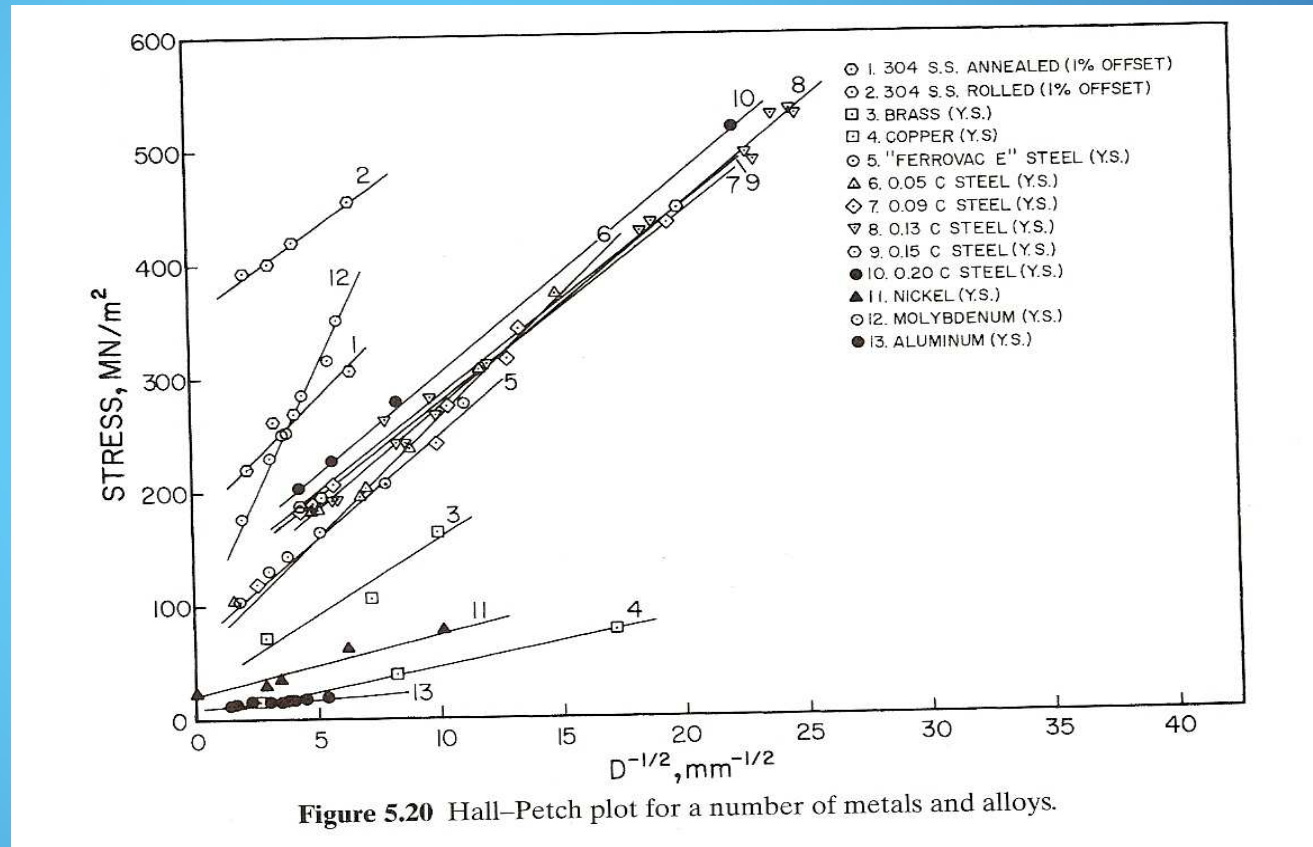
onde  $\sigma_e$  é o limite de escoamento,  $\sigma_0$ ,  $k$  são constantes do material e  $d$  é o tamanho médio dos grãos.

# 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



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



# 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:

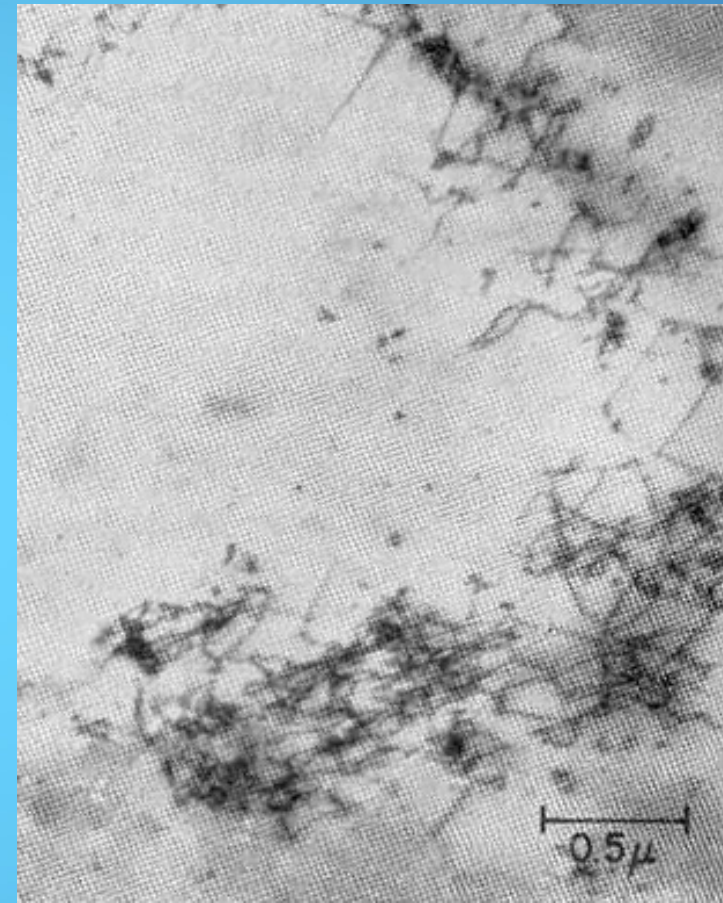
$$\sigma = \sigma_0 + \alpha G b \sqrt{\rho}$$

Onde  $\sigma_0$ ,  $\alpha$  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



Fe com 1% deformação: Emaranhados de discordâncias  
 $3 \cdot 10^9 \text{ cm/cm}^3$  de discordâncias



Fe com 3,5% deformação  
 $6 \cdot 10^9 \text{ cm/cm}^3$  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

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

# Fator de Taylor

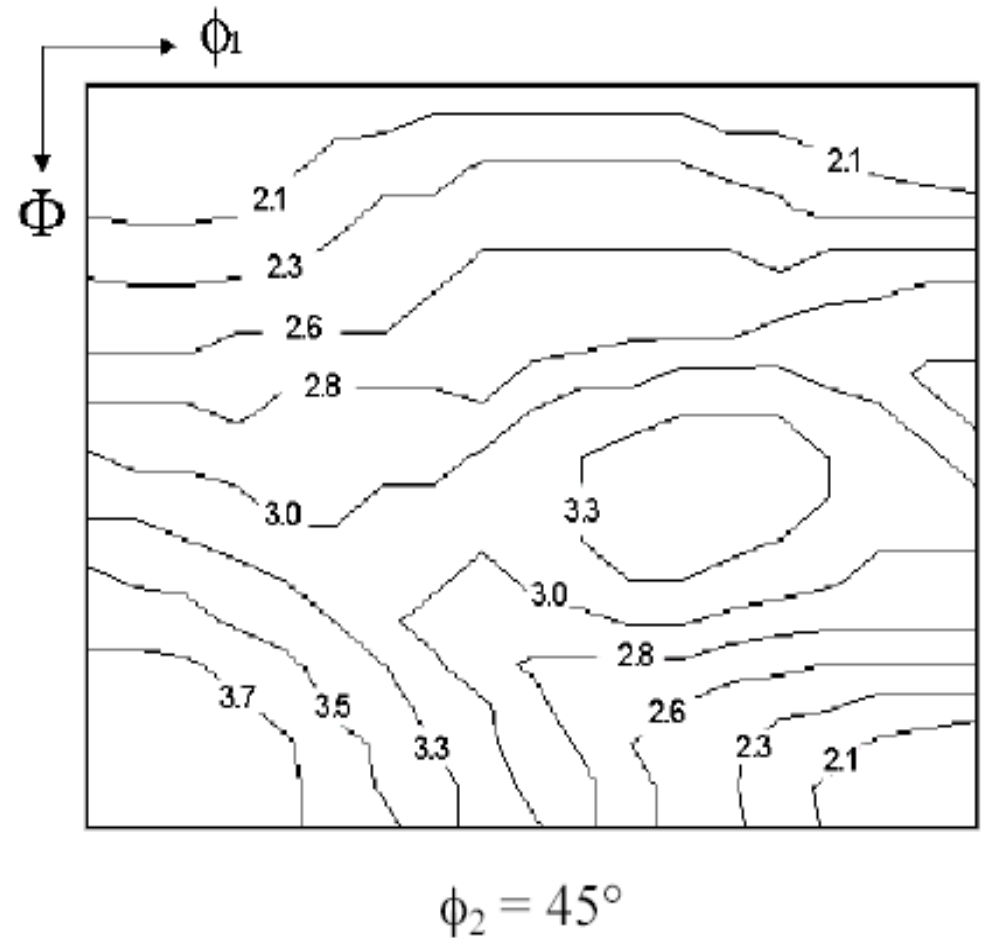
- ◆ Nos policristais, o encruamento não é igual em todos os grãos.
- ◆ O fator de Taylor  $M$  é um parâmetro do grau de encruamento para cada orientação: baseia-se no cálculo da quantidade de deformação por cisalhamento ( $\gamma$ ) necessária para produzir certa deformação por tração ( $\epsilon$ ):

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

- ◆ 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

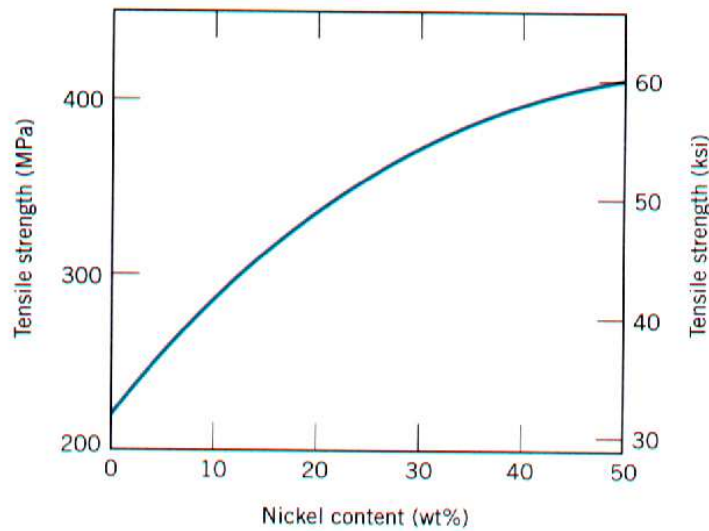
- ◆ É possível representar a variação do fator de Taylor para as diferentes orientações, usando os cortes do espaço de Euler.
- ◆ Fator de Taylor (aula 2)
$$M = \Sigma \mathbf{v} / \varepsilon$$
- ◆ Prevê máximo encruamento ( $M_{\max}$ ) para orientações próximas a  $\{110\}\langle 110\rangle$



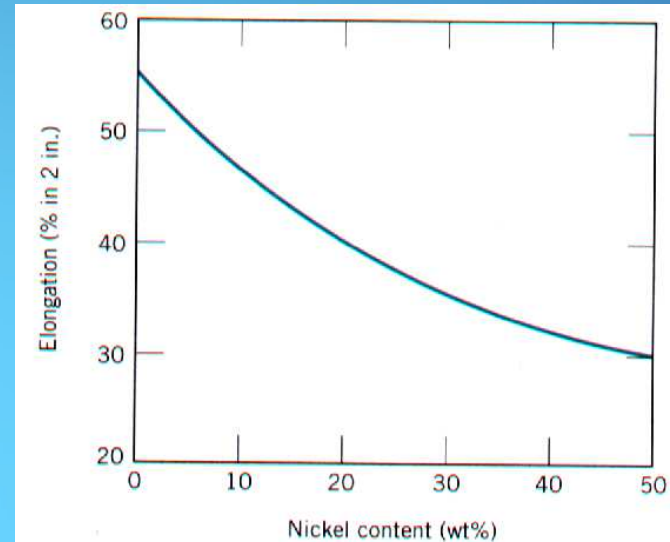
# Endurecimento por solução sólida

- ◆ 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.

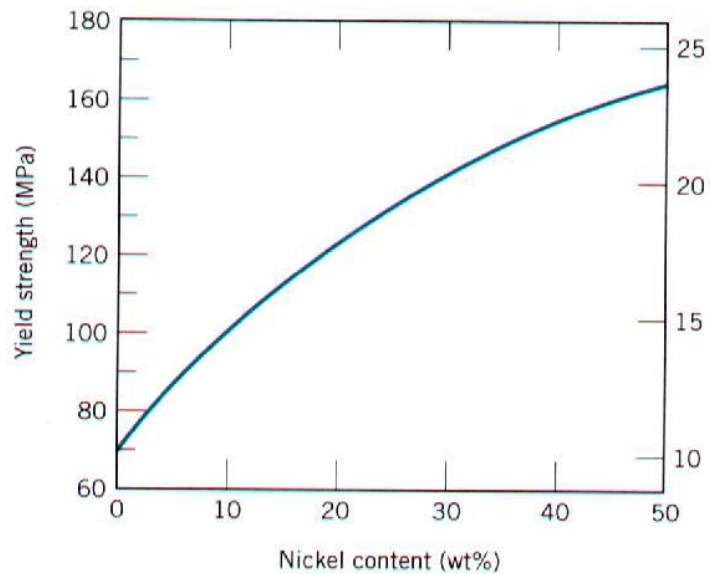
# Endurecimento por solução sólida



(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):

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

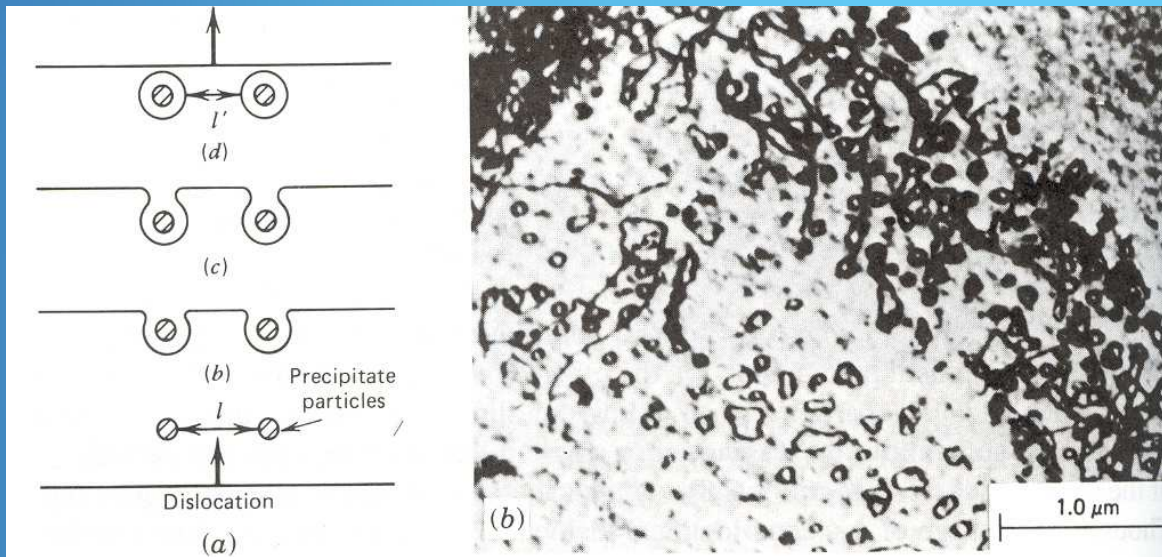
- A derivação de uma expressão para o incremento da resistência da liga em função da concentração é complexa e requer uma análise trabalhosa baseada na teoria da elasticidade. Uma expressão aproximada, entretanto, pode ser obtida para o caso de aços carbono (C dissolvido em Ferro CCC) e fornece:

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

# 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

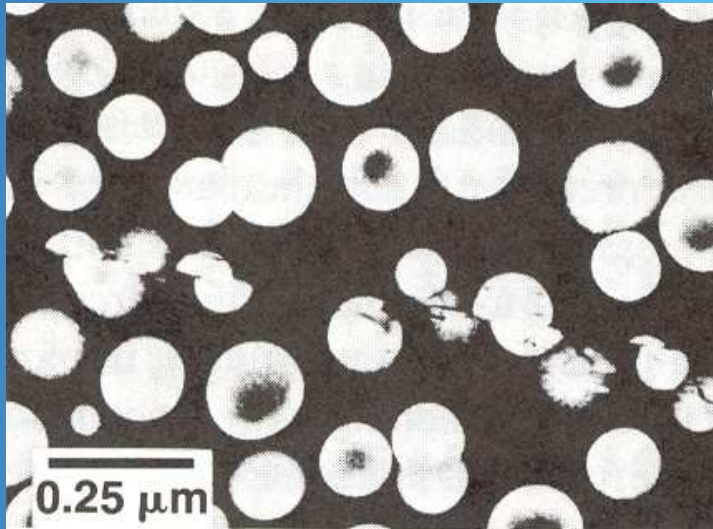
Equação de Orowan para endurecimento por dispersão de partículas:

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

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.

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

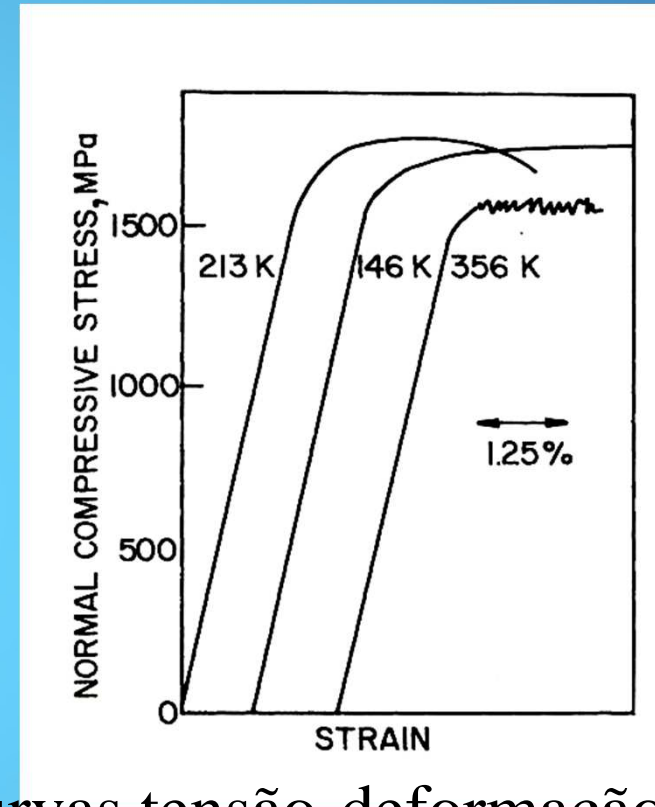
$K$ ,  $m$  e  $n$  são constantes positivas

$r$  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).

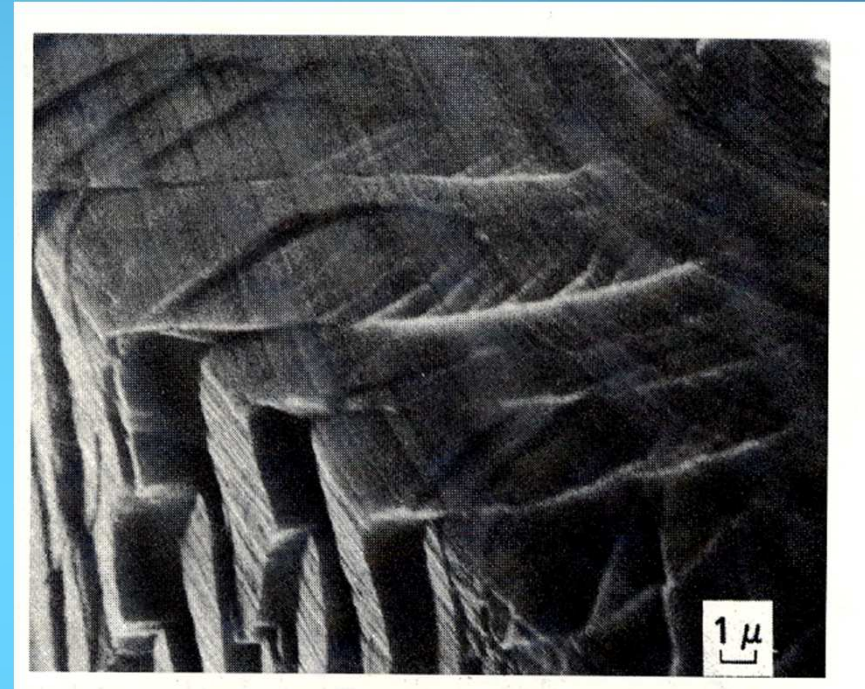
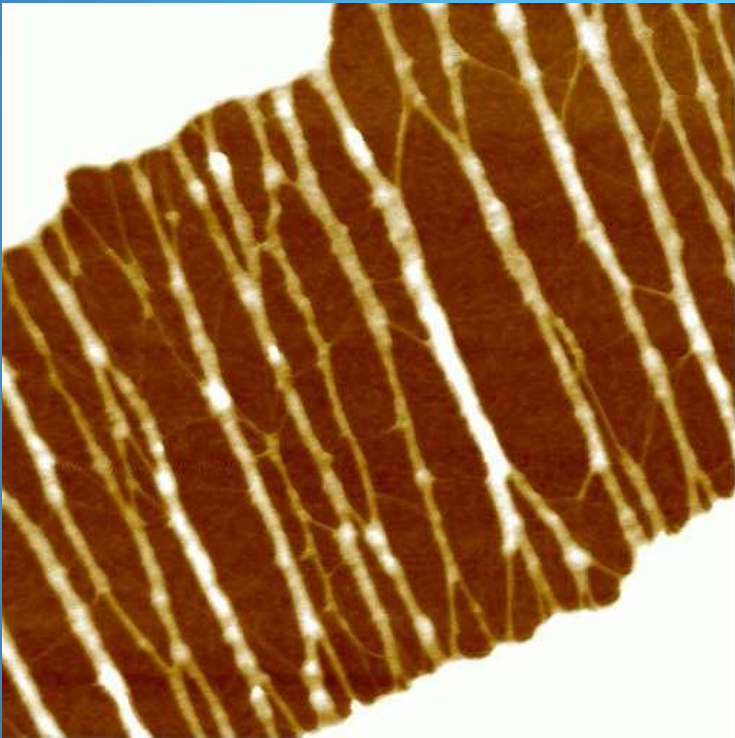


Imagem de microscopia eletrônica de varredura de fita de metal amorfo (liga  $\text{Ni}_{82.4}\text{Cr}_7\text{Fe}_3\text{Si}_{4.5}\text{B}_{3.1}$ ) deformada em tração, mostrando evidência de degraus nos pontos onde as bandas de cisalhamento intersectam a superfície.

# 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 (no xerox)

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>