



# Introdução a Ciência dos Materiais

## IMPERFEIÇÕES NO SÓLIDO

Professora: Maria Ismenia Sodero

[maria.ismenia@usp.br](mailto:maria.ismenia@usp.br)



# Tópicos abordados

1. Quais os tipos de defeitos podem ocorrer nos sólidos?
2. Como é possível controlar o número e o tipo de defeitos nos sólidos?
3. Como os defeitos afetam as propriedades dos materiais?
4. Os defeitos são indesejáveis?



# O Cristal Real

Defeitos cristalinos = **imperfeições ou irregularidade** na rede cristalina

Os cristais reais apresentam inúmeros defeitos, que são classificados por sua “dimensionalidade”.

- Defeitos Pontuais (dimensão zero)

**Vacâncias**

**Impurezas intersticiais e substitucionais**

- Defeitos Lineares (dimensão um)

**Discordâncias (dislocations)**

- Defeitos Planares (dimensão dois)

**Interfaces e fronteiras de grão, contornos de macla, defeitos de falha de empilhamento,**

- Defeitos Volumétricos (dimensão três)

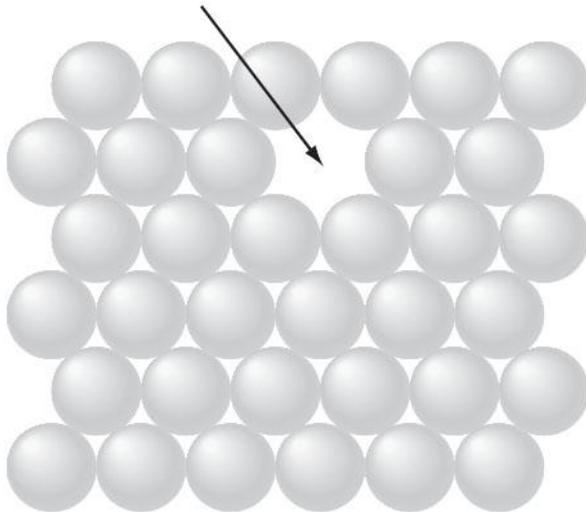
**Vazios, fraturas, inclusões e outras fases.**



# Defeitos Pontuais

## Vacância ou Lacuna

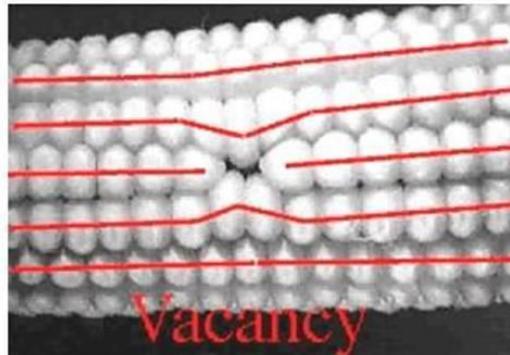
Vazios ou Lacunas



(a)

(a) Defeito pontual de lacuna;

- Sítio vago na rede cristalina
- Todos os sólidos cristalinos têm lacunas – aumento de entropia (aleatoriedade) de um cristal;
- Podem ser originadas durante a solidificação – perturbação local durante crescimento cristal – rearranjo dos átomos – mobilidade atômica;
- Podem ser introduzidas por:
  - Deformação plástica;
  - Resfriamento rápido;
  - Bombardeamento com partículas de alta energia

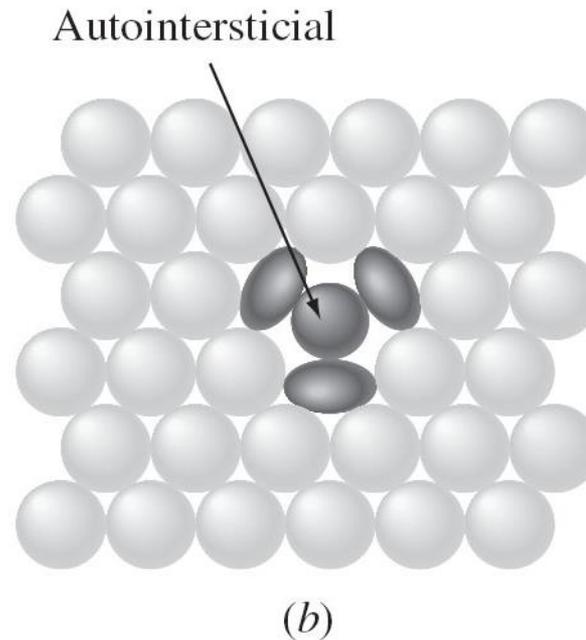




# Defeitos Pontuais

## Autointersticial

Formação deste defeito não é muito provável – introduz distorções relativamente grandes na sua vizinhança – pode ser introduzido por irradiação.



(b) defeito pontual autointersticial ou intersticial na rede compacta de um metal sólido.



# Concentração de defeitos

Para formar defeitos é necessário dispor de energia. Normalmente esta energia é dada na forma de energia térmica. Isto quer dizer que quanto maior a temperatura, maior será a concentração de defeitos.

Para muitos tipos de defeitos vale o seguinte:

$$C_D = \frac{N_D}{N} = \exp\left(\frac{-Q_D}{kT}\right) \quad N_D = N e^{\left(\frac{-Q_D}{kT}\right)}$$

$$N = \frac{N_A \rho}{A}$$

N = número de sítios atômicos  
 $N_A$  = número de Avogadro  
 $\rho$  = densidade  
A = peso atômico

Onde:

$C_D$  = concentração de defeitos

$N_D$  = número de lacunas em condições de equilíbrio

N = número total de sítios

$Q_D$  = energia de ativação para o defeito

k = constante de Boltzmann

T = temperatura absoluta em Kelvin

O número de vazios aumenta exponencialmente quando aumenta-se a temperatura.



## Por que átomos de impureza são adicionados intencionalmente?

- aumentar resistência mecânica,*
- aumentar resistência à corrosão,*
- aumentar condutividade elétrica,*

### *Adição de átomos de impureza*

- solução sólida,*
- segunda fase.*

*\* Depende do tipo de impureza, concentração, temperatura*



# Soluções sólidas metálicas

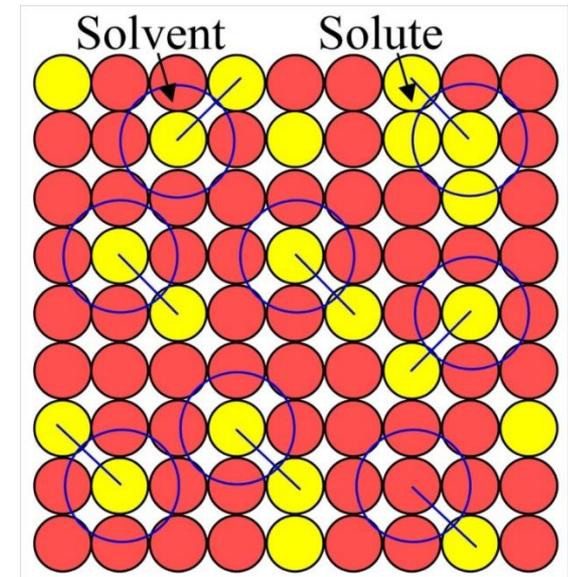
A adição de átomos de impurezas em um metal irá resultar na formação de uma solução sólida e/ou uma nova fase, dependendo dos tipos de impurezas e de suas concentrações.

**Solução sólida:** uma fase cristalina homogênea que contém dois ou mais componentes químicos.

**Fase:** Porção homogênea de um sistema que possui características físicas e químicas uniformes.

**Solvente**- na solução representa o elemento que está presente em maior quantidade;

**Soluto**- na solução representa o elemento que está presente em menor quantidade.



As soluções sólidas podem ser:

- Substitucionais
- Intersticiais



# Exemplos

**Prata 950 ou Prata de lei:** é uma liga composta por 92,5% de prata e 7,5% de cobre.

- Em temperatura ambiente, a prata pura não apresenta resistência mecânica elevada.
- A formação de uma liga com o cobre aumenta significativamente a resistência mecânica.

**Curiosidade:** O termo Prata de Lei foi estabelecido no século XIII pelo rei de Portugal Dom Afonso II ao decretar uma lei que punia quem fabricasse peças de prata com ligas com teor de prata inferior ao da prata 950, sendo que este mantém-se até hoje como padrão internacional na fabricação de jóias de prata.



**Ouro 18k (ou 750):** é uma liga composta por 75% ouro e 25% de cobre.

- O ouro puro se utilizado em jóias, por exemplo, não resistiria aos esforços mecânicos do dia-a-dia, uma simples pressão de um aperto de mão ao se cumprimentar uma pessoa deformaria uma aliança. Ao ser ligado com cobre, a liga ouro-cobre adquire resistência mecânica.



# Exemplos

**Latão:** é uma liga metálica formada por cobre e zinco, com porcentagens de zinco variando entre 3 e 45% em peso.

- São utilizados na fabricação de objetos de uso doméstico, como tachos e bacias e de instrumentos musicais de sopro, entre outros.

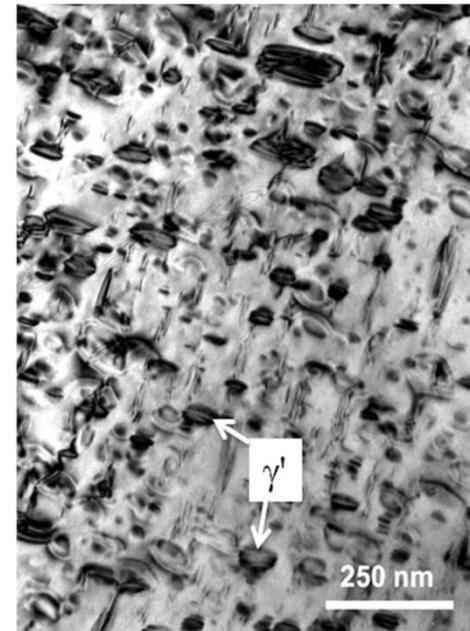




# Exemplos

## Inconel 718 (mais de 10 elementos)

- O Inconel 718 é uma liga de níquel, cromo, molibdênio projetada para resistir a uma ampla gama de ambientes severamente corrosivos, corrosão por pite e em fresta.
- Exibe rendimento excepcionalmente alto, tração, fluência e ruptura por propriedades em altas temperaturas.
- Esta liga de níquel é usado desde temperaturas criogênicas até serviço a longo prazo em 1200 ° C.



**Figura 2 - Micrografia obtida por MET da amostra de Inconel 718 no estado bruto de fusão mostrando a fase  $\gamma'$  (morfologia esférica).**



# Solução Sólida Substitucional

Nos defeitos substitucionais, os átomos de soluto repõem ou substituem os átomos do solvente.

A solubilidade máxima dos átomos do soluto na rede do solvente depende de (**Hume-Rothery**):

Fator tamanho atômico;

Estrutura cristalina

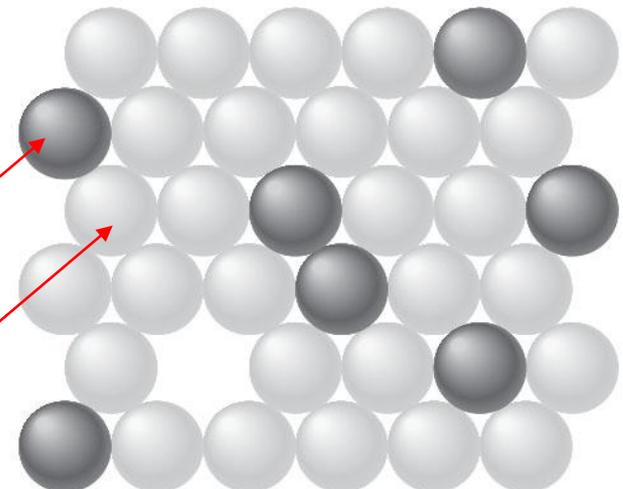
Eletronegatividade

Valência

Solução sólida substitucional. Os círculos escuros representam um tipo de átomos, e, os claros, outro. O plano atômico é o plano (111) de uma rede cristalina CFC.

Átomos de soluto

Átomos de solvente





**Ex. substitucional:** Cu-Ni, completamente solúveis um no outro

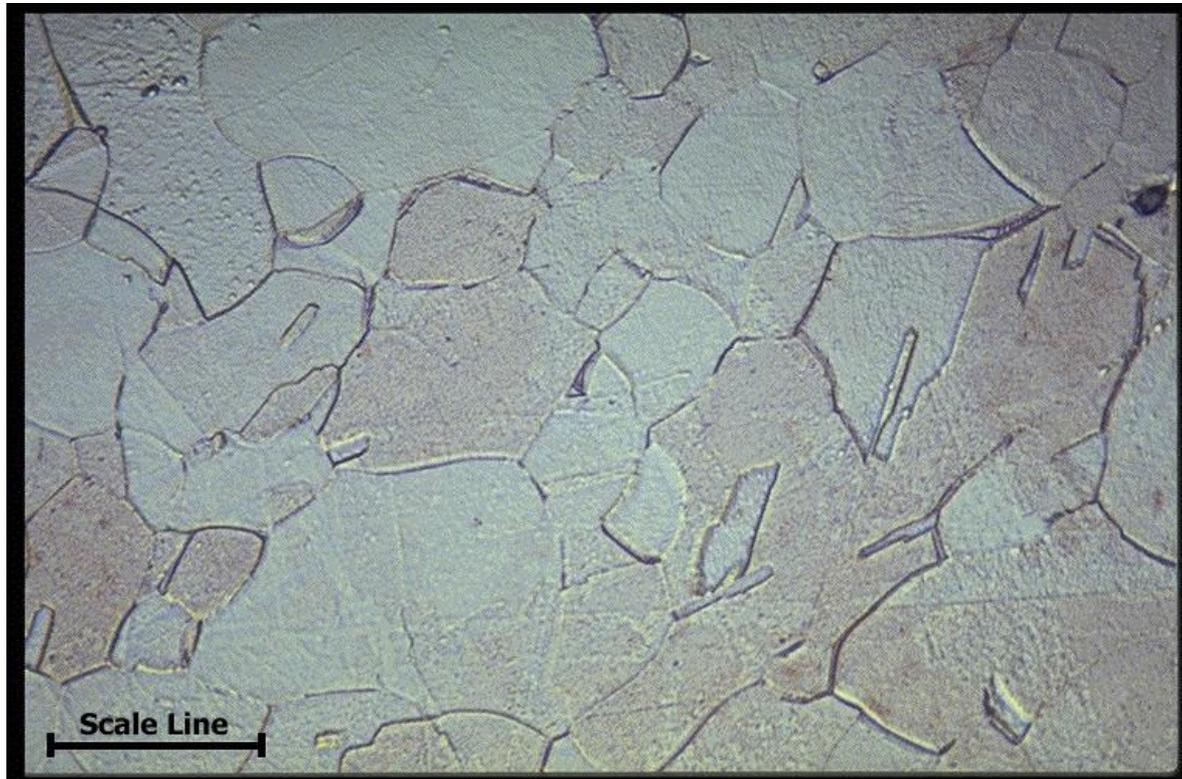
$$R_{\text{Cu}} = 0,128\text{nm}$$

$$R_{\text{Ni}} = 0,125\text{nm}$$

Ambos CFC

Eletronegatividades 1,9 e 1,8

Valências: Cu (mais comum +1, às vezes +2); Ni (+2)

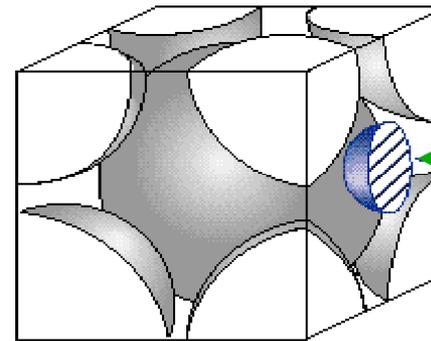


Liga Ni-Cu  
Monofásica



# Solução sólida intersticial

- Neste caso, átomos intersticiais (soluto) estão posicionados nos interstícios (ou espaços vazios) das células cristalinas do solvente, formando uma solução sólida intersticial.
- **Impureza tipo intersticial:** ocorre quando a diferença de tamanho entre soluto e solvente é grande; **geralmente a impureza (soluto) apresenta raio atômico bem menor que o do solvente.**
- Os átomos do soluto se alocam nos vazios (interstícios) da rede cristalina do solvente. Isso, produz uma distorção no reticulado, já que o átomo intersticial, geralmente, é maior que o espaço do interstício.



Átomo de Carbono ocupando um interstício na estrutura ccc do Ferro

Exemplo: Fe-C

Raio atômico: Fe: 0,140 nm

C: 0,070 nm

Raio atômico do Ferro +15%: 0,161 nm

Raio atômico do Ferro -15%: 0,119 nm

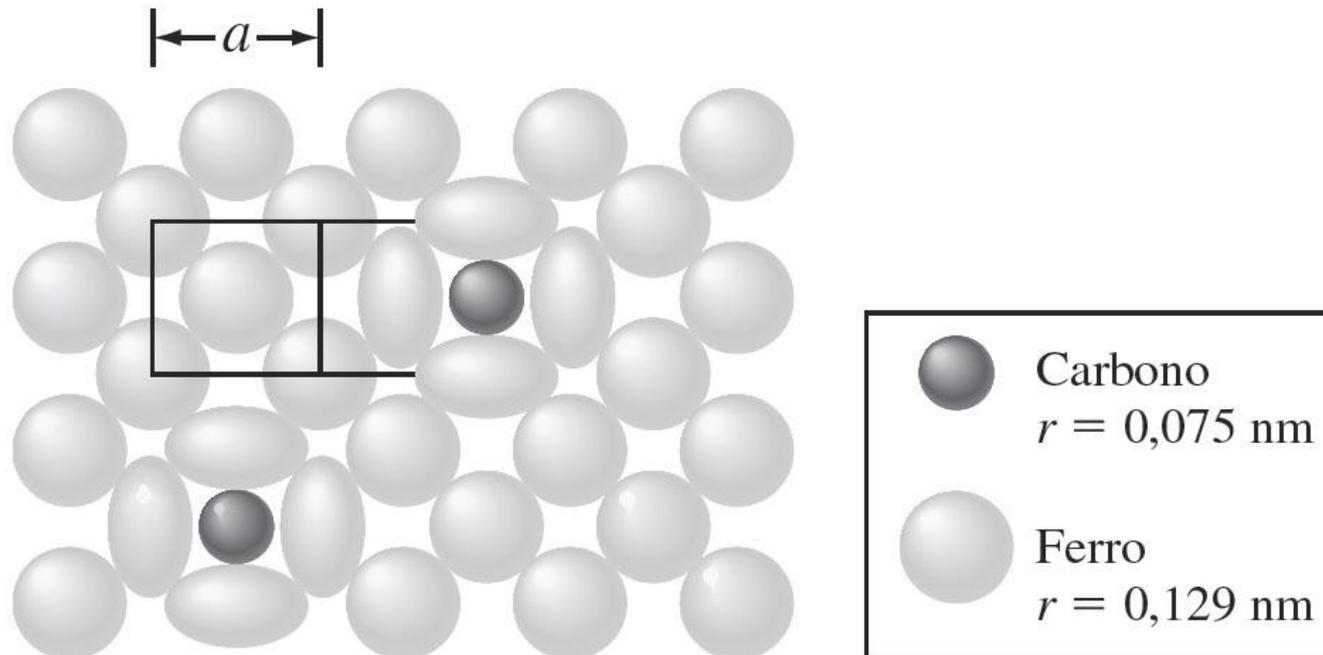


# Solução Sólida Intersticial

Esquema mostrando uma solução sólida intersticial de carbono em ferro  $\gamma$  CFC em um plano (100) imediatamente acima de 912°C. Note-se a distorção dos átomos de ferro  $\gamma$  (raio = 0,129 nm) em volta dos átomos de carbono (raio = 0,075 nm). Diferença atômica é de 42%.

O raio do maior interstício do CFC é 0,053 nm de raio, e uma vez que o raio atômico do C é 0,075, não é de se surpreender que a solubilidade máxima do carbono no Fe  $\gamma$  seja apenas 2,08%.

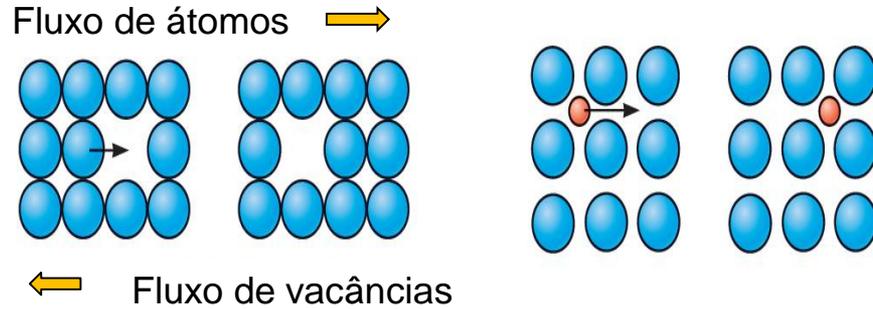
No Fe  $\alpha$  CCC, o raio do maior interstício é apenas de 0,036nm e, como resultado, imediatamente abaixo de 723°C apenas pode se dissolver intersticialmente 0,025%C.





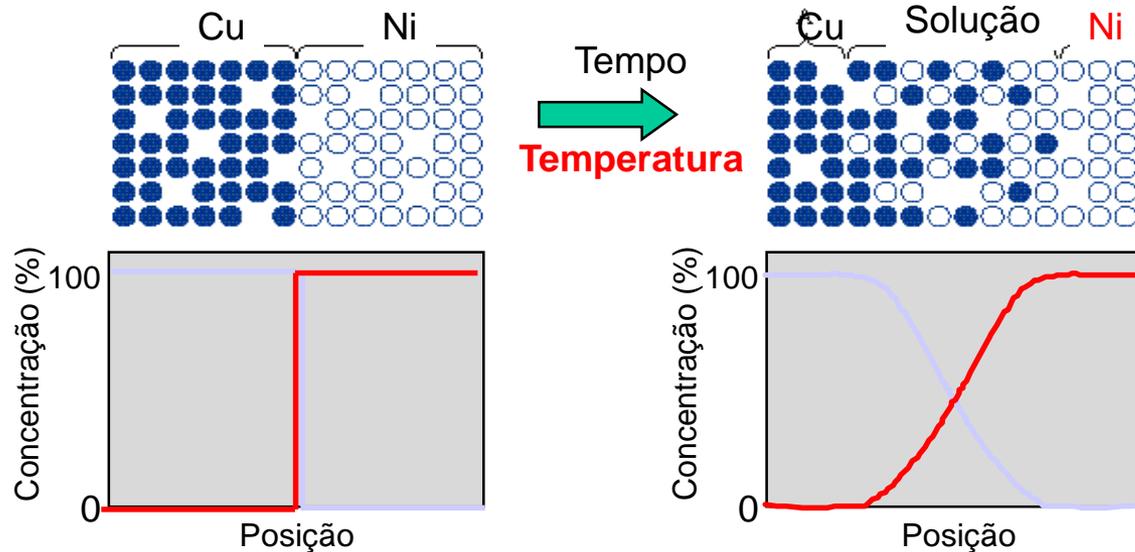
# Difusão

Devido à presença de vacâncias e interstícios, é possível haver movimento de átomos de um material dentro de outro material.



(a) Difusão por lacunas

(b) Difusão intersticial

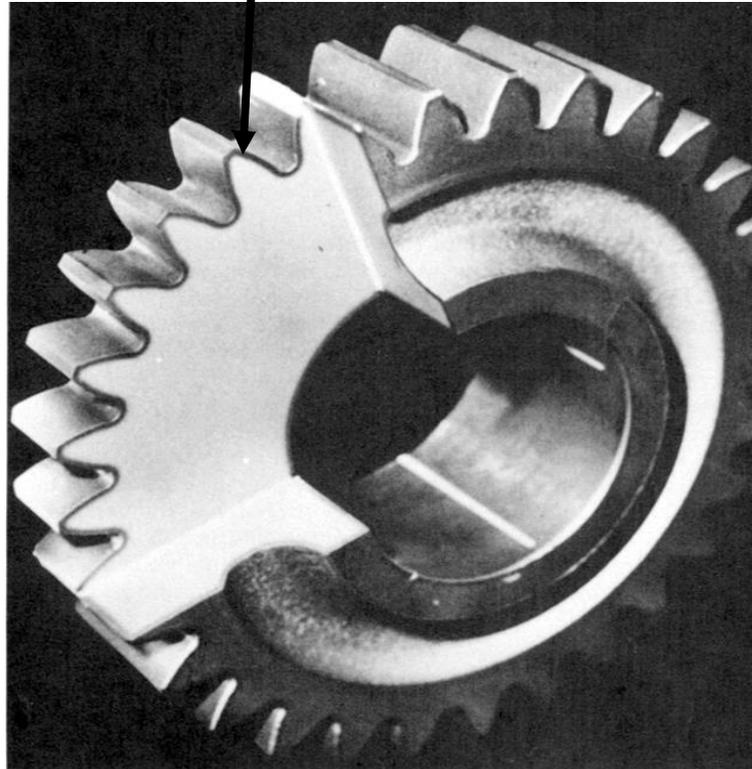




# Difusão - exemplo

É possível endurecer uma camada superficial de uma peça de aço através da difusão de carbono. Isto é obtido expondo a peça a uma atmosfera rica em hidrocarbonetos (ex.  $\text{CH}_4$ ) a alta temperatura.

Camada carbonetada





# Defeitos Lineares

## Discordâncias

Podem ser originadas durante a solidificação ou, mais comumente durante a deformação;

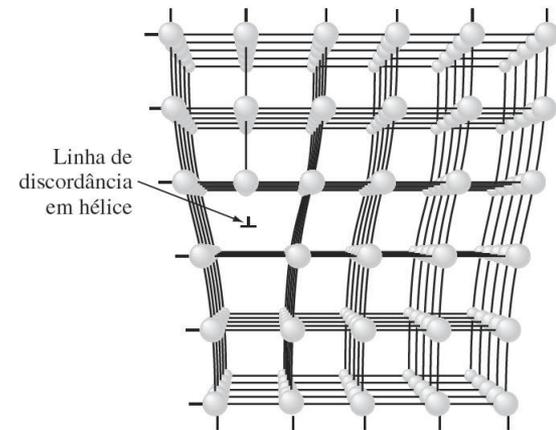
São defeitos lineares. Existe uma linha separando a seção perfeita, da seção deformada do material.

São responsáveis pelo comportamento mecânico dos materiais quando submetidos a cisalhamento. Tensão de cisalhamento teórica: Exemplo: **whiskers de carboneto de Si** com resistência superior a 40GPa.

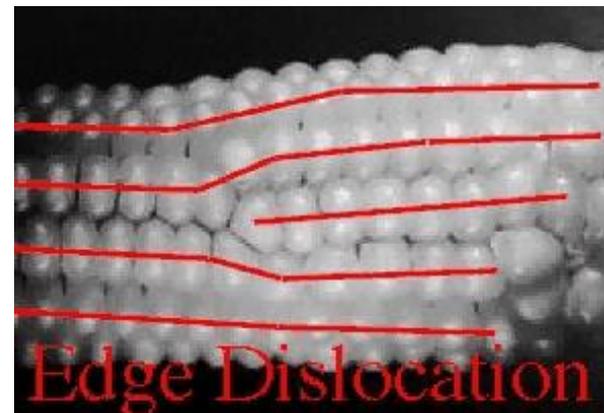
São responsáveis pelo fato de que os metais sofram escoamento em níveis de tensão muito menores do que a tensão teórica.

Existem dois tipos fundamentais de discordâncias:

- Discordância em linha (edge dislocation)
- Discordância em hélice (screw dislocation)



(a)





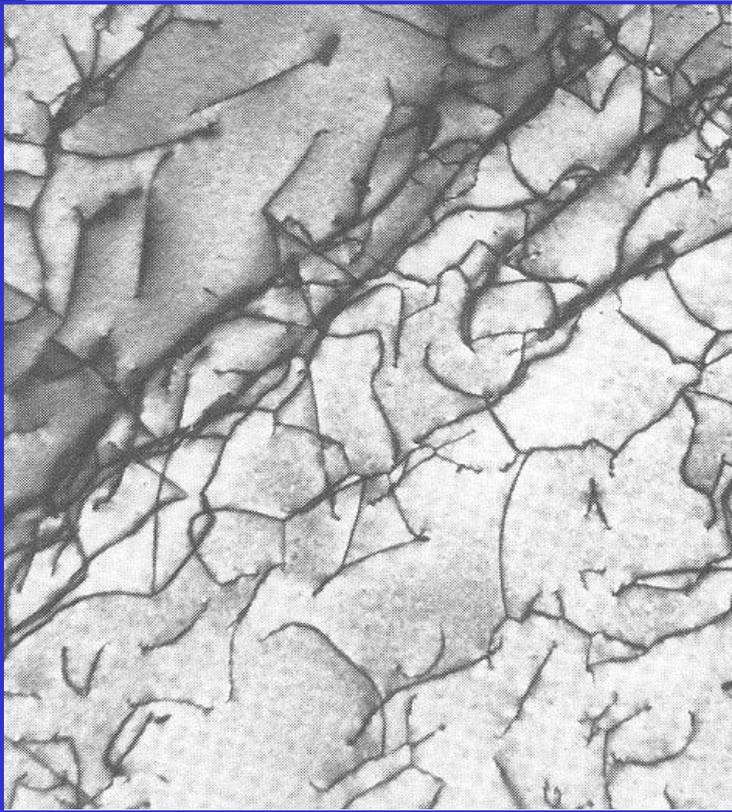
# Defeitos Lineares

## Discordâncias

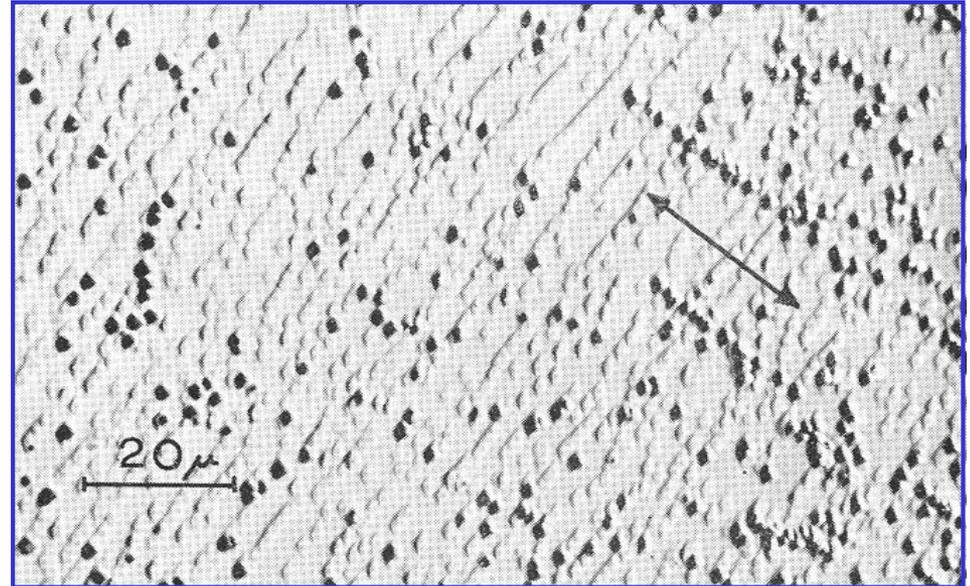
- A quantidade de discordâncias pode ser controlada pelo grau de deformação plástica e/ou por tratamentos térmicos.
  - Nos metais deformados a frio ocorre um aumento na quantidade de discordâncias.
  - Com aumento da temperatura as discordâncias podem se movimentar com maior facilidade, o que favorece o aniquilamento das mesmas.
- Um metal contém em média  $10^6$  a  $10^8$  cm de discordâncias por  $\text{cm}^3$
- Um metal severamente deformado apresenta cerca de  $10^{12}$  cm de discordâncias por  $\text{cm}^3$ .



## Defeitos de Linha



Microscopia eletrônica de transmissão de uma lâmina fina de uma liga metálica contendo discordâncias.



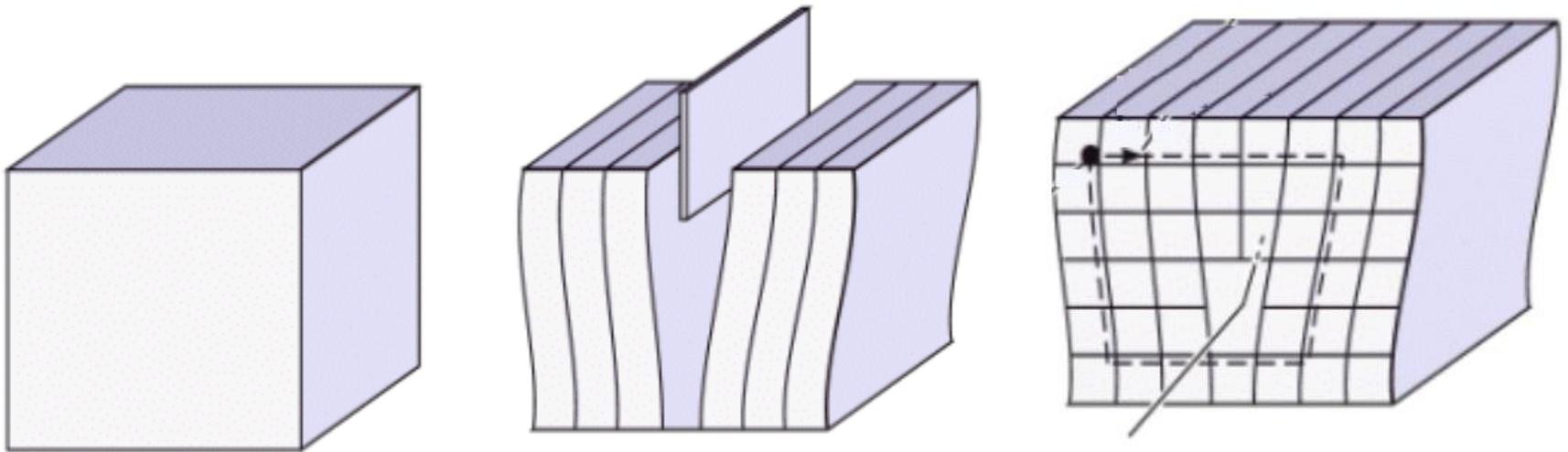
*Microscopia óptica de uma liga de cobre. Observam-se pites de corrosão, nos locais onde as discordâncias interceptam a superfície.*



# Discordância em aresta

Os átomos são deslocados perpendicularmente à linha de discordância

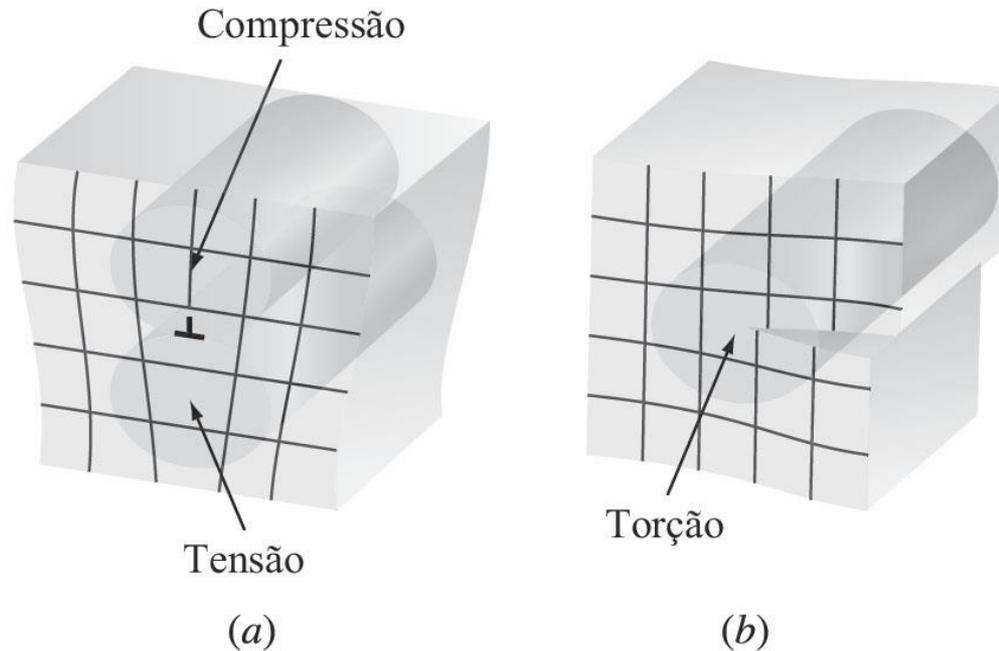
Um defeito cristalino linear associado com a distorção do retículo cristalino que é produzida na vizinhança da extremidade de um semiplano adicional de átomos no interior de um cristal.



(a) Discordância em cunha positiva em uma rede cristalina. Aparece um defeito linear na região imediatamente acima do “tê” invertido,  $\perp$ , onde um semiplano atômico foi introduzido.



# Campo de deformação ao redor da discordância



(a) Discordância em cunha

Os átomos acima da linha da discordância são pressionados uns contra os outros – **compressão**;

Enquanto que os átomos abaixo da linha da discordância são puxados uns para longe dos outros – **tração**

(a) Discordância em hélice: torção

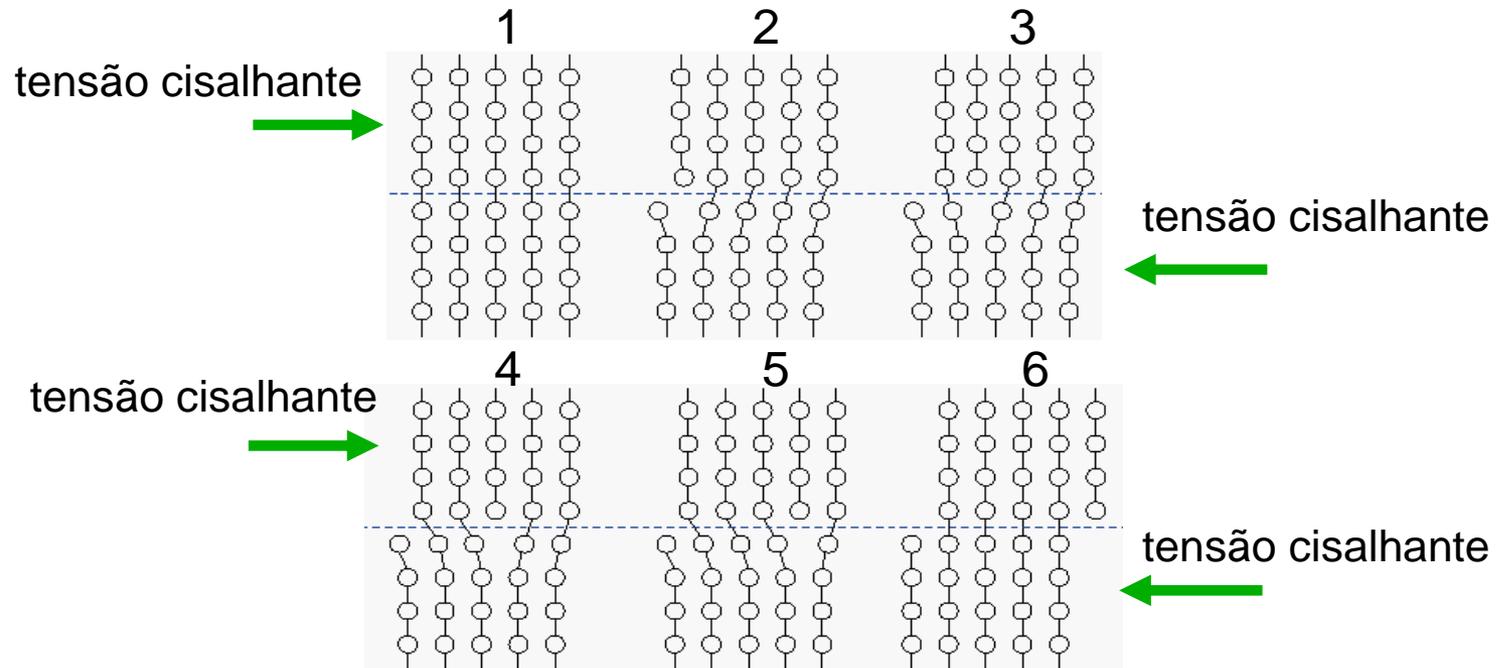


# Discordâncias e deformação mecânica

A tensão cisalhante crítica é o valor máximo, acima do qual o cristal começa a cisalhar.

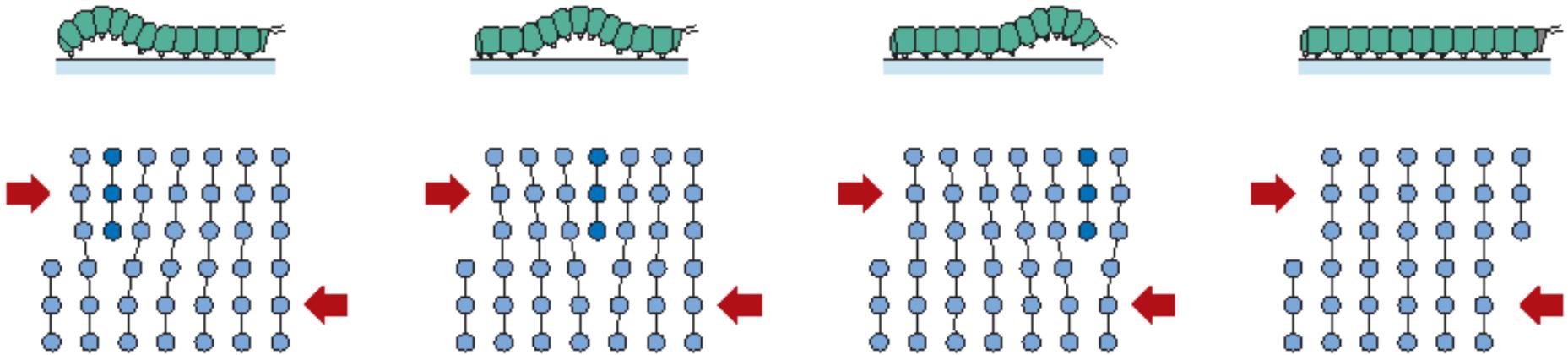
No entanto, os valores teóricos são muito maiores do que os valores obtidos experimentalmente.

As discordâncias reduzem a tensão necessária para cisalhamento, ao introduzir um processo sequencial, e não simultâneo, para o rompimento das ligações atômicas no plano de deslizamento.





# DEFEITOS LINEARES - DISCORDÂNCIAS



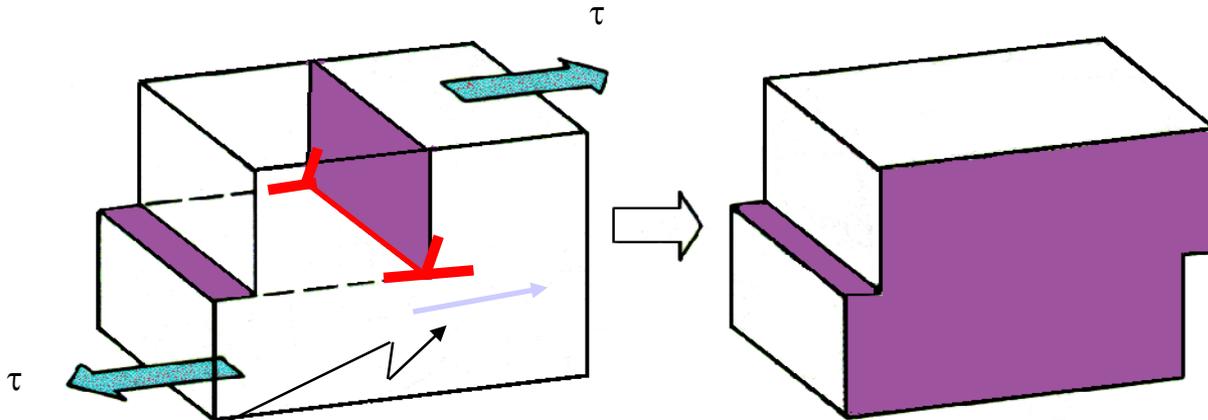
Representação da analogia entre os movimentos de uma lagarta e de uma discordância

Vídeo: Movimento de discordância aresta



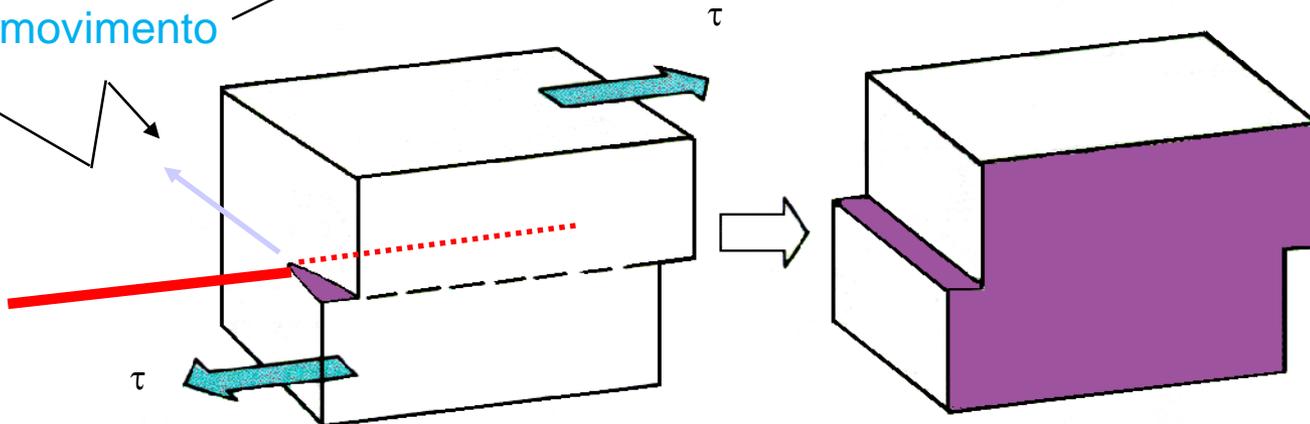
# Discordâncias e def. mec. (cont.)

Linha:  
mov. na direção  
da tensão



O efeito final  
é o mesmo.

Direção do movimento



Hélice:  
mov. normal a  
direção da tensão.



# Discordâncias e deformação plástica

A habilidade de um metal em ser deformado de maneira plástica depende da habilidade das discordâncias em se moverem;

## PLANO DE ESCORREGAMENTO – SISTEMA DE ESCORREGAMENTO.

As discordâncias não se movem com o mesmo grau de facilidade sobre todos os planos cristalográficos e em todas as direções. Existe um plano preferencial, e neste plano existem direções específicas para ocorrer o movimento das discordâncias.

A restrição ou impedimento do movimento de discordâncias confere maior dureza e mais resistência ao material; - mecanismo de aumento de resistência em metais



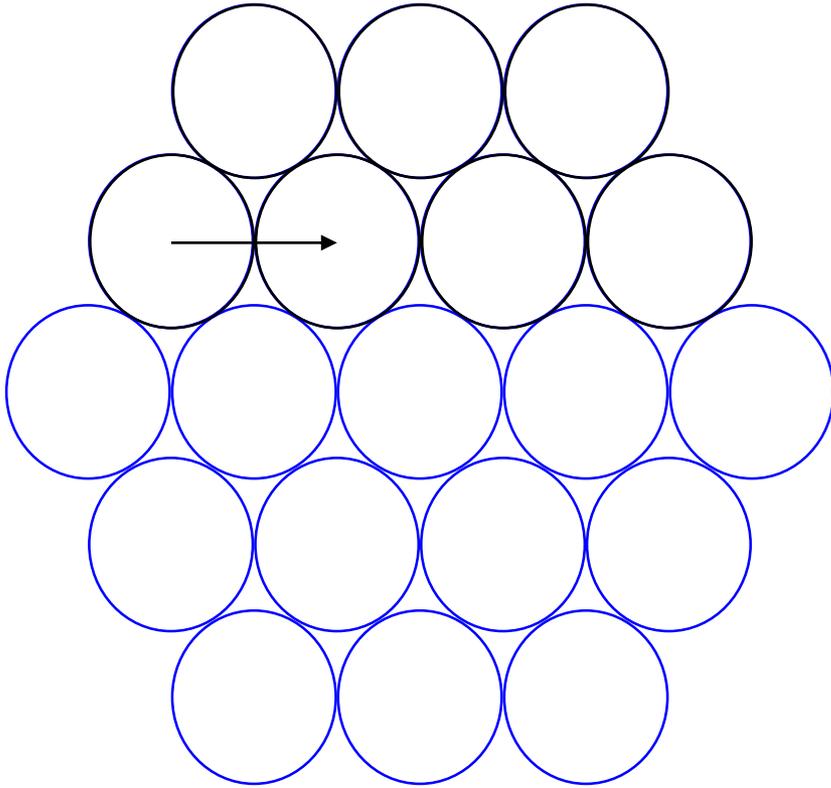
# Sistemas de deslizamento (cont.)

Estrutura Cristalina	Planos de Deslizamento	Direções de Deslizamento	Número de Sistemas de Deslizamento	Geometria da Célula Unitária	Exemplos
CCC	$\{110\}$ $\{211\}$ $\{321\}$	$\langle 111 \rangle$	$6 \times 2 = 12$ 12 24		$\alpha$ -Fe, Mo, W
CFC	$\{111\}$ —	$\langle 110 \rangle$	$4 \times 3 = 12$		Al, Cu, $\gamma$ -Fe, Ni
HC	$\{0001\}$ $\{1010\}$ $\{1011\}$	$\langle 1120 \rangle$	3 3 6		Cd, Mg, $\alpha$ - Ti, Zn

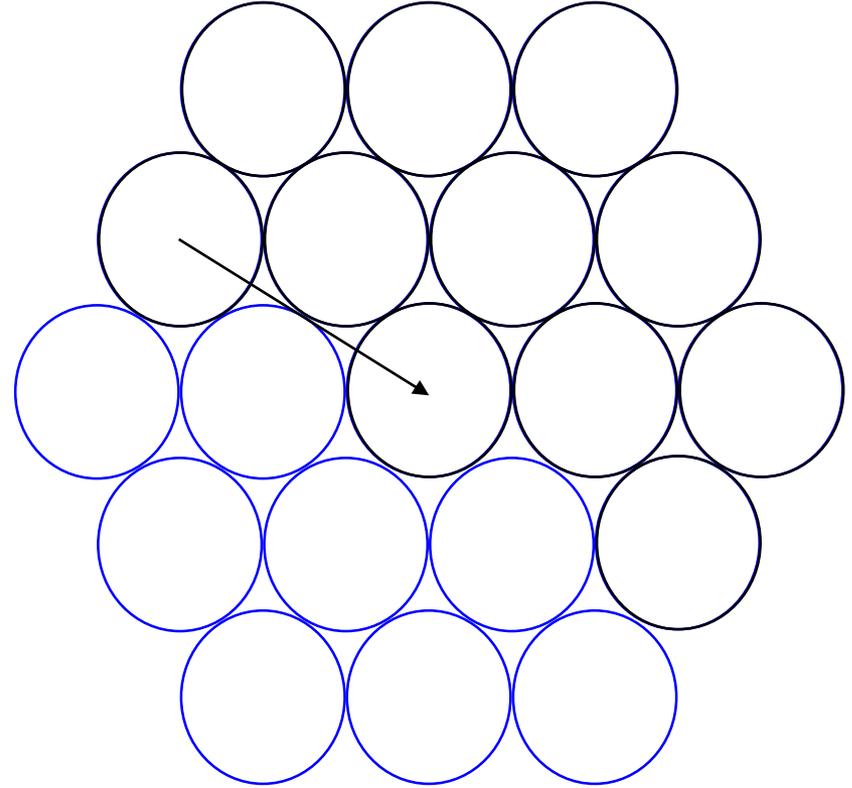


# Sistemas de deslizamento

<https://www.youtube.com/watch?v=BV1cxwxnhPs&noredirect=1>



Deslizamento de um plano compacto  
Pequeno deslizamento  $\Rightarrow$  Pequena energia  
 $\Rightarrow$  Mais provável



Deslizamento de um plano não compacto  
Grande deslizamento  $\Rightarrow$  Grande energia  
 $\Rightarrow$  Menos provável

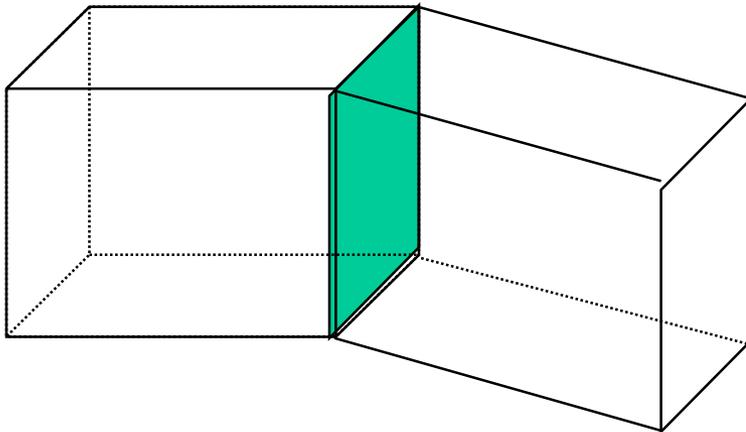


# Defeitos Planares

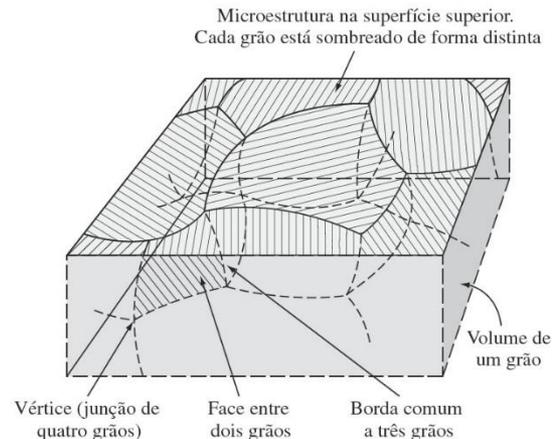
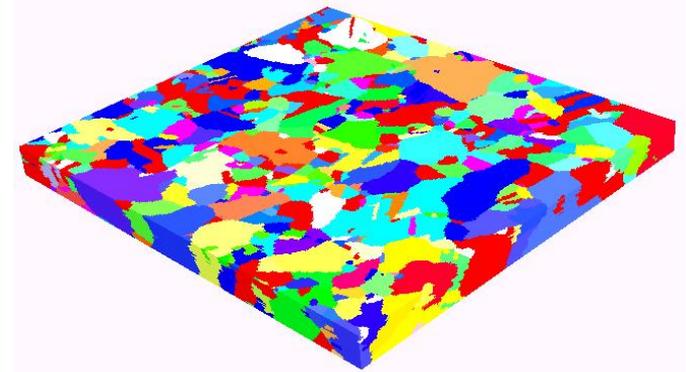
## Fronteiras de grão e interfaces

Um material poli-cristalino é formado por muitos mono-cristais em orientações diferentes.

A fronteira entre os monocristais é uma parede, que corresponde a um defeito bi-dimensional.



Separa cristais que possuem diferentes orientações cristalográficas



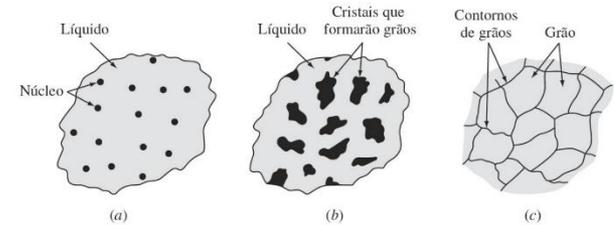


# Crescimento de cristais no meio liquido

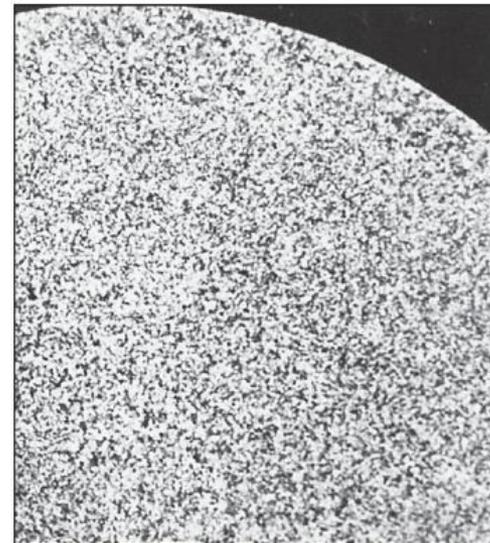
O número de locais de nucleação disponíveis no metal para a solidificação afeta a estrutura de grão do metal sólido obtido.

Numero de locais pequenos – estrutura grosseira ou de grão grosso;

**Refinador de grão:** adicionado para obter grãos menores. Ex: ligas de alumínio adicionam-se: titânio, boro ou zircônio



(a)



(b)

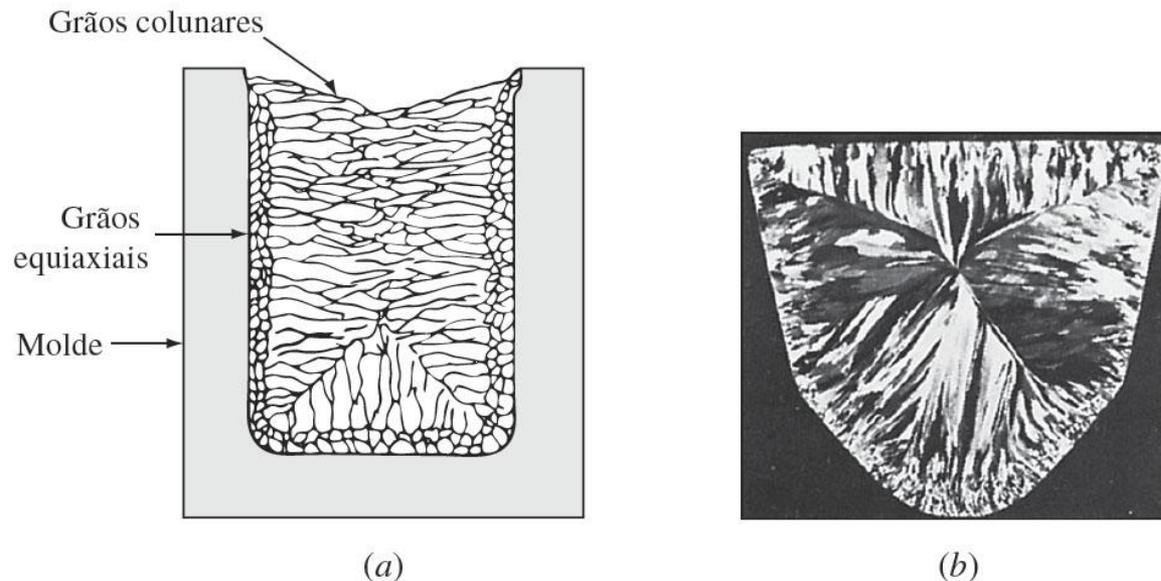
Regiões das seções transversais de dois lingotes da liga 6063 (Al–0,7% Mg–0,4% Si) com 15 cm de diâmetro, que foram vazados por um processo semicontínuo de fundição direta em coquilha. No caso do lingote (a) não foi adicionado qualquer refinador de grão; notar os grãos colunares e as colônias de cristais com a forma de penas, próximo ao centro da seção. O lingote (b) foi vazado com adição de um refinador e apresenta uma estrutura de grão fina e equiaxial. (Reagente de Tucker; tamanho real.)



# Formação de estrutura de grãos

**Grãos equiaxiais:** o elevado super-resfriamento que se verifica junto às paredes frias do molde origina uma concentração relativamente grande de núcleos – crescimento igual em todas as direções;

**Grãos colunares:** grosseiros, alongados e estreitos – gradiente de temperatura acentuado – poucos núcleos de solidificação;



**Figura 4.7**(a) Esquema da estrutura de grão de um metal solidificado em um molde frio. (b) Seção transversal de um lingote da liga de alumínio 1100 (99,0% Al) fundido pelo processo Properzi (processo de fundição centrífuga). Note-se a consistência com que os grãos colunares cresceram perpendicularmente às paredes do molde.



# Defeitos Planares

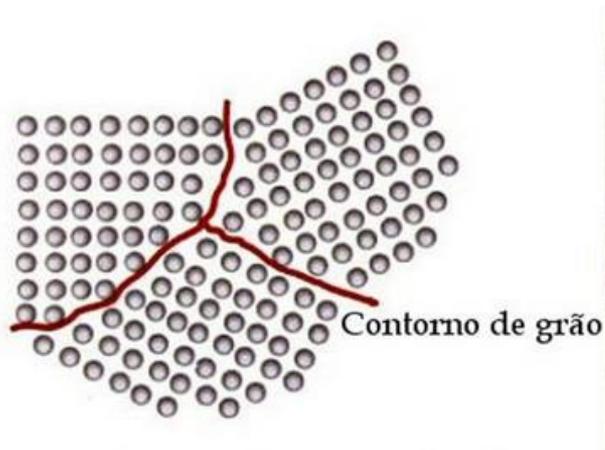
## Contorno de grão

Sólidos cristalinos geralmente consistem em um grande número de grãos separados por contornos. Cada grão (ou subgrão) é um monocristal, sendo portanto, uma região de transição entre vizinhos;

O contorno de grão é uma interface que separa dois grãos ou cristais que possuem diferentes orientações cristalográficas em materiais policristalino.

Dentro da região do contorno (espessura do contorno) existem alguns desencontros atômicos na transição da orientação cristalina de um grão para aquela de outro grão adjacente.

São possíveis vários graus de desalinhamento cristalográfico entre grãos adjacentes.



Separa cristais que possuem diferentes orientações cristalográficas



# Fronteira de baixo ângulo

- São possíveis vários graus de desalinhamento cristalográficos entre os grãos adjacentes. Quando este desencontro é pequeno, da ordem de apenas poucos graus, = contorno de grão de baixo ângulo ou contorno de inclinação (tilt boundary)
- O mais simples contorno de grão consiste em um arranjo de discordâncias em cunha entre os dois grãos. Pode ser representada por uma sequência de discordâncias em linha.
- A figura mostra alguns planos verticais terminados no contorno e cada terminação é representada por uma discordância em cunha.
- O ângulo de rotação é pequeno ( $< 15^\circ$ ).
- O contorno de baixo ângulo tem tendência de se combinar e formar contornos de maior desorientação, pois a junção de duas interfaces de baixo ângulo, formando um contorno de alto ângulo sempre resulta em decréscimo de energia.

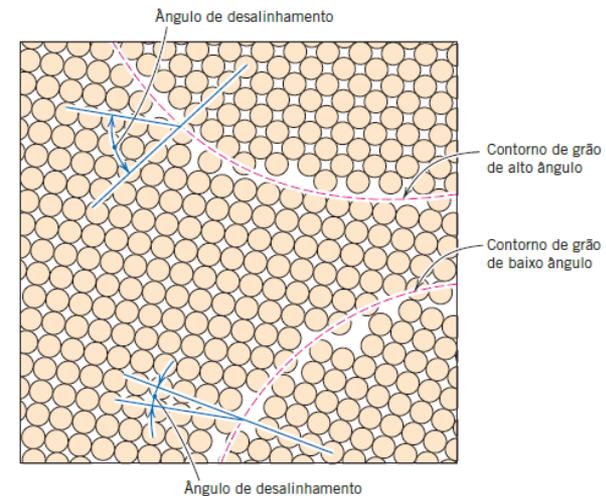
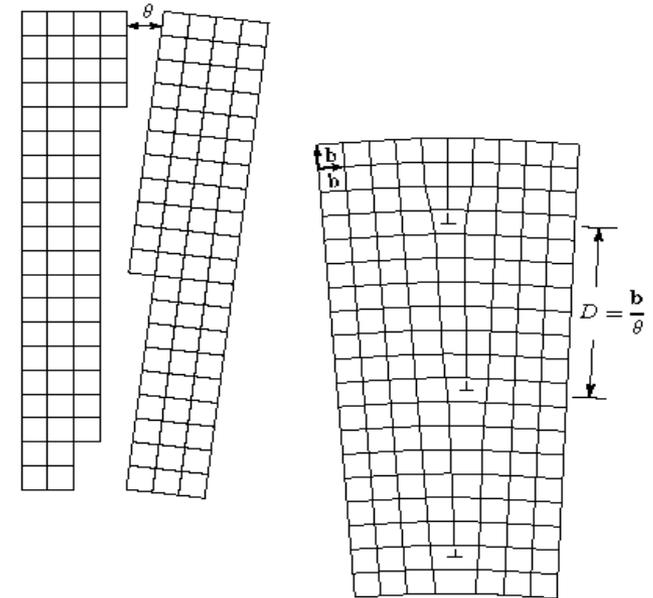


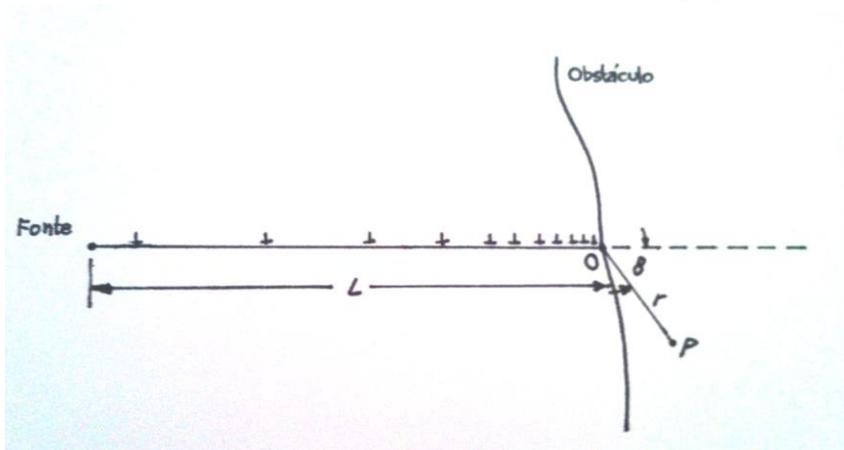
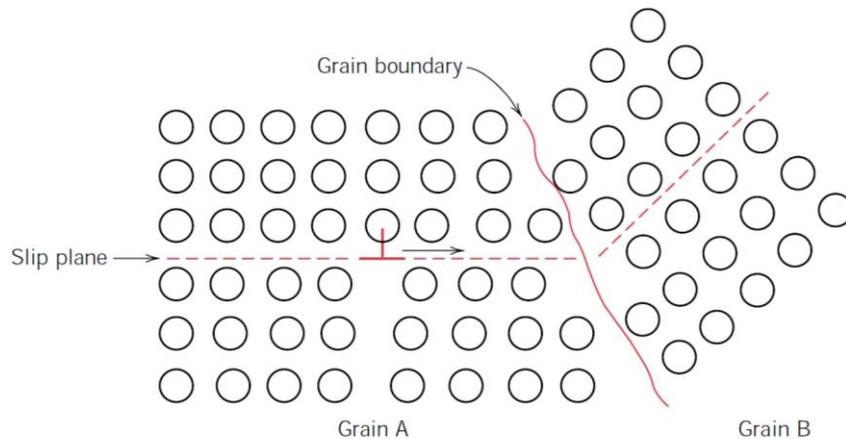
Figura 4.7 Diagrama esquemático mostrando contornos de grão de baixo e de alto ângulo e as posições atômicas adjacentes.



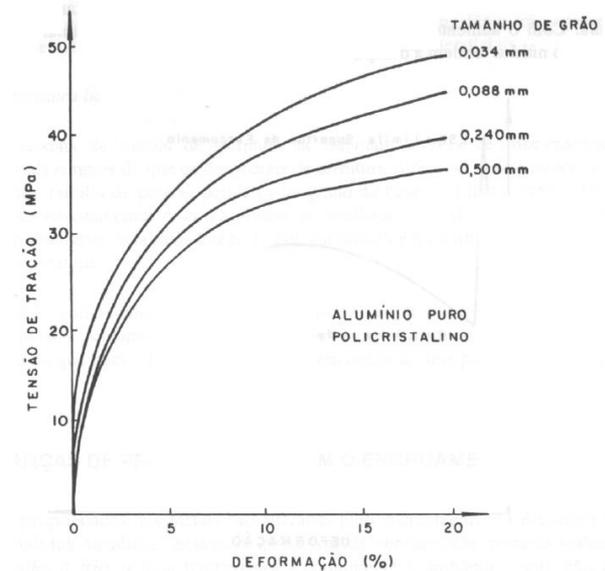
# O papel do contorno de grão

O papel do contorno de grão na causa da deformação heterogênea e na introdução do deslizamento múltiplo

Devido as diferentes orientações cristalinas presentes, resultantes do grande número de grãos, as direções de escorregamento das discordâncias variam de grão para grão



Influência da tamanho de grão na tensão de escoamento



Empilhamento de discordâncias



# Mecanismos de aumento de resistência dos metais

1. Aumento da resistência por adição de elemento de liga (formação de solução sólida ou precipitação de fases)
2. Aumento da resistência por redução do tamanho de grão
3. Aumento da resistência por encruamento
4. Aumento da resistência por tratamento térmico (transformação de fase)



# Contorno de grão e deformação

Os limites entre os grãos num agregado policristalino constituem-se em regiões cristalinas perturbadas de somente alguns diâmetros atômicos de magnitude radial. No caso geral, a orientação cristalina muda abruptamente na passagem de um grão para o outro através do contorno de grão.

Quando se deforma um monocristal em tração, ele geralmente é livre para se deformar num único sistema de deslizamento por boa parte da deformação e mudar sua orientação pela rotação da rede conforme vai ocorrendo a alongação.

Entretanto, grão individuais num material policristalino não estão sujeitos a um único sistema de tensão uniaxial quando este é deformado em tração.

Num policristal, **a continuidade deve ser mantida**. Então, os contornos entre cristais deformados devem permanecer intactos. Embora cada grão tente deformar-se homogeneamente em conformidade com a deformação do material, como um todo, as restrições impostas pela continuidade causam diferenças de deformação entre as vizinhanças dos grão e no interior de cada grão.

Embora a deformação seja contínua através dos contornos, pode haver um gradiente de deformação nesta região. Conforme o tamanho de grão diminui e a alongação aumenta, a deformação se torna mais homogênea. Devido às restrições impostas pelo contorno de grão, o escorregamento ocorre em vários sistemas e também em planos não compactos nas regiões próximas do contorno – levando a um aumento da dureza nesta região.

Conforme o diâmetro do grão vai diminuindo, mais os efeitos dos contornos vão sendo sentidos no interior do grão. Então, o encruamento de metais com grãos finos será maior do que em um agregado cristalino de grãos grosseiros.



# Dependência da tensão de escoamento com o tamanho de grão

## EQUAÇÃO DE HALL-PETCH

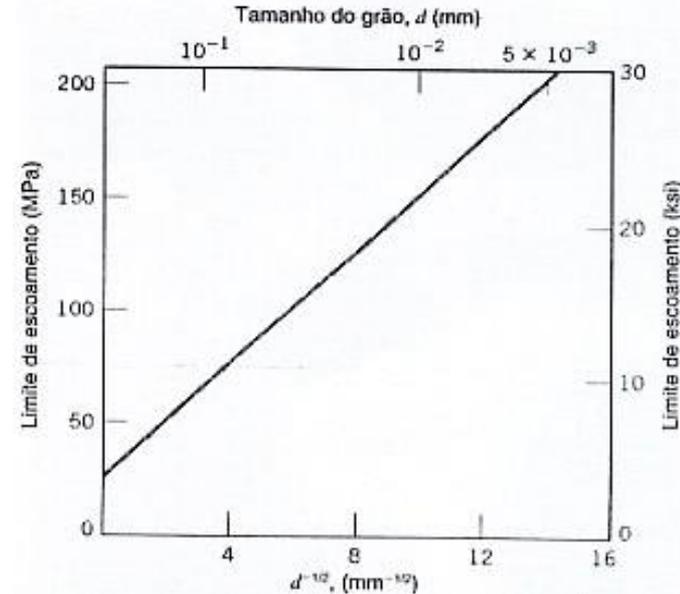
$$\sigma_{esc} = \sigma_0 + K_e (d)^{-1/2}$$

$\sigma_0$  e  $K_e$  são constantes

$\sigma_0$  = tensão de atrito oposta ao movimento das discordâncias

$K_e$  = constante relacionada com o empilhamento das discordâncias

$d$  = tamanho de grão



Essa equação não é válida para grãos muito grosseiros ou muito pequenos

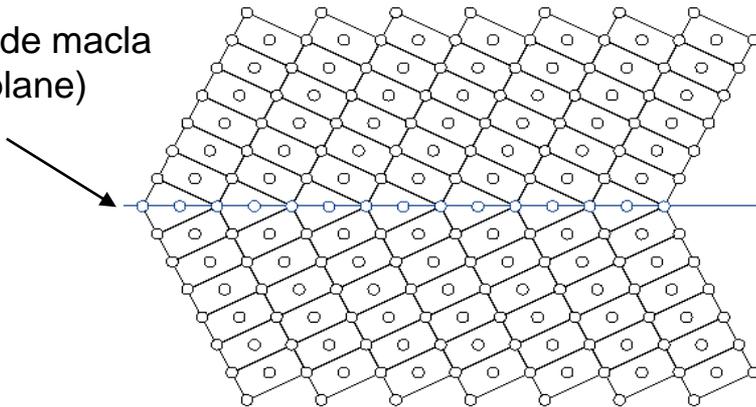


# Macla (twin)

É um tipo especial de contorno - simetria específica em espelho da rede cristalina;

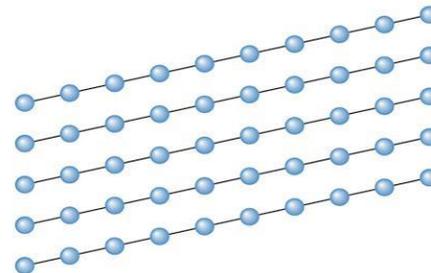
Uma força de cisalhamento pode produzir, por deslocamentos atômicos tal que um dos lados de um plano os átomos ficam localizados em posições de imagem em espelho em relação aos átomos no outro lado do plano.

Plano de macla  
(twin plane)

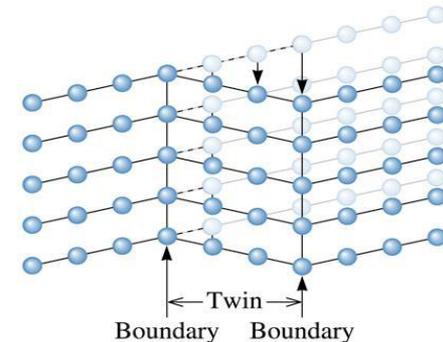


(c) 2003 Brooks/Cole  
Publishing / Thomson  
Learning

Formadas pela aplicação de  
tensão mecânica ou em  
tratamentos térmicos de  
recozimento (annealing)

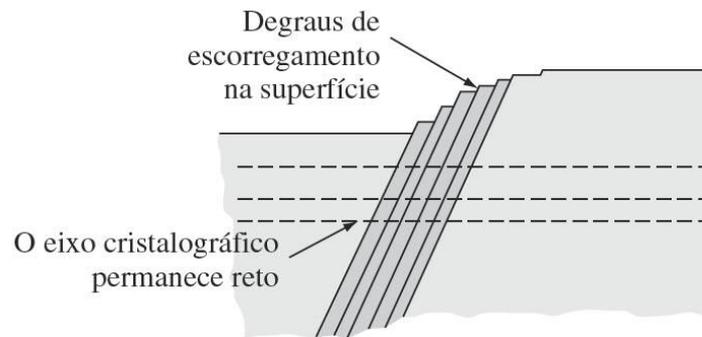
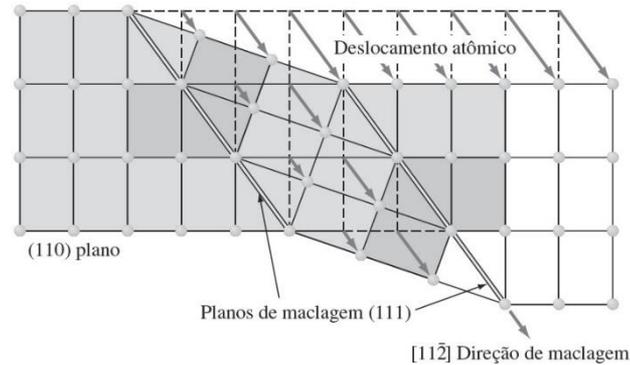


(a)

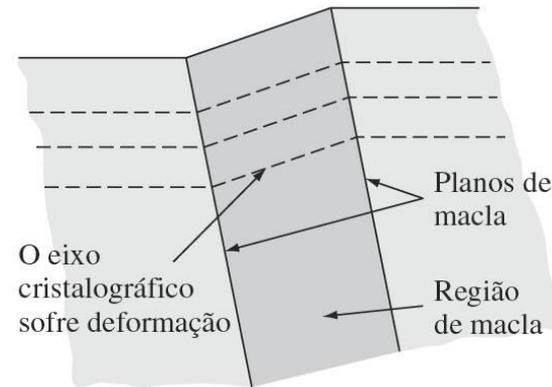


(b)

# Deformação por maclação



(a)



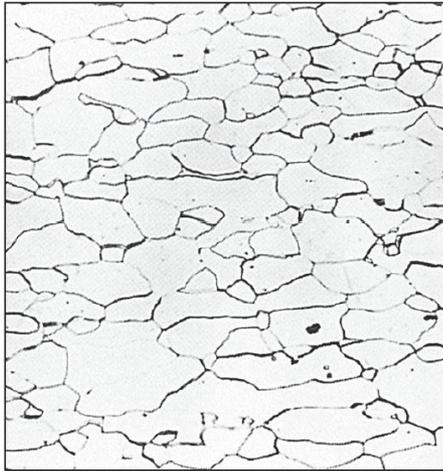
(b)

Esquema da superfície de um material metálico deformado por (a) escorregamento e (b) maclagem.

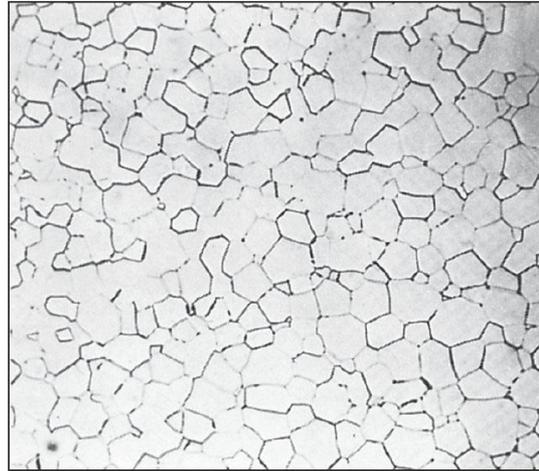


# Técnicas Microscópicas

## MO



(a)



(b)

(R.E. Gardner e G.W. Robinson, J. Am. Ceram. Soc., 45: 46 (1962).)

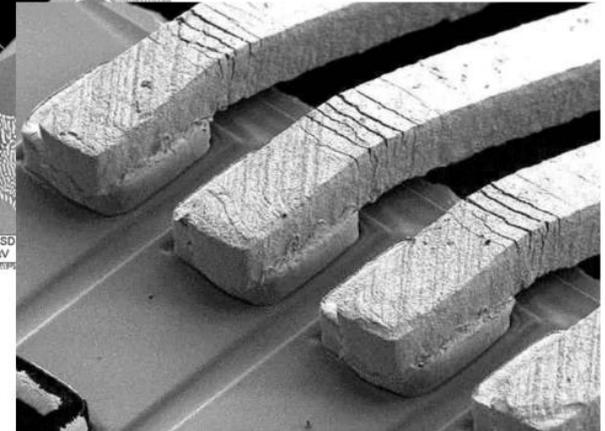
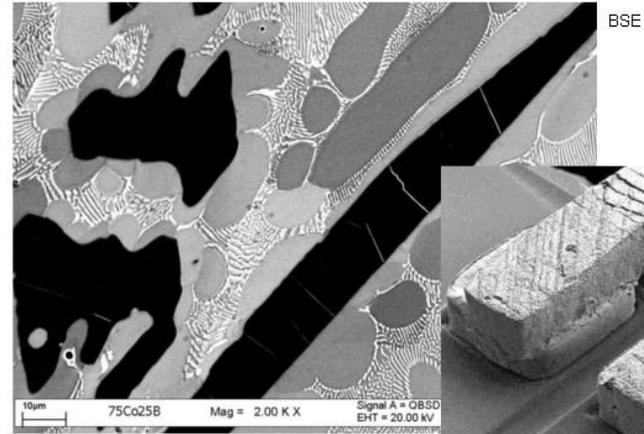


Contornos de grão na superfície de amostras polidas e atacadas quimicamente, observadas em microscopia óptica. (a) Aço com baixo teor de carbono (Ampliação 100 $\times$ ). (b) óxido de magnésio (Ampliação 225 $\times$ ).



# Técnicas Microscópicas

## MEV

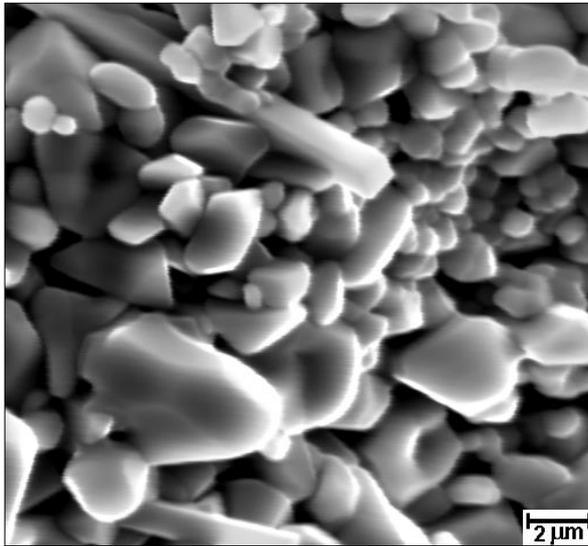


S. Pacomik DCIMM PUC-Rio

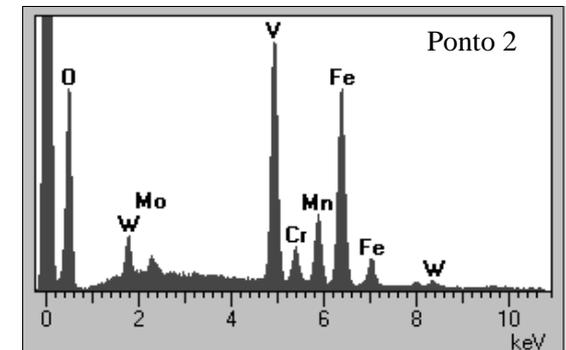
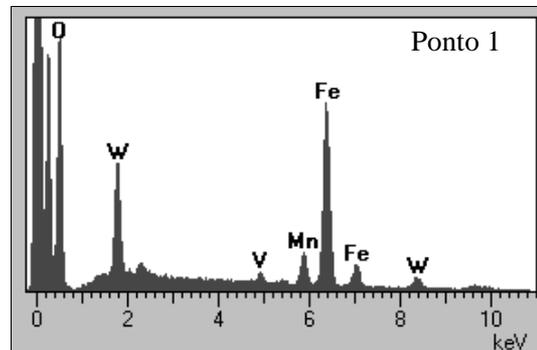
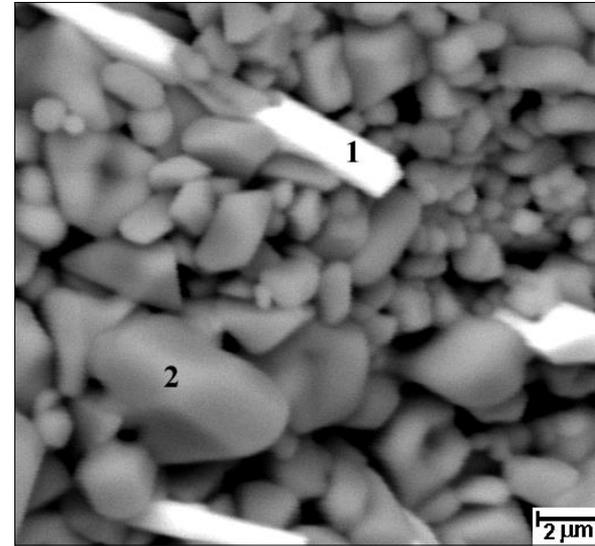


# Imagens de MEV

Elétrons Secundários (SE)



Elétrons Retro-espalhados (BSE)



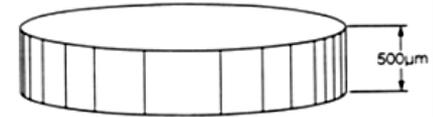


# Técnicas Microscópicas

## MET



Disc Preparation



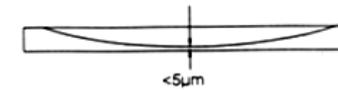
(bulk, plan view, cross sections and small objects)

Disc grinding

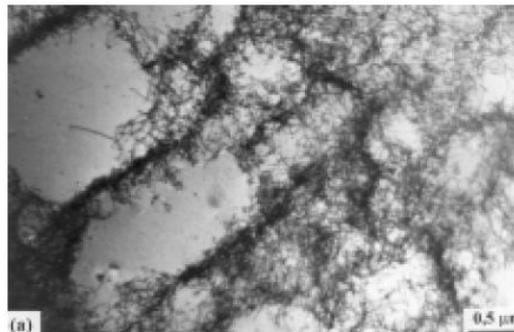
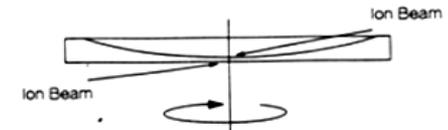


Dimpling

(Si for cross sections)



Low Angle  
Ion milling



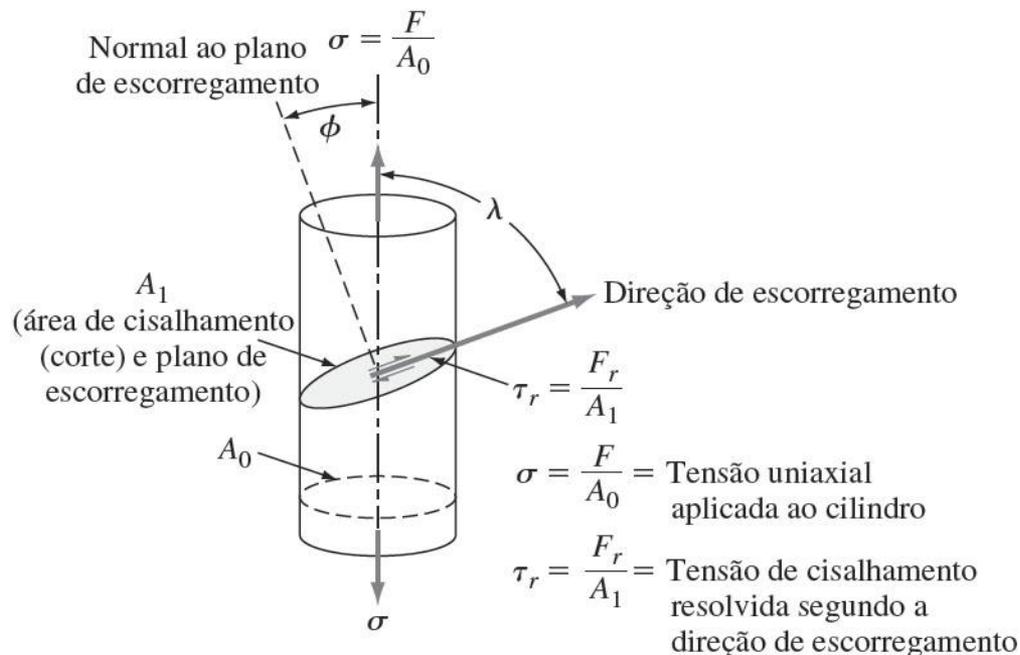


# Tensão Cisalhante Crítica para deslizamento

A extensão de deslizamento num monocristal depende da magnitude da tensão cisalhante produzida pela ação de cargas externas, da geometria da estrutura cristalina e da orientação dos planos de deslizamento ativos em relação às tensões de cisalhamento.

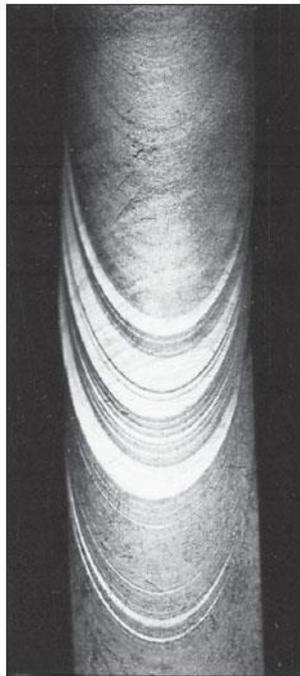
O deslizamento começa quando a tensão cisalhante no plano de deslizamento, segundo a direção de deslizamento, atinge um valor limite denominado **Tensão cisalhante resolvida crítica**.

Este valor é o equivalente para monocristais ao limite de escoamento da curva  $\sigma \times \epsilon$ .



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

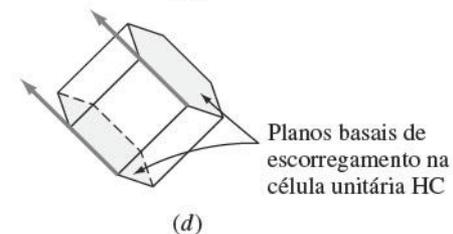
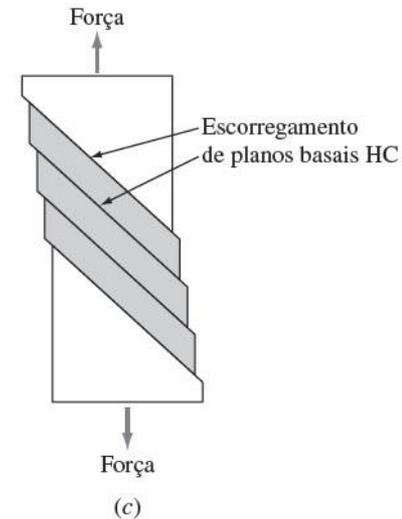
# Deformação Plástica em Monocristal



(a)



(b)



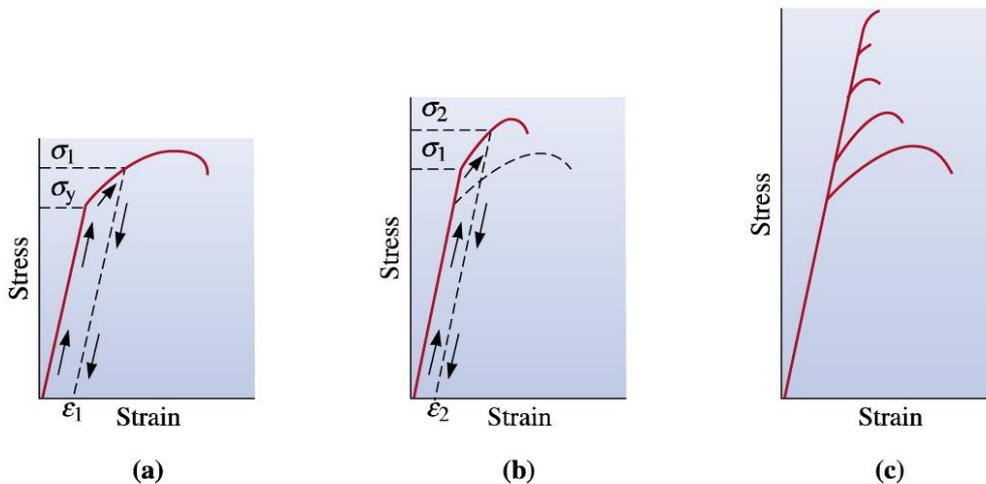
Monocristal de zinco deformado plasticamente, mostrando bandas de escorregamento: (a) vista frontal do cristal, (b) vista lateral do cristal, (c) vista lateral esquemática, indicando os planos basais de escorregamento no cristal HC e (d) indicação dos planos basais de escorregamento na célula unitária HC.



# Encruamento

**Definição:** aumento da tensão necessária para produzir deslizamento devido à deformação plástica do material

Causado pela interação entre as discordâncias uma com as outras e com as barreiras que impedem o seu movimento

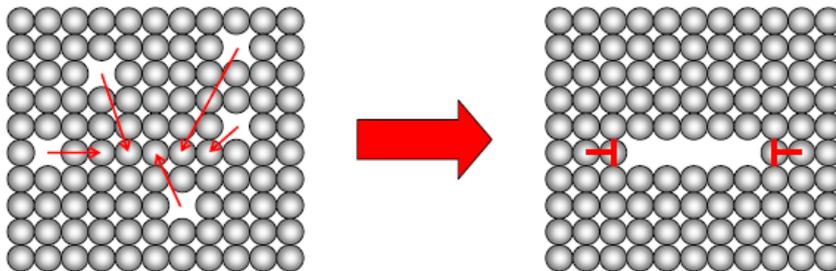


Curvas tensão –deformação com trabalho a frio (a) um corpo de prova é tensionado além do limite de escoamento, e então a tensão é removida. (b) o mesmo corpo de prova apresenta novos limites de escoamento e de resistência à tração maiores, porém ductilidade menor. (c) ao repetir o mesmo procedimento, a resistência aumenta ainda mais e a ductilidade diminui, o que fragiliza a liga.

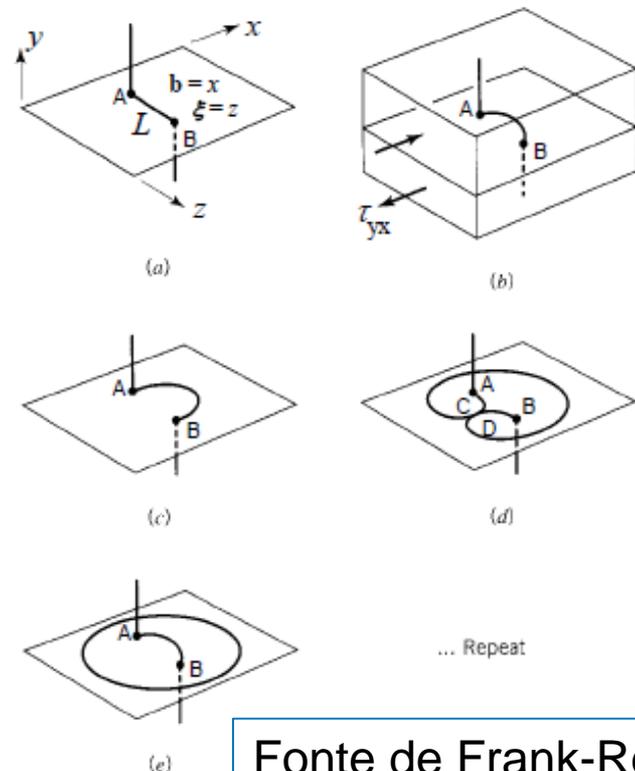


# Fontes de discordâncias

A densidade de discordâncias em um metal aumenta com a deformação ou com o encruamento, devido a multiplicação das discordâncias ou à formação de novas discordâncias – a distância média entre as discordâncias diminui – **O resultado é que o movimento de uma discordância é dificultado pela presença de outras discordâncias.**



Condensação de lacunas

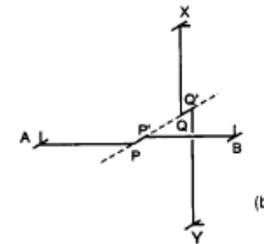
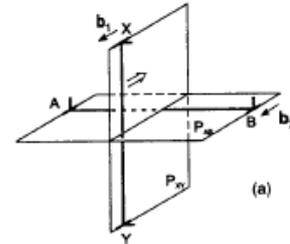
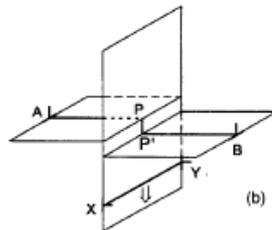
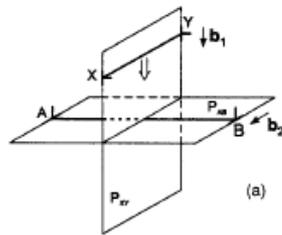


Fonte de Frank-Read



# Intersecção de discordâncias

É muito frequente que uma discordância ao se movimentar no seu plano de deslizamento, intercepte outras discordâncias que o cruzam. Este mecanismo de intersecção de discordâncias desempenha um papel importante no processo de encruamento.

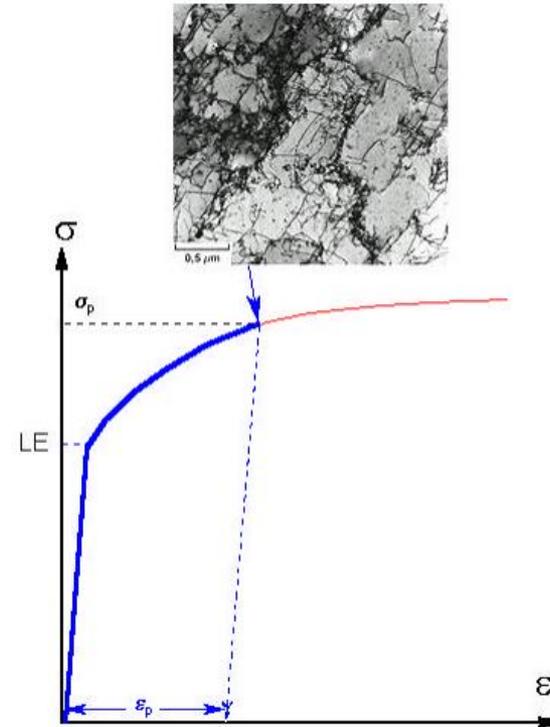
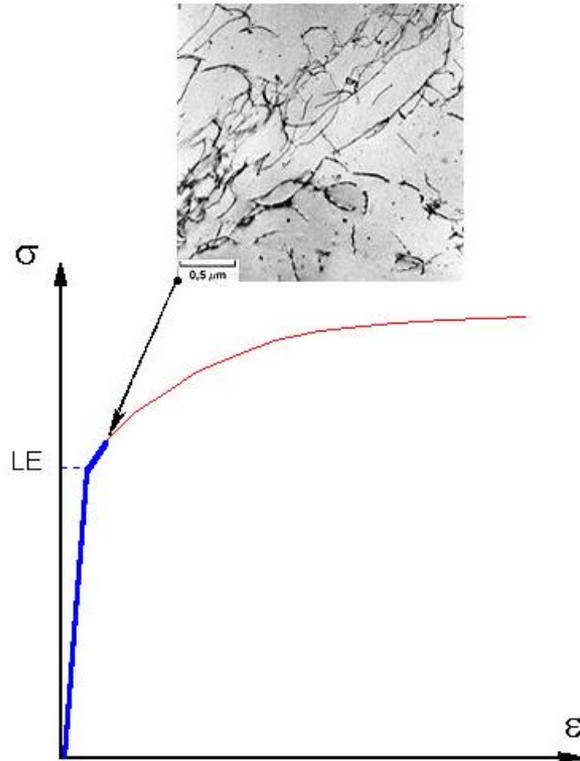


Discordâncias bloqueadas que se formam a partir de reações entre discordâncias



# Encruamento

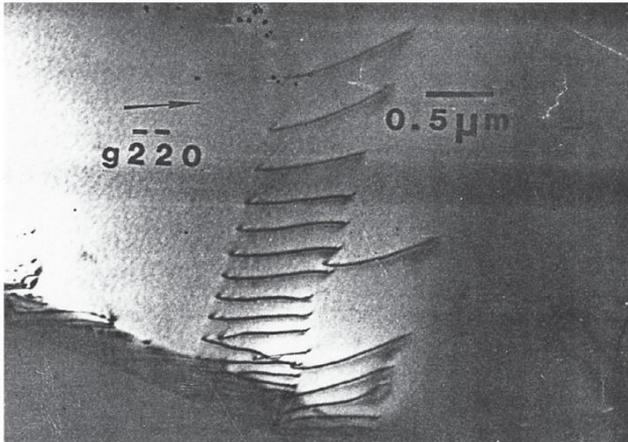
Metal policristalino dúctil  
Ferro deformado plasticamente  
Densidade de discordâncias :  
 $2 \times 10^8 \text{ cm/cm}^3$



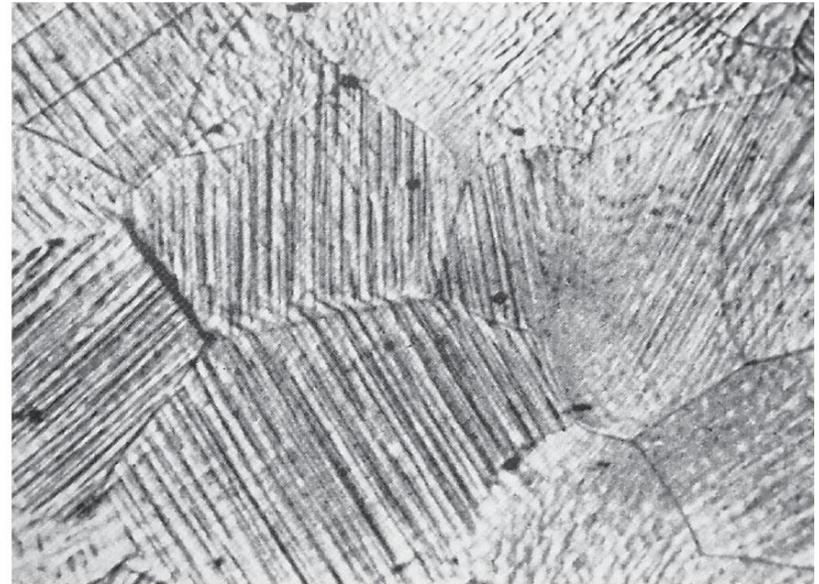
Metal policristalino dúctil  
Ferro deformado plasticamente  
Densidade de discordâncias :  
 $2 \times 10^{10} \text{ cm/cm}^3$



# Deformação Plástica em Policristais



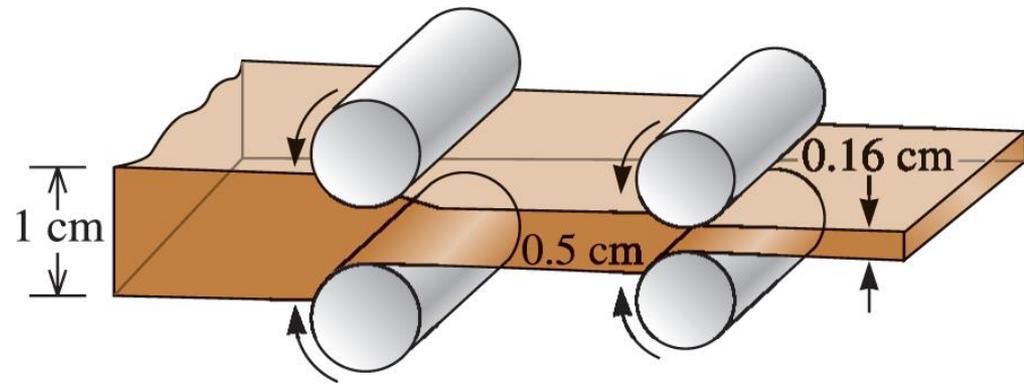
Discordâncias empilhadas em um contorno de grão, observadas em uma folha fina de aço inoxidável utilizando microscopia eletrônica de transmissão. (Ampliação 20.000 × .)



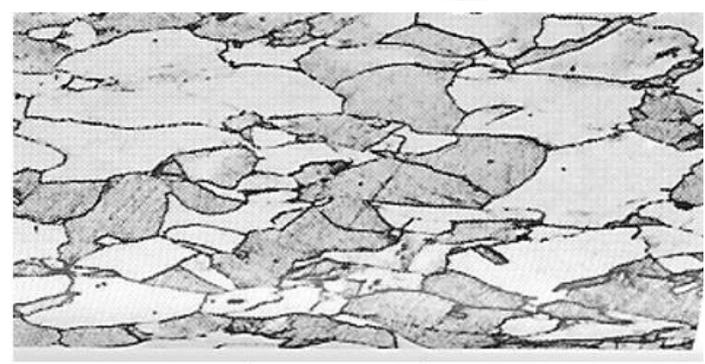
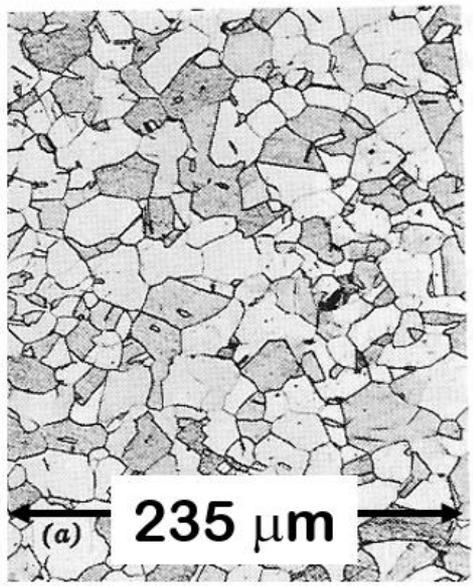
Alumínio policristalino deformado plasticamente. Note-se que as bandas de escorregamento são paralelas no interior do grão, mas que há descontinuidade nos contornos. (Ampliação 60 × .)



# Alteração da estrutura de grãos após deformação



Reorientação dos grãos em uma orientação preferencial

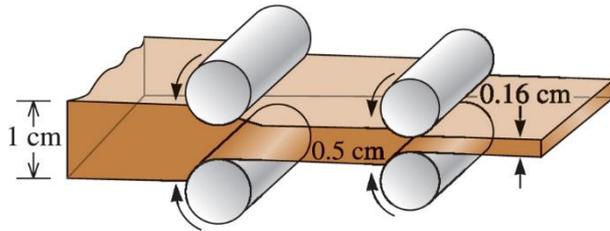


rolling direction



# Trabalhando uma placa de cobre a frio

## Exemplo



Uma placa de cobre de 1cm de espessura é diminuída para 0,50cm por trabalho a frio e posteriormente diminuída para 0,16cm. Determine o trabalho a frio percentual total e a resistência à tração da placa de 0,16cm.

### Solução

Observe que, em razão de a largura da placa não ter mudado durante a laminação, o trabalho a frio pode ser expresso como a redução percentual na espessura  $t$ . Podemos determinar o trabalho a frio realizado em cada estágio, que é:

$$\%TF = \frac{A_0 - A_F}{A_0} \times 100 = \frac{t_0 - t_F}{t_0} \times 100 = \frac{1 - 0,5}{1} \times 100 = 50\%$$

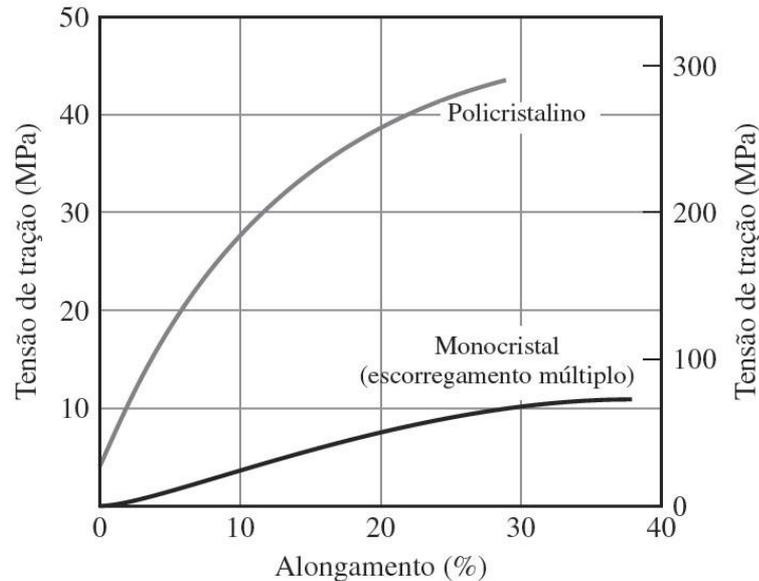
$$\%TF = \frac{A_0 - A_F}{A_0} \times 100 = \frac{t_0 - t_F}{t_0} \times 100 = \frac{0,5 - 0,16}{0,5} \times 100 = 68\%$$

Observe que não poderemos combinar os dois percentuais de trabalho a frio para obter o trabalho total, pois é incorreto.

$$\%TF = \frac{A_0 - A_F}{A_0} \times 100 = \frac{t_0 - t_F}{t_0} \times 100 = \frac{1 - 0,16}{1} \times 100 = 84\%$$



# Comparação entre deformação monocristal e policristal

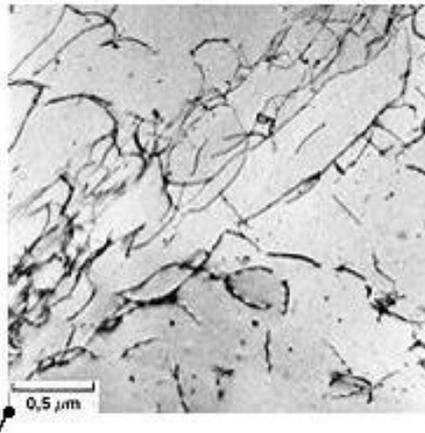


Monocristal	Policristal
Anisotrópica	Isotrópica
Único sistema	Vários sistemas (vários grãos)
Homogênea	Heterogênea (restrição geométrica de outros grãos e cg)

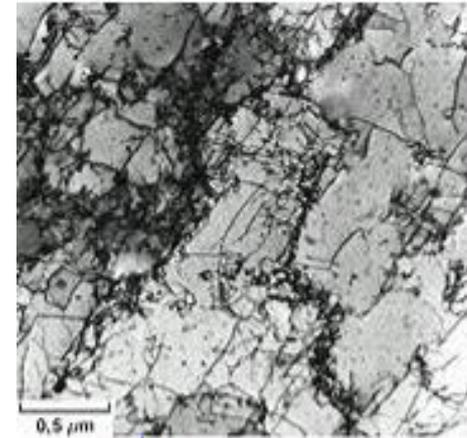


# Deformação a frio

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



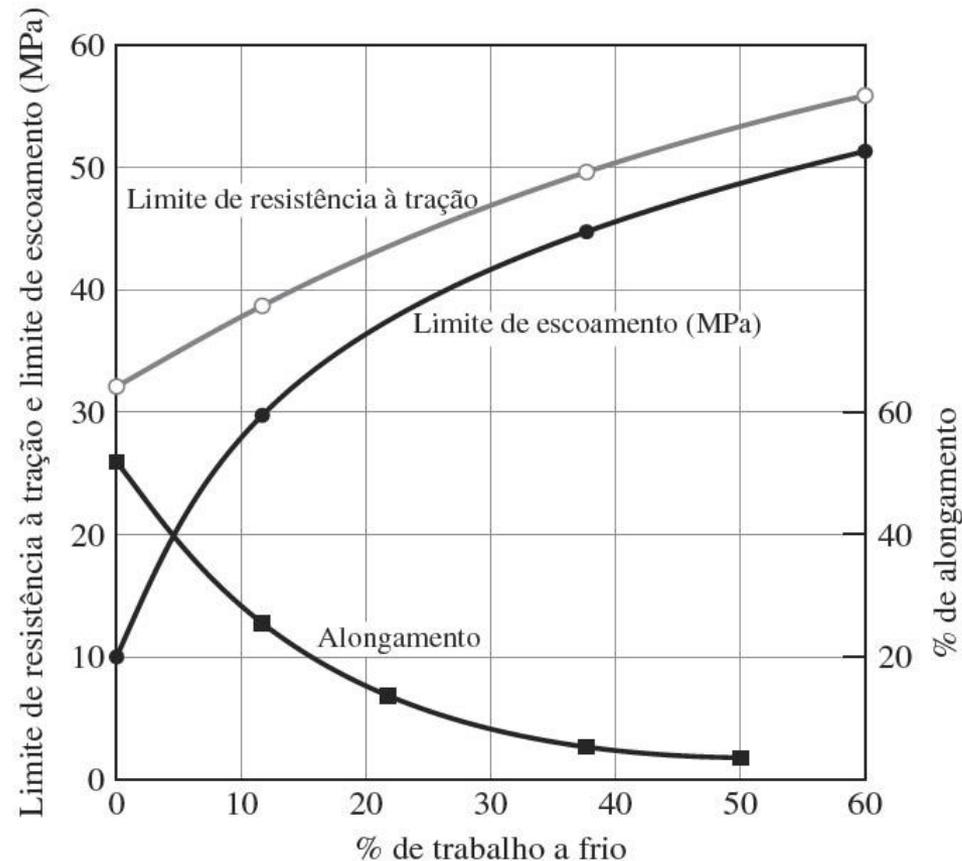
Metal policristalino dúctil  
Ferro deformado plasticamente  
Densidade de discordâncias :  
 $2 \times 10^{10} \text{ cm/cm}^3$  )





# Influência nas propriedades mecânicas

## Trabalho a frio



Porcentagem de deformação a frio em função do limite de resistência à tração e do alongamento até a fratura para o cobre desoxigenado. O grau de deformação a frio é expresso pela porcentagem de redução de área da seção reta da amostra metálica.



# Referências Bibliográficas

- 1) Askeland, D. R.; Phule, P. P. Ciência e engenharia dos materiais. São Paulo: CENGAGE, 2008;
- 2) Callister Jr., W. D. Fundamentos da ciência e engenharia de materiais. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2006;
- 3) Callister Jr., W. D. Ciência e engenharia de materiais. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2008;
- 4) Shackelford, J. E. Ciência dos materiais. São Paulo: Prentice Hall, 2008;
- 5) Smith, W. Hashemi, J. Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais – MacGrawHill