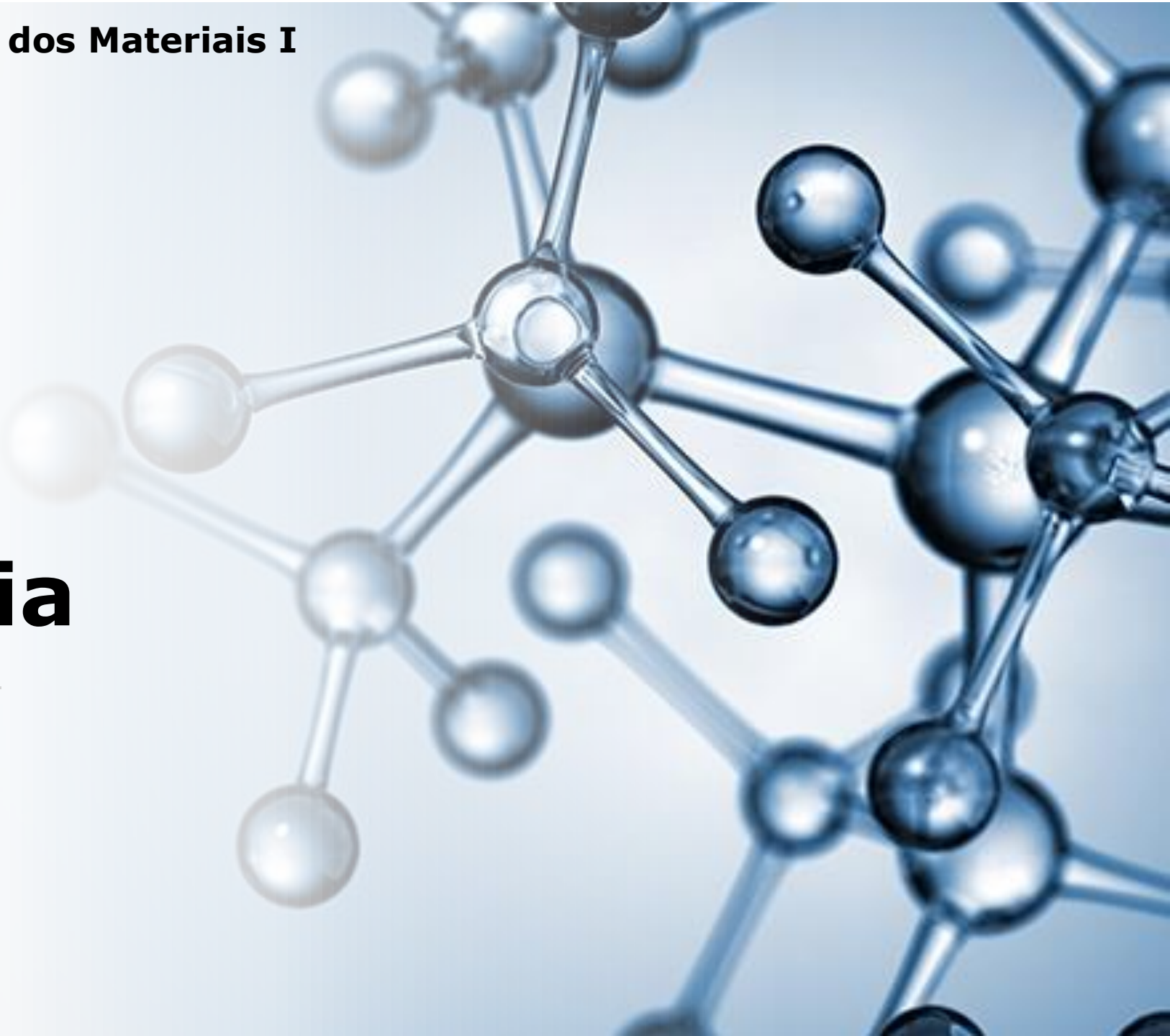


# Aula 5: Mecanismo de aumento de resistência

---

Prof. Fernando Sabino

Email: [fpsabino@usp.br](mailto:fpsabino@usp.br)



# Última aula...

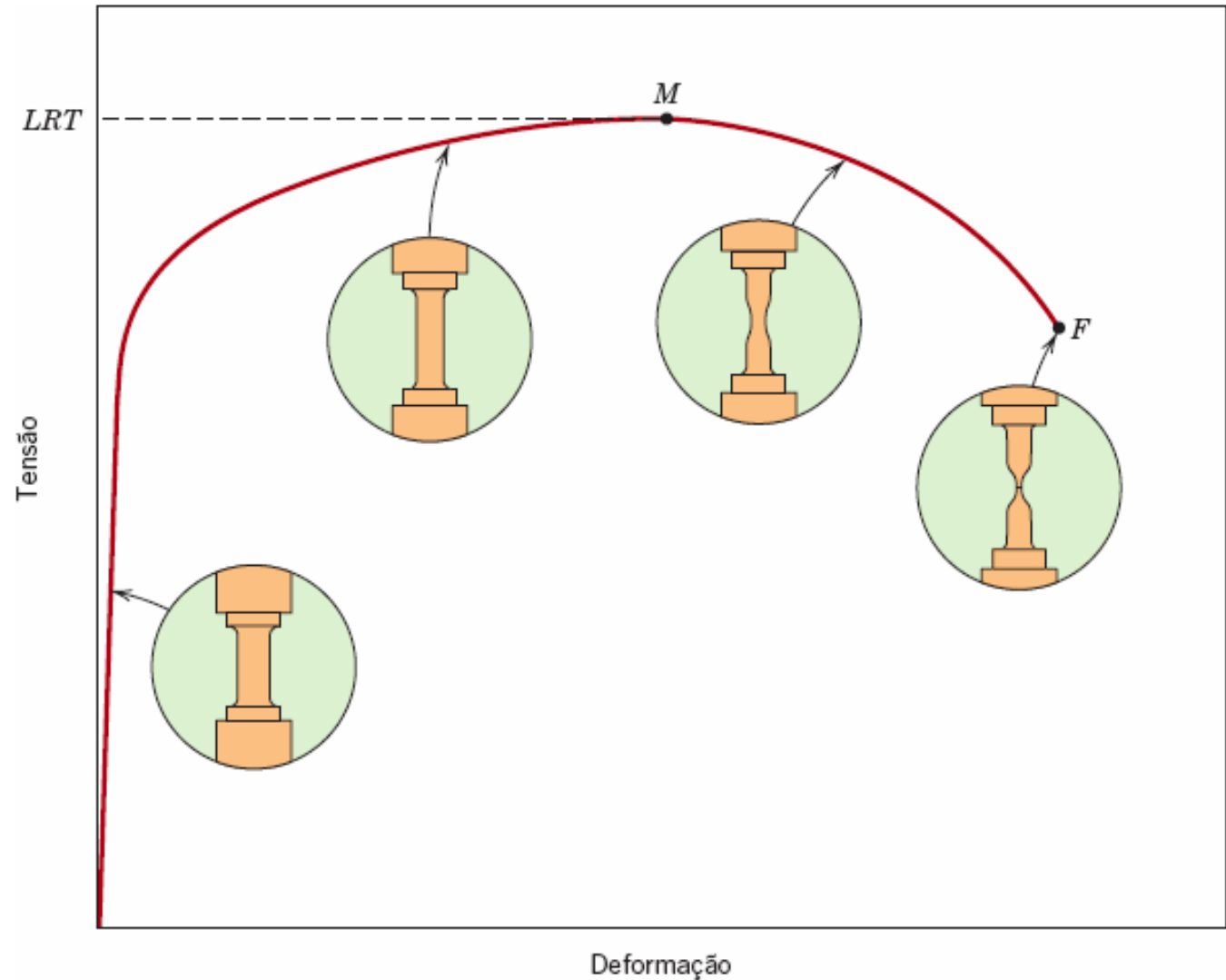
## 1. Tensão deformação

- Tensão de Engenharia:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} [MPa]$$

- Deformação de Engenharia:

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0}$$

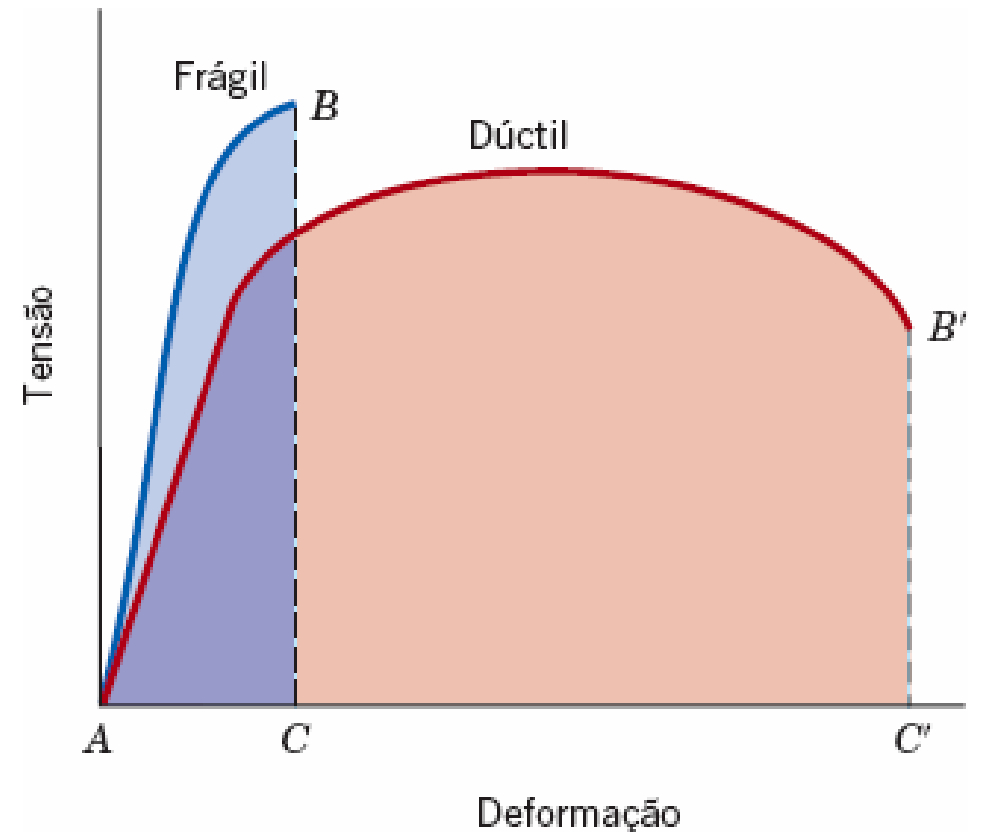


# Última aula...

## 1. Tensão deformação

## 2. Comportamento tensão-deformação

1. Deformação elástica/plástica
2. Escoamento, resistência à tração
3. Ductilidade, fragilidade
4. Resiliência, tenacidade

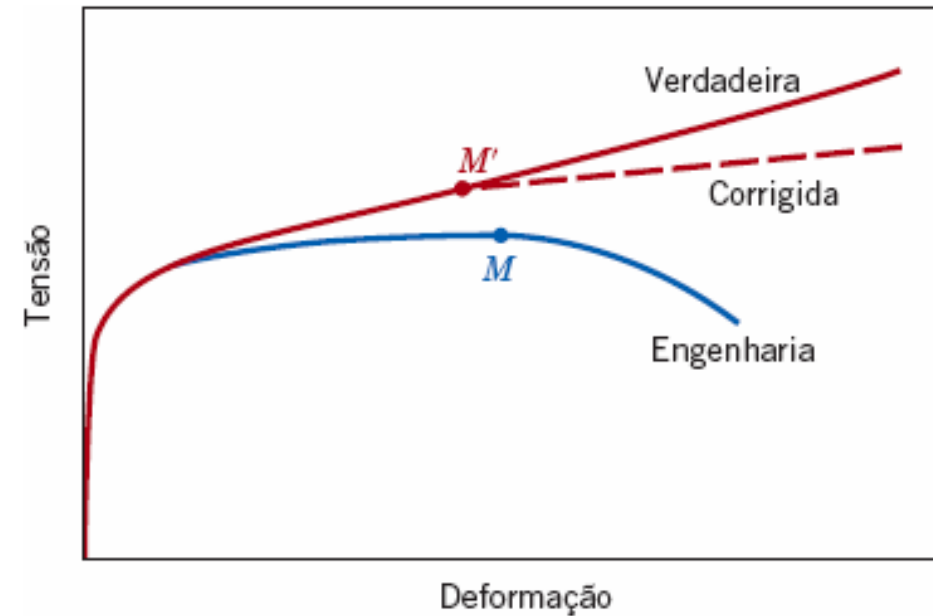


# Última aula...

1. Tensão deformação
2. Comportamento tensão-deformação
  1. Deformação elástica/plástica
  2. Escoamento, resistência à tração
  3. Ductilidade, fragilidade
  4. Resiliência, tenacidade
3. Tensão e deformação verdadeiras

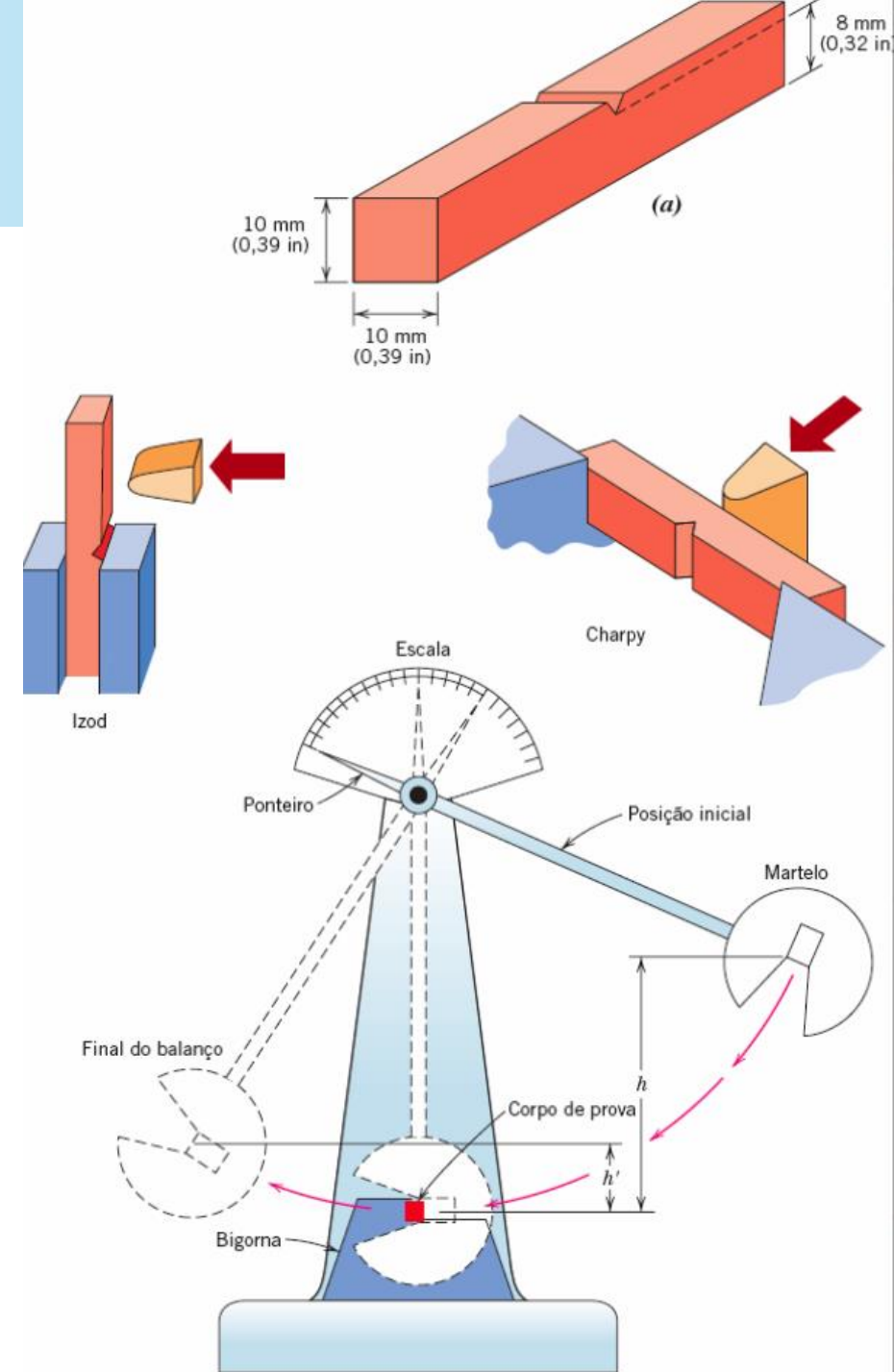
$$\sigma_v = \sigma(1 + \epsilon)$$

$$\epsilon_v = \ln(1 + \epsilon)$$



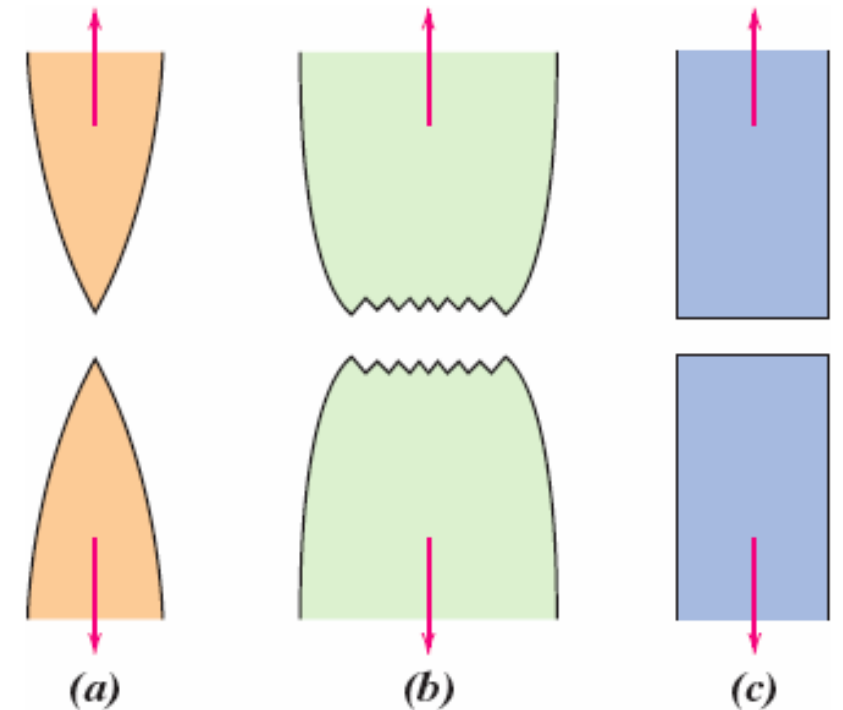
# Última aula...

1. Tensão deformação
2. Comportamento tensão-deformação
  1. Deformação elástica/plástica
  2. Escoamento, resistência à tração
  3. Ductilidade, fragilidade
  4. Resiliência, tenacidade
3. Tensão e deformação verdadeiras
4. Dureza e resistência ao impacto

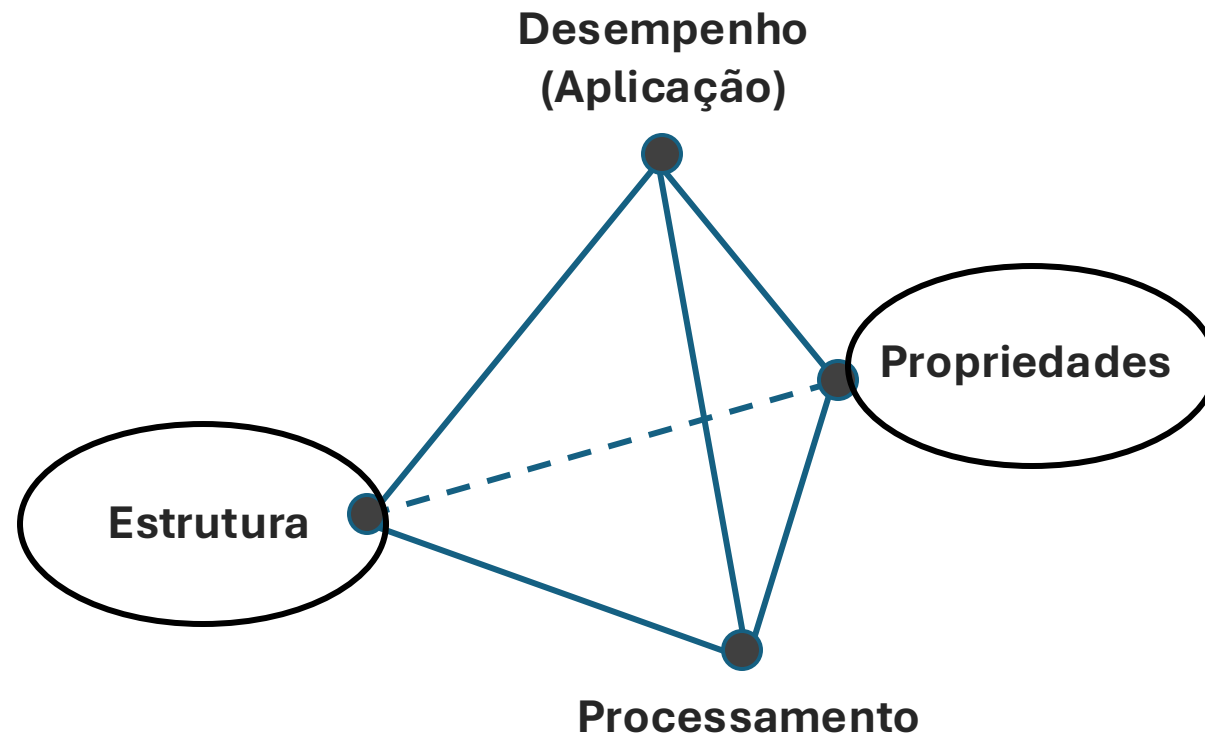


# Última aula...

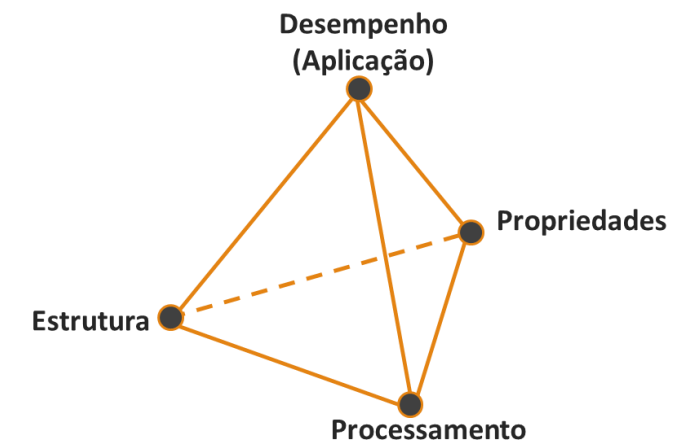
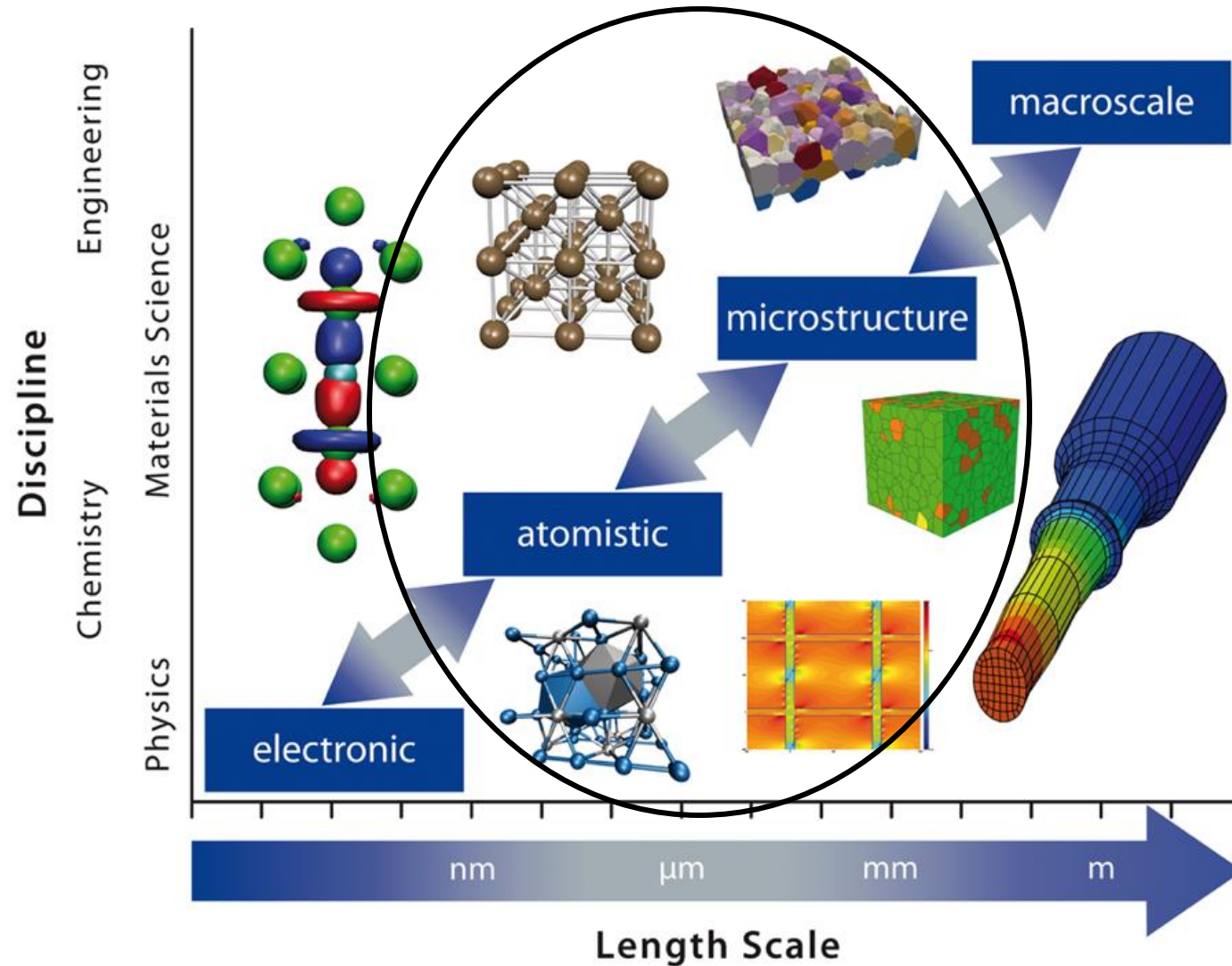
1. Tensão deformação
2. Comportamento tensão-deformação
  1. Deformação elástica/plástica
  2. Escoamento, resistência à tração
  3. Ductilidade, fragilidade
  4. Resiliência, tenacidade
3. Tensão e deformação verdadeiras
4. Dureza e resistência ao impacto
5. Falhas



# Ciência dos materiais

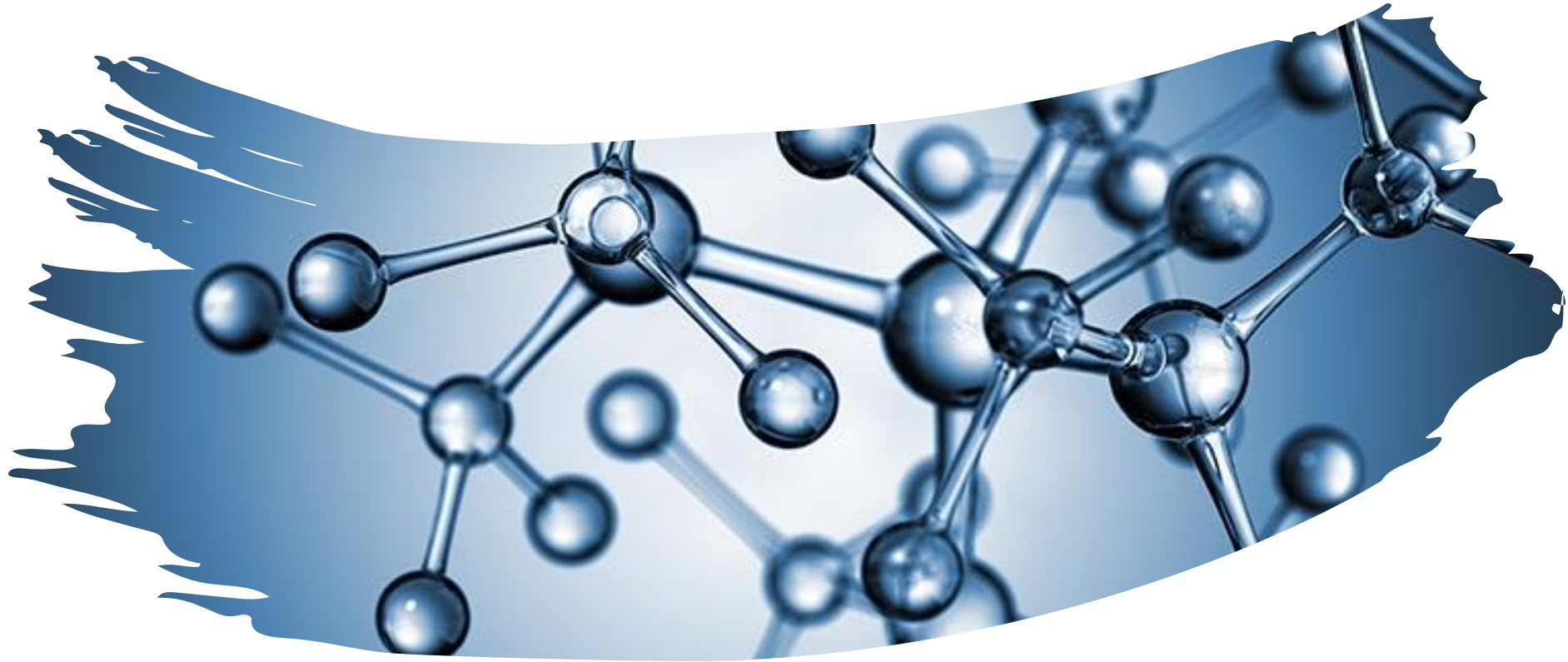


# Escalas em um Material



# Aula de hoje

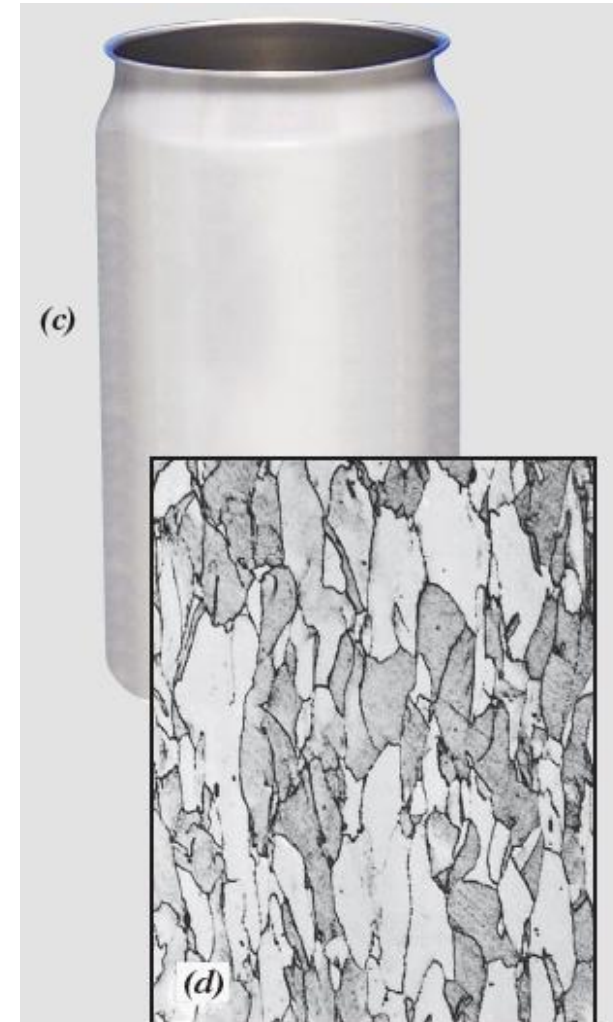
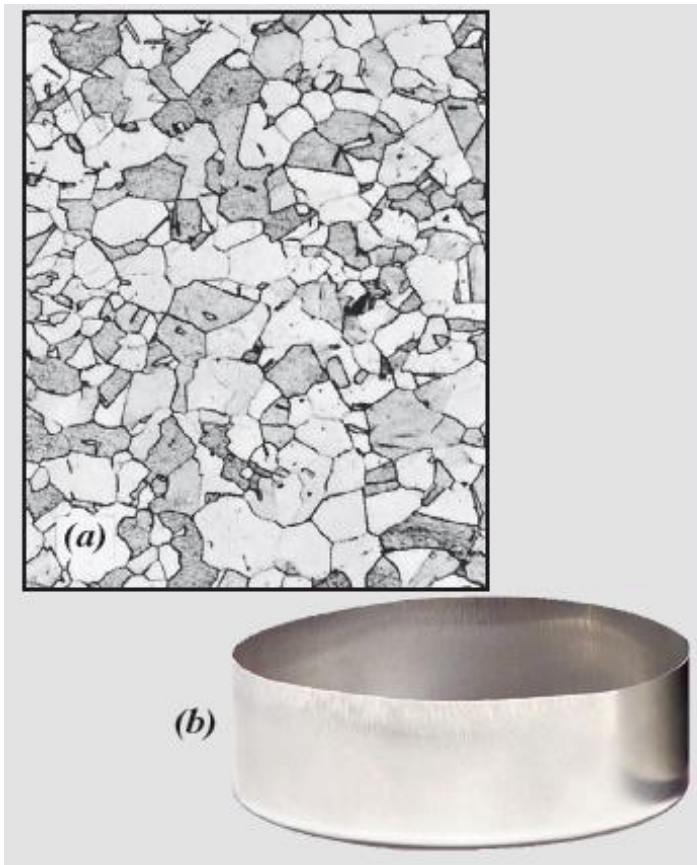
- 1. Discordância e deformação plástica**
- 2. Mecanismo de aumento de resistência em metais**
- 3. Recuperação, recristalização e crescimento de grão**



# **1. Discordância e deformação plástica**

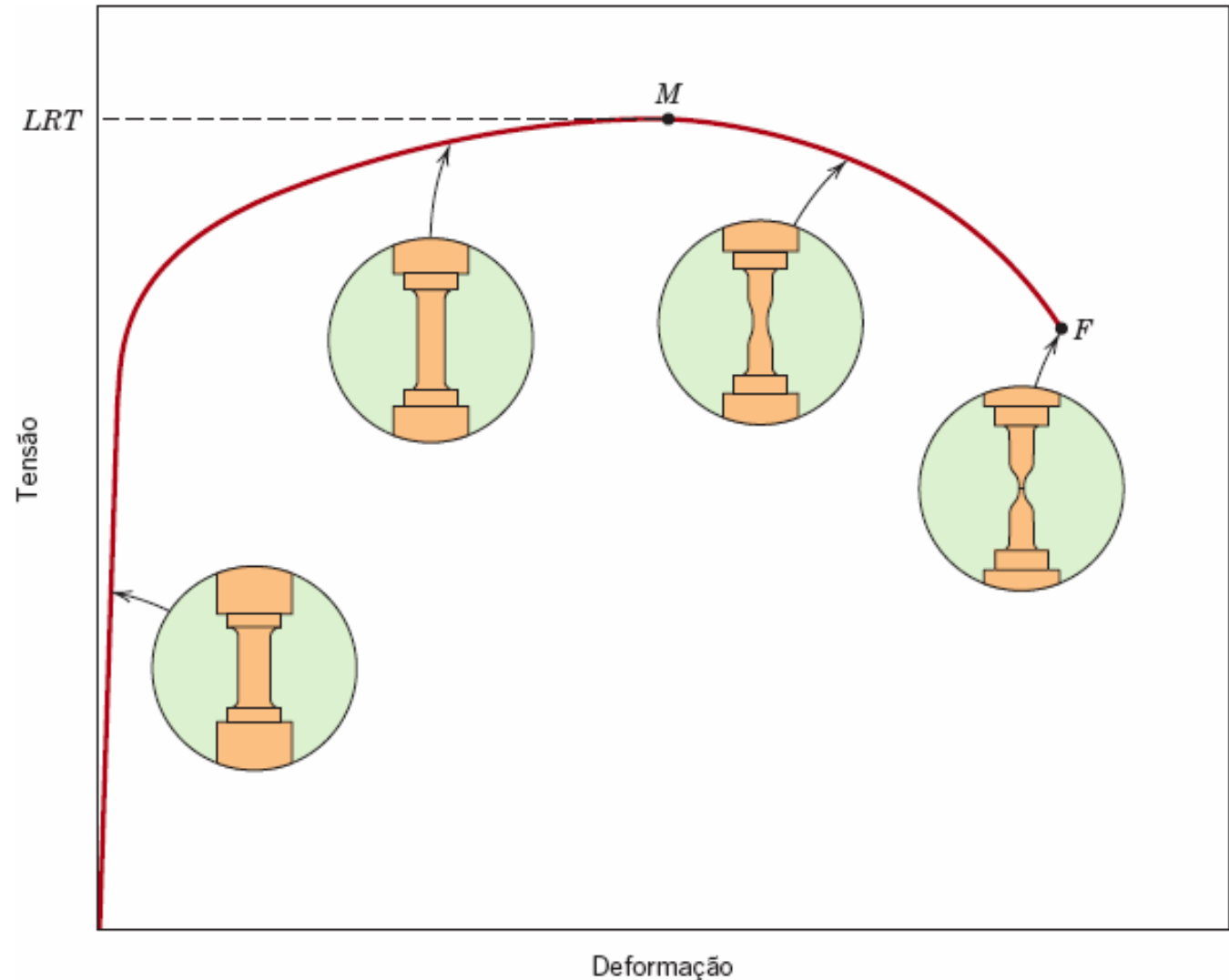
# Introdução

- Contorno de grão antes e depois da conformação.

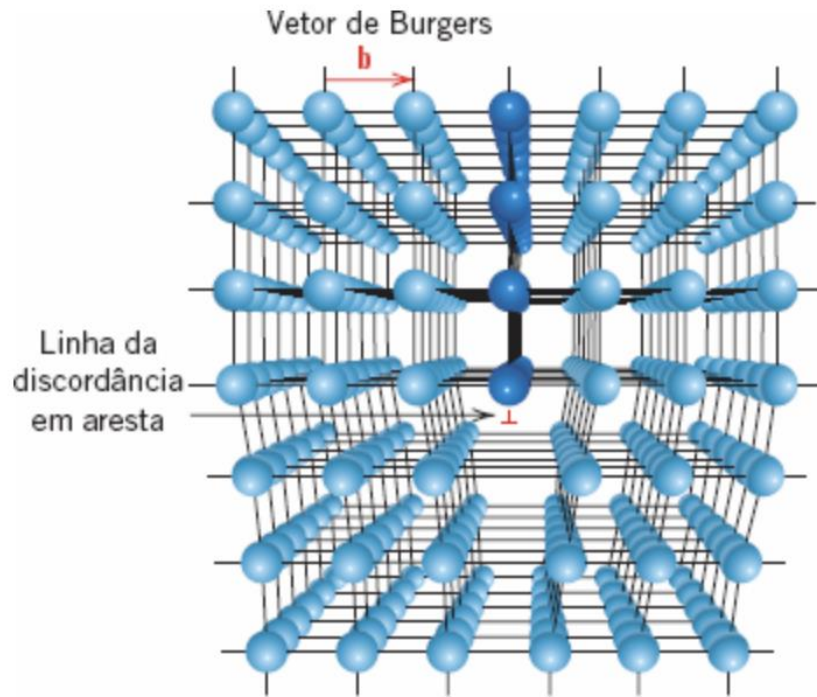


# Deformação elástica e plástica

- Deformação não permanente: elástica
- Deformação permanente: plástica
  - Discordâncias (defeitos lineares).
  - Quebra de ligações químicas



# Discordância em aresta



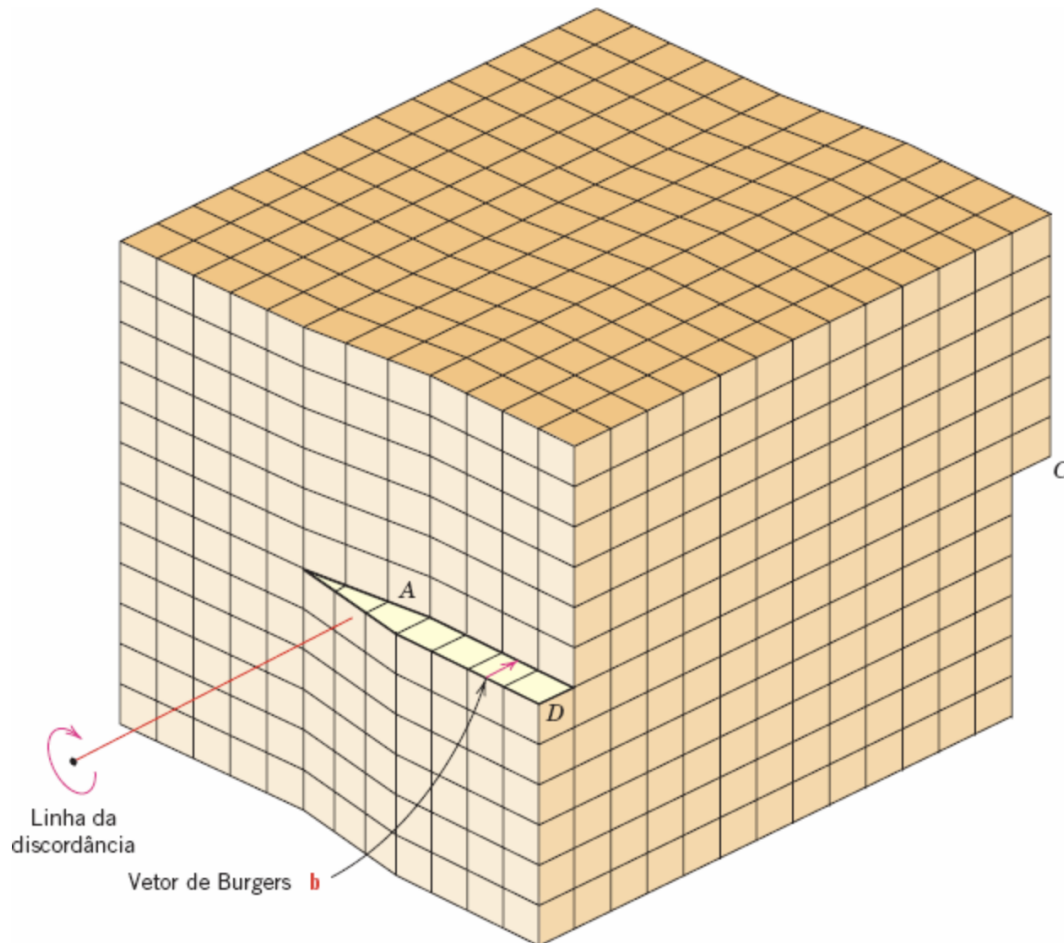
- **Discordância em aresta:**
  - Semiplano adicional no cristal, cuja aresta termina no interior do cristal.
- **Distorção da rede ao redor da linha de discordância**
  - Átomos acima da linha são pressionados um contra os outros e átomos abaixo da linha são puxados uns para longe dos outros

*$b$  é perpendicular a  $a$   $\perp$*

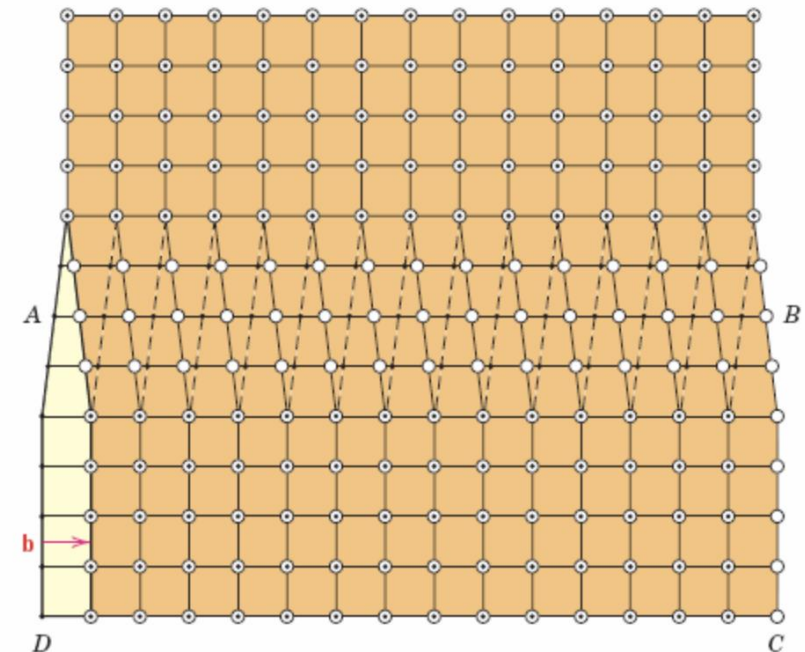
Característica de todas as discordâncias em cunha!!

# Discordância em hélice

- **Discordância em hélice** (ou espiral): Consequência de um cisalhamento. Região superior do cristal é deslocada uma distância atômica em relação à porção inferior.

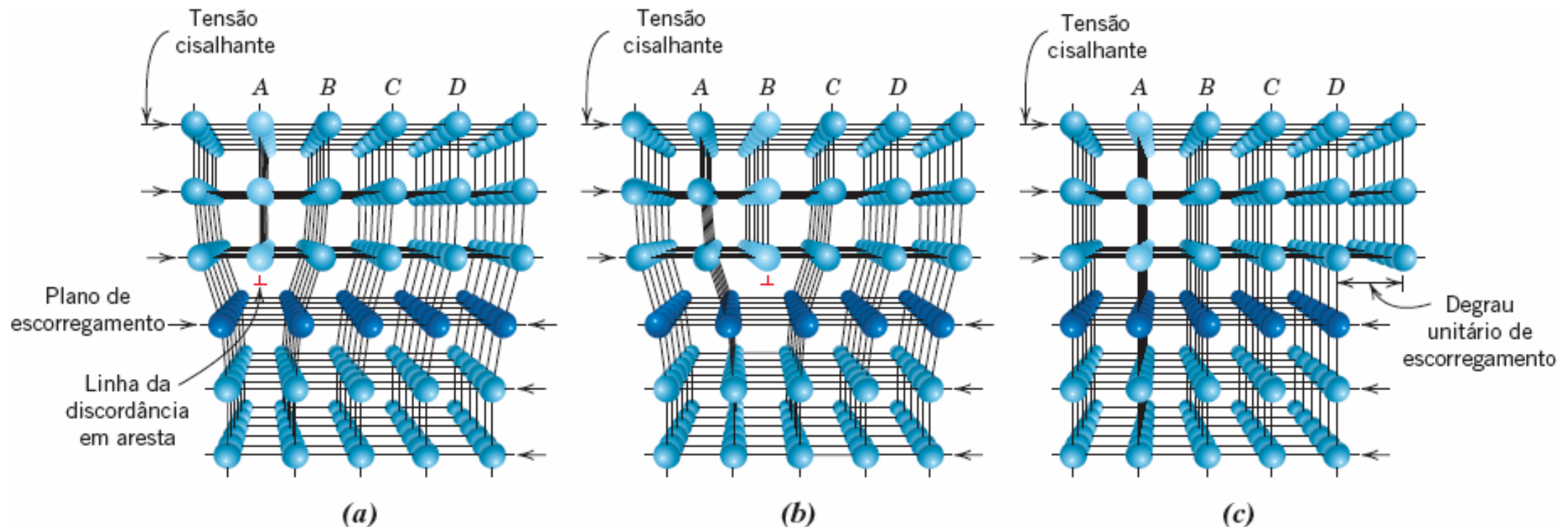


Visão de topo (átomos em planos diferentes em cores diferentes)



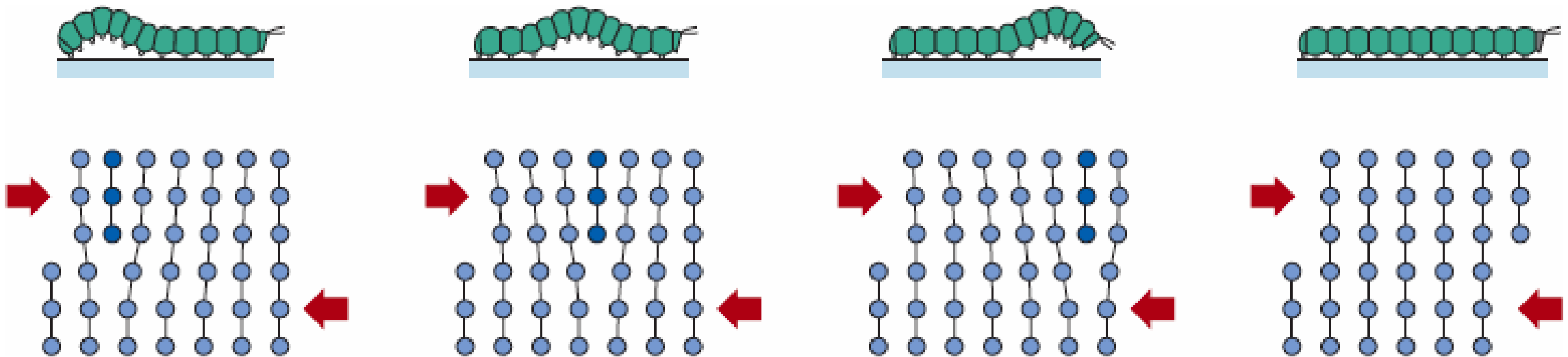
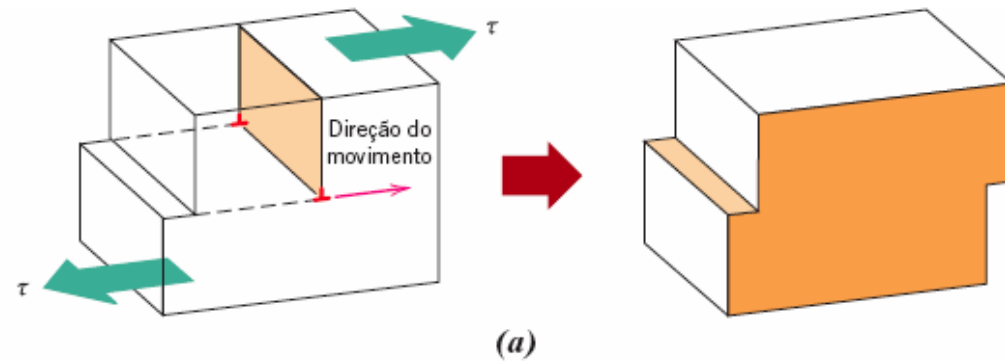
# Conceitos básicos

- Deformação plástica: movimento de grandes números de discordâncias.
- Tensão de cisalhante com alta magnitude: ligações interatômicas do plano B são rompidas ao longo do plano de cisalhamento, e a metade superior do plano B se torna o semiplano extra.
- Ao final do processo, o semiplano extra pode emergir da superfície à direita do cristal, formando uma aresta que possui a largura de uma distância atômica.



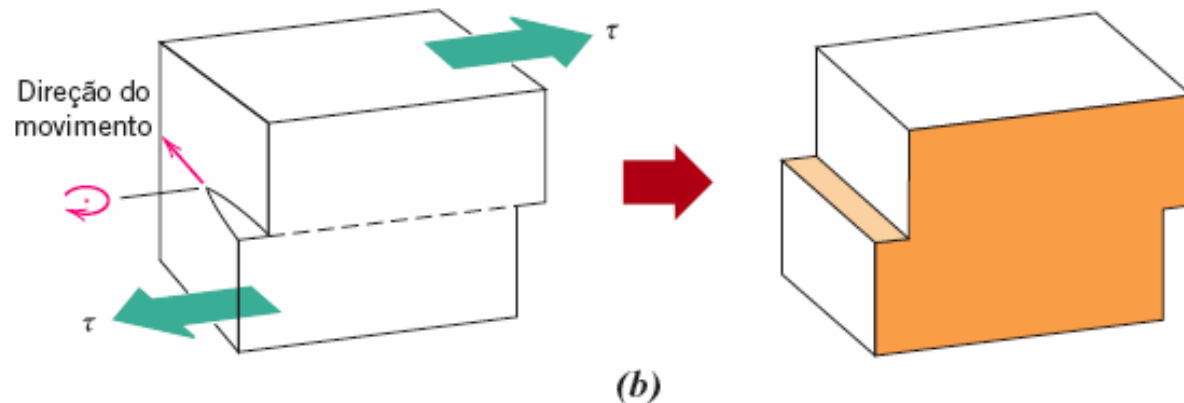
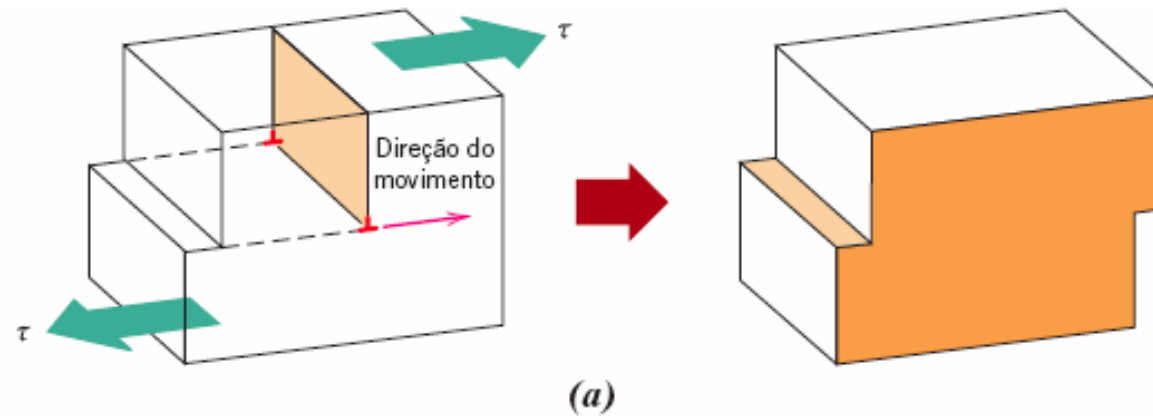
# Conceitos básicos

- O processo segundo o qual uma deformação plástica é produzida pelo movimento de uma discordância é denominado **escorregamento**.
- O plano cristalográfico ao longo do qual a linha da discordância passa é o **plano de escorregamento**.



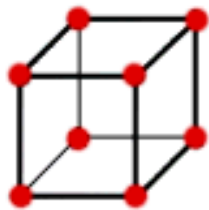
# Conceitos básicos

- O movimento de uma discordância em aresta: direção paralela à tensão cisalhante.
- O movimento de uma discordância em espiral: direção perpendicular à direção da tensão.

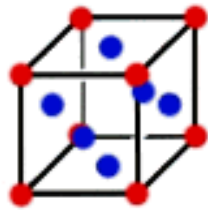


# Sistemas de escorregamento

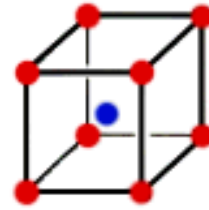
- As discordâncias não se movem com o mesmo grau de facilidade em todos os planos cristalográficos.
- Existe um plano preferencial (**plano de escorregamento**) e, nesse plano, existem direções específicas (**direção de escorregamento**).
- Plano+direção = **Sistema de escorregamento**.



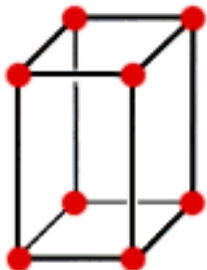
Simple  
cubic



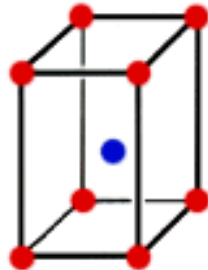
Face-centered  
cubic



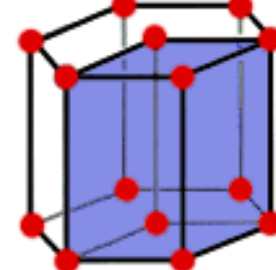
Body-centered  
cubic



Simple  
tetragonal



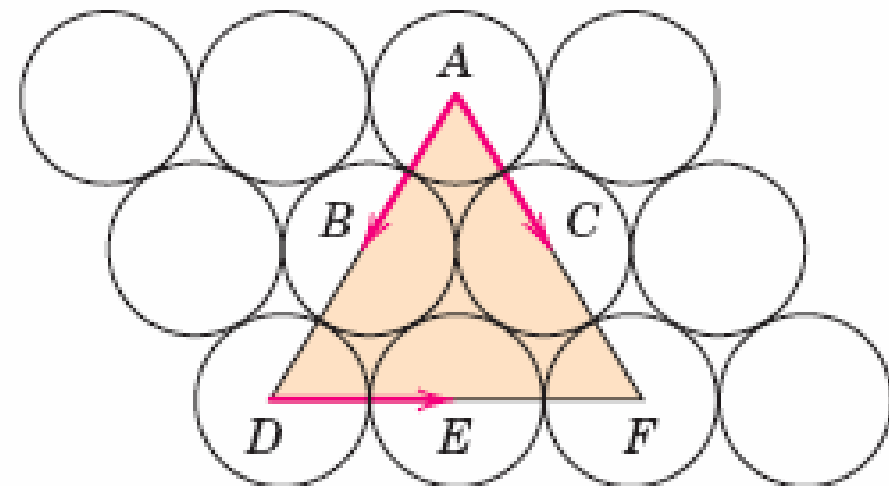
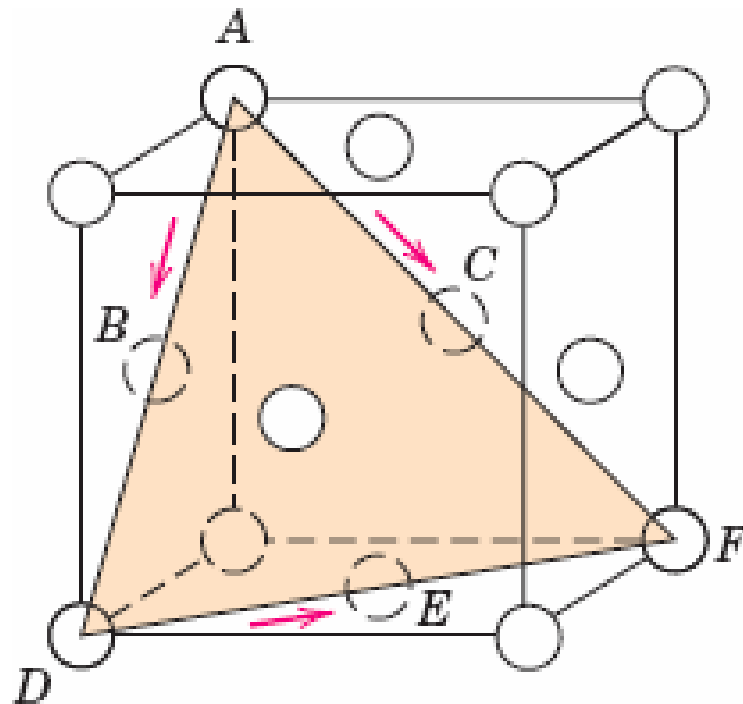
Body-centered  
tetragonal



Hexagonal

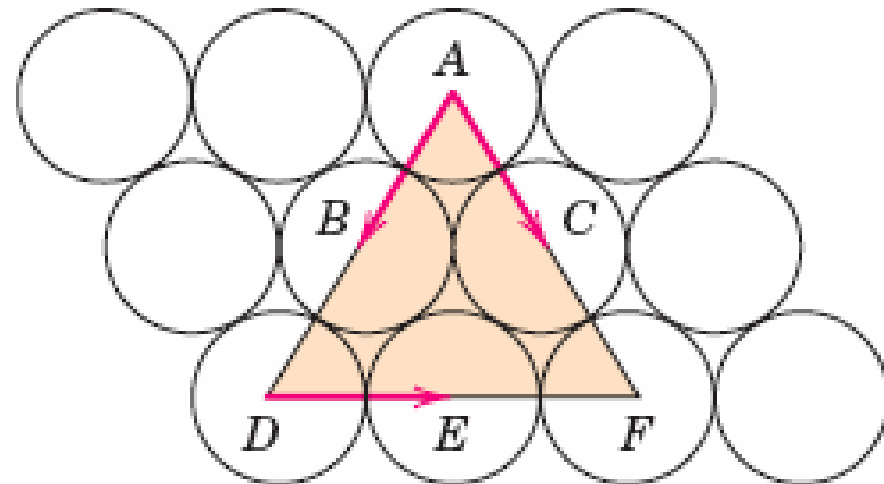
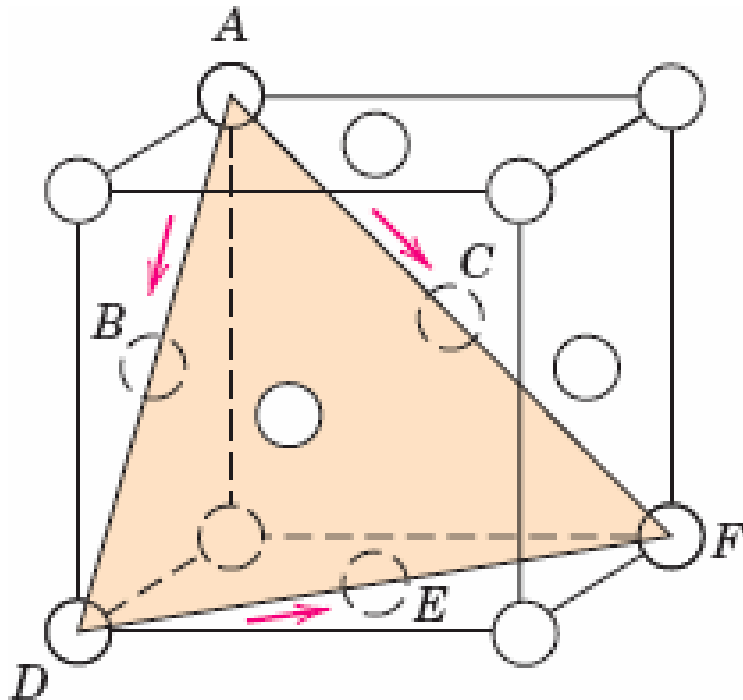
# Sistemas de escorregamento

- **Plano de escorregamento** é aquele que possui o empacotamento atômico mais denso — isto é, aquele que possui a maior densidade planar.
- **Direção do escorregamento** corresponde à direção, nesse plano, que está mais densamente compactada com átomos — isto é, aquela que possui a maior densidade linear.



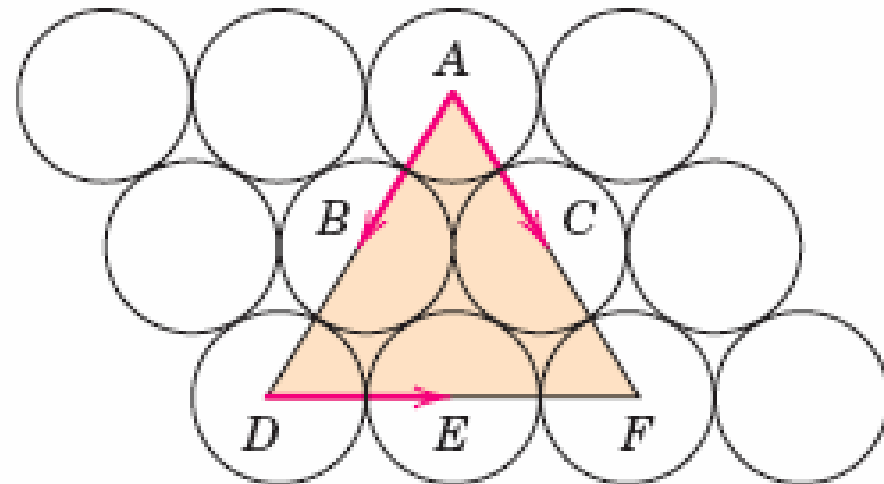
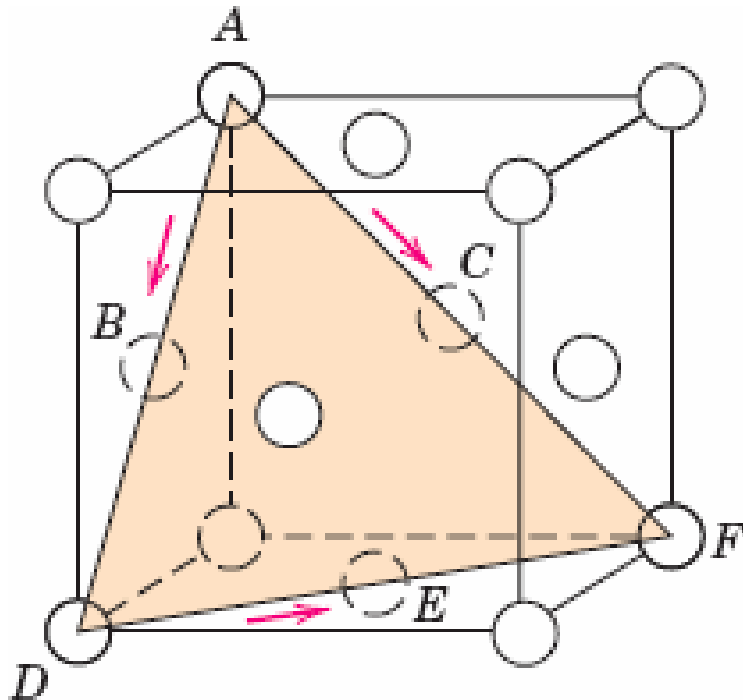
# Exemplo

- Calcular a densidade planar de átomos para a estrutura CFC nos planos: (111), (110) e (100).



# Exemplo

- Calcular a densidade planar de átomos para a estrutura CFC nos planos: (111), (110) e (100).
- Plano de escorregamento: {111}
- Direção de escorregamento:  $\langle 110 \rangle$



# Outros sistemas

- **Número de sistemas de escorregamento**
  - CFC, existem 12 sistemas de escorregamento: quatro planos {111} diferentes e, dentro de cada plano, três direções  $\langle 110 \rangle$  independentes.
- Os metais CFC e CCC possuem um número grande de sistemas de escorregamento. Esses metais são bastante dúcteis.
- Os metais HC, que possuem poucos sistemas de escorregamento ativos, são normalmente bastante frágeis.

| Metais                    | Plano de Escorregamento | Direção de Escorregamento    | Número de Sistemas de Escorregamento |
|---------------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| de Escorregamento         |                         |                              |                                      |
| Cúbico de Faces Centradas |                         |                              |                                      |
| Cu, Al, Ni, Ag, Au        | {111}                   | $\langle 110 \rangle$        | 12                                   |
| Cúbico de Corpo Centrado  |                         |                              |                                      |
| $\alpha$ -Fe, W, Mo       | {110}                   | $\langle 111 \rangle$        | 12                                   |
| $\alpha$ -Fe, W           | {211}                   | $\langle 111 \rangle$        | 12                                   |
| $\alpha$ -Fe, K           | {321}                   | $\langle 111 \rangle$        | 24                                   |
| Hexagonal Compacto        |                         |                              |                                      |
| Cd, Zn, Mg, Ti, Be        | {0001}                  | $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ | 3                                    |
| Ti, Mg, Zr                | {10 $\bar{1}$ 0}        | $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ | 3                                    |
| Ti, Mg                    | {10 $\bar{1}$ 1}        | $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ | 6                                    |

# Escorregamento em monocristais

- Apesar de uma tensão aplicada poder ser puramente de tração (ou de compressão), existem componentes de cisalhamento em todas as direções (**tensão de cisalhamento resolvidas** ou **tensão de cisalhante rebatida**).

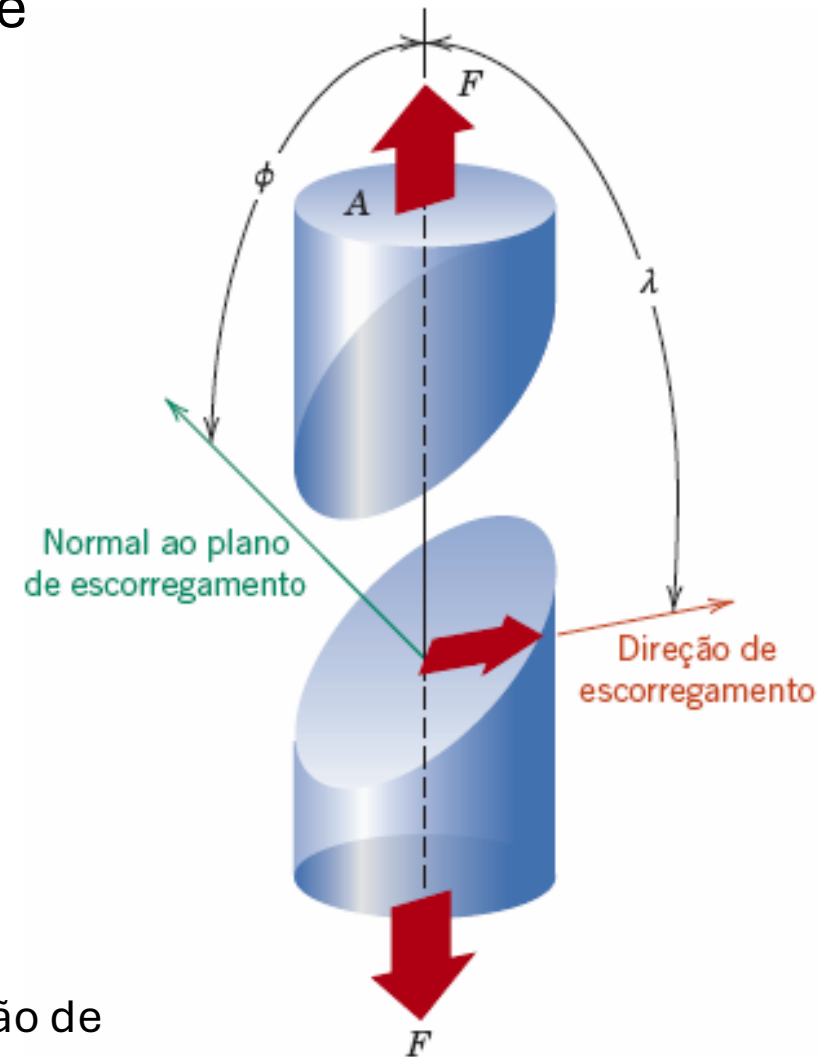
$$\tau_R = \sigma \cos \phi \cos \lambda$$

- Um monocristal pode possuir diversos sistemas de escorregamento diferentes

$$\tau_R(\text{max}) = \sigma (\cos \phi \cos \lambda)_{\text{max}}$$

Ângulo entre a normal ao plano de escorregamento e a tensão aplicada

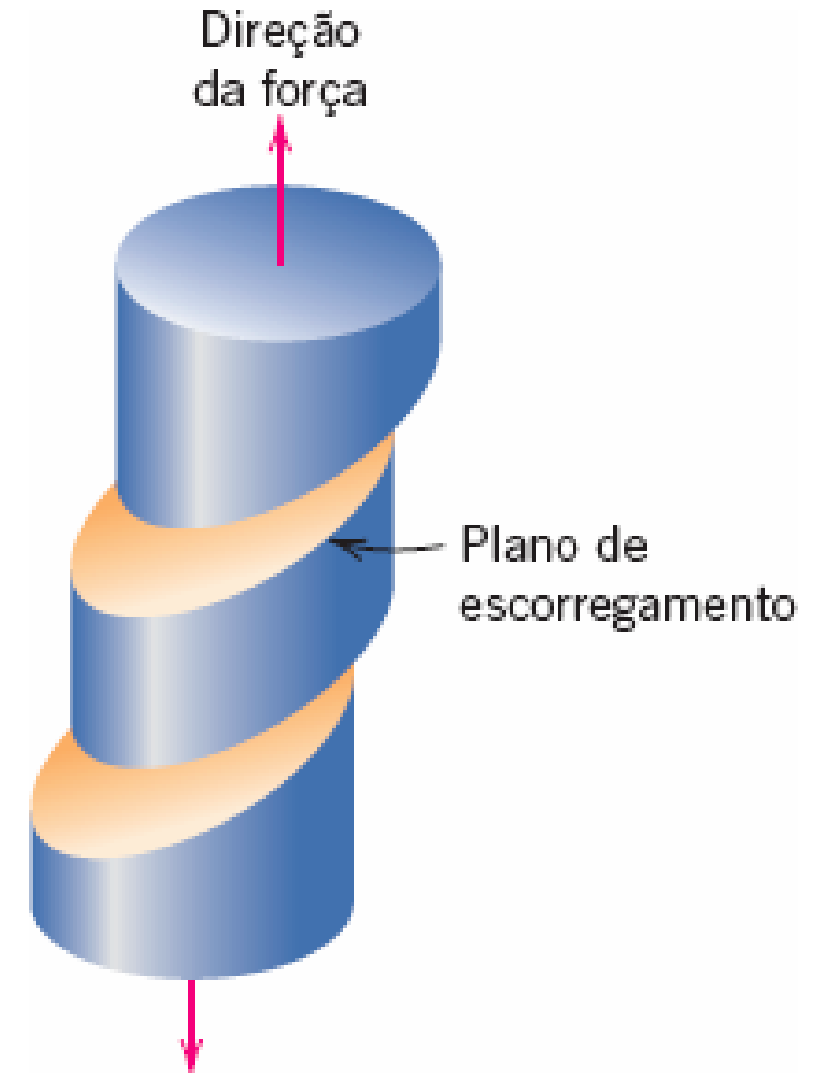
Ângulo entre a direção de escorregamento e a tensão aplicada



# Escorregamento em monocristais

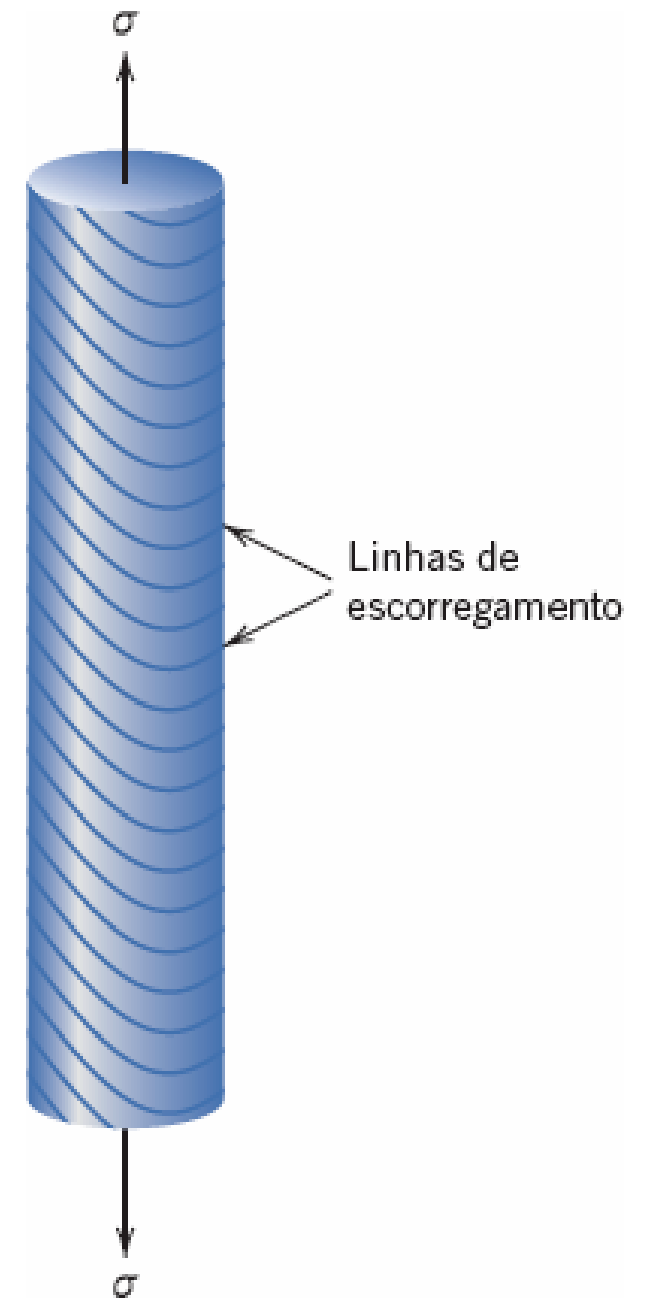
- Escorregamento ocorre quando tensão cisalhante resolvida atinge um dado valor crítico, denominado **tensão cisalhante resolvida crítica** ( $\tau_{tcrc}$ ).
- Deformação plástica, ou escoamento quando:

$$\sigma_l = \frac{\tau_{tcrc}}{(\cos\phi\cos\lambda)_{\max}}$$



# Escorregamento em monocristais

- Amostra polida e monocristalina: linhas de escorregamento.
- Número de linhas depende da tensão e estrutura cristalina.
- CFC e CCC escorregam.
- HC: se linhas de escorregamento (que são poucas) forem paralelas à aplicação de tensão ocorre fratura antes de deformação plástica.



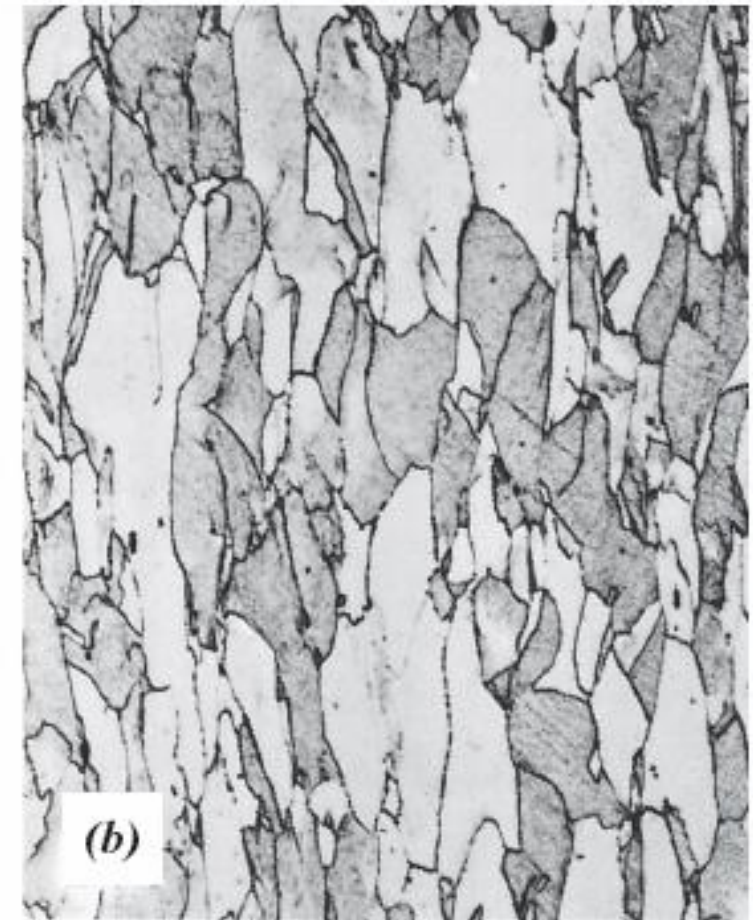
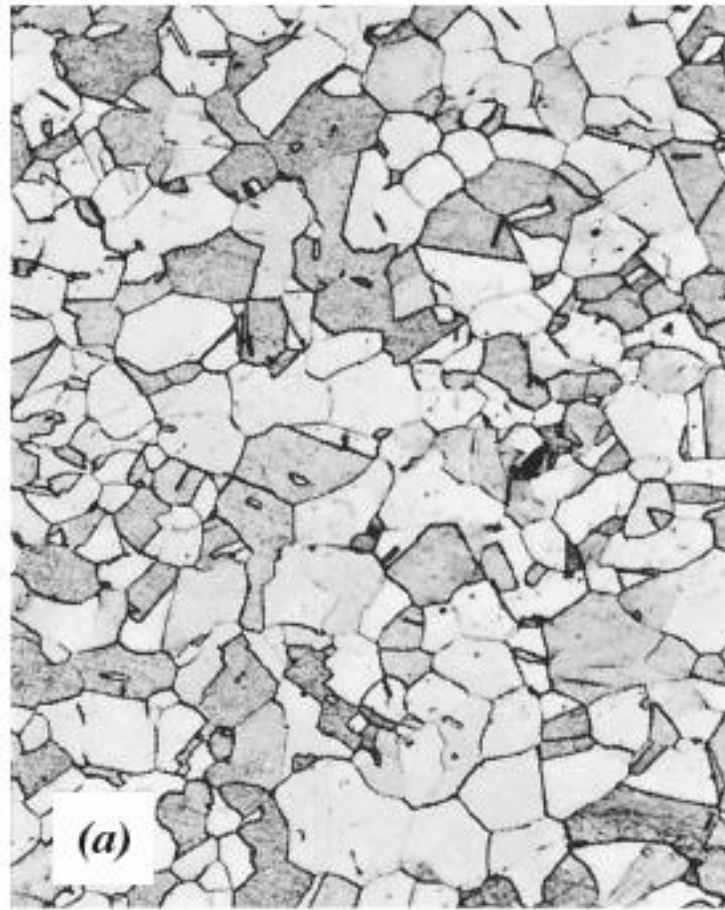
# Deformação plástica em policristais

- Escorregamento mais complexo do que materiais cristalinos.
- Direção varia de grão para grão.
- Orientação do grão é indicada pela diferença no alinhamento das linhas de escorregamento.
- Deformação plástica não altera a interface entre os grãos.

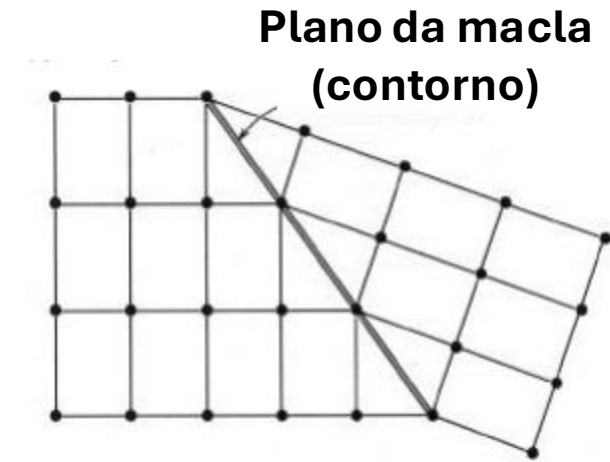


# Deformação plástica em policristais

- Metais policristalinos são mais resistentes aos seus equivalentes monocristalinos.
- Restrições geométrica dos grãos para o escorregamento.
- Um grão só deforma se o adjacente deformar.



# Deformação por maclação



- **Contorno de macla** é um tipo específico de contorno de grão.
- Podem surgir durante a deformação (**maclas de deformação**) ou durante tratamentos térmicos (**maclas de recozimento**).

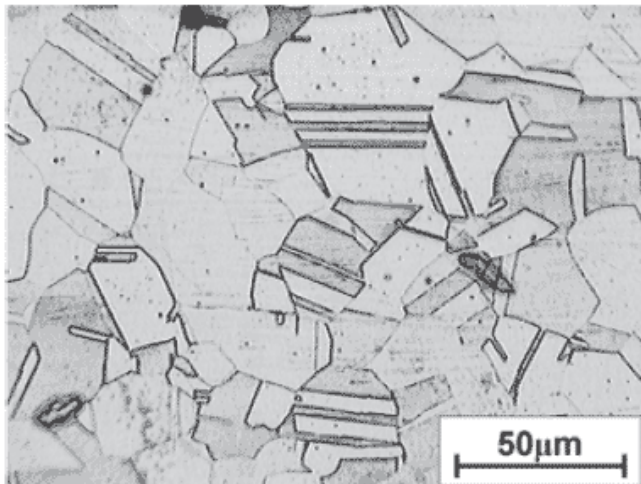
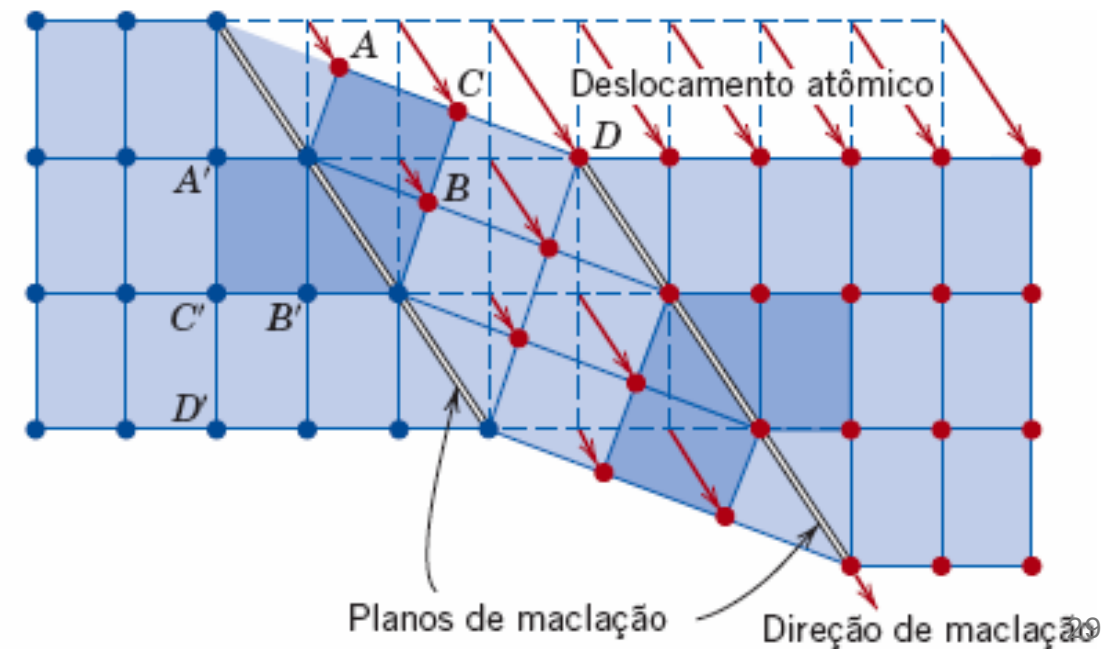
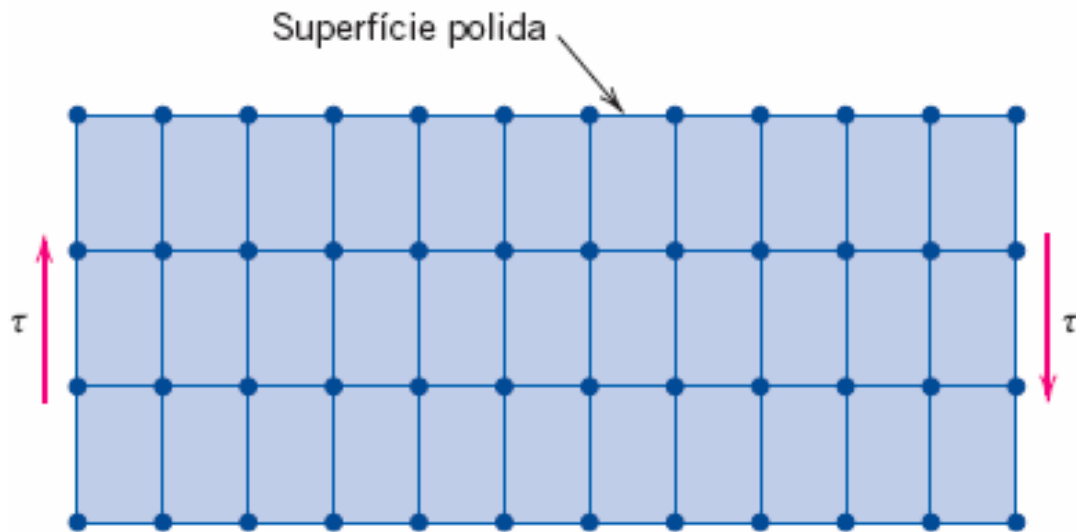


Figura 2 - Micrografia ótica do aço inoxidável austenítico como recebido: grãos austeníticos maclados. Ataque: glicerégia.

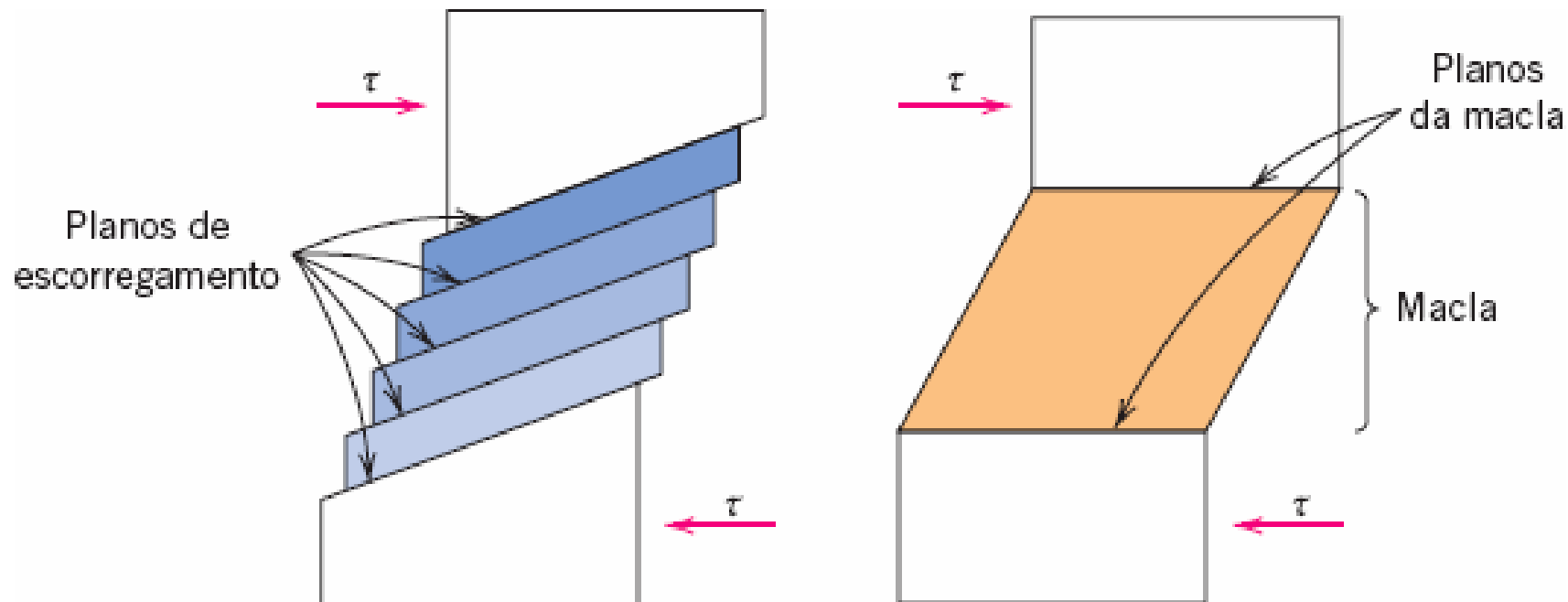
# Deformação por maclação

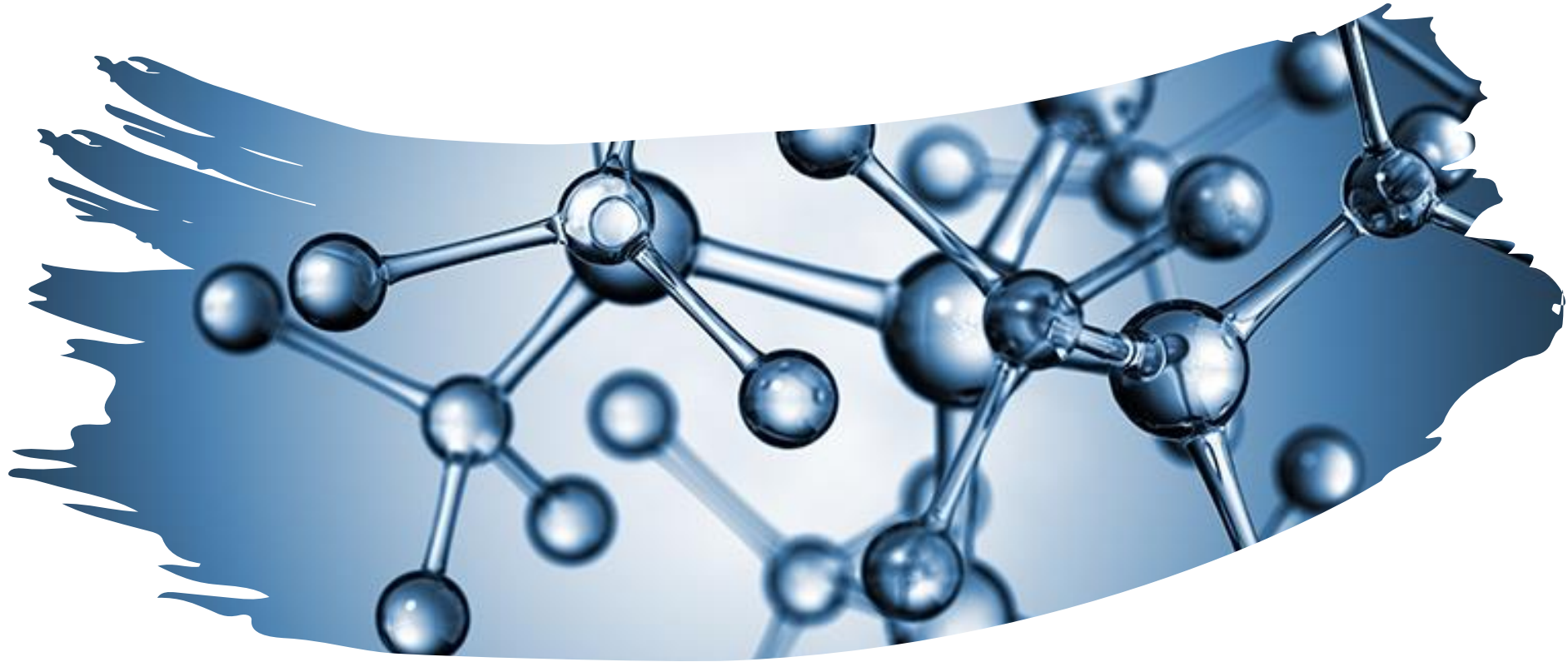
- Deformação plástica pode dar origem a formação de maclas (maclação).
- Uma força de cisalhamento pode produzir deslocamentos atômicos tais que em um dos lados de um plano (o contorno da macla) os átomos estejam localizados em posições de imagem de espelho em relação aos átomos no outro lado do plano.
- Planos e direções específicas:
  - CCC: (112) e [111]



# Deformação por maclação

- Diferença entre escorregamento e formação de macla.
  - Escorregamento: borda cerrilhada, orientação de planos cristalográficos acima e abaixo do escorregamento são idênticas.
  - Macla: borda homogênea, há reorientação dos planos após a maclação.
- Maclação ocorrem em CCC e HP sob baixa temperatura e alta carga.
- Baixa concentração quando comparada ao escorregamento.

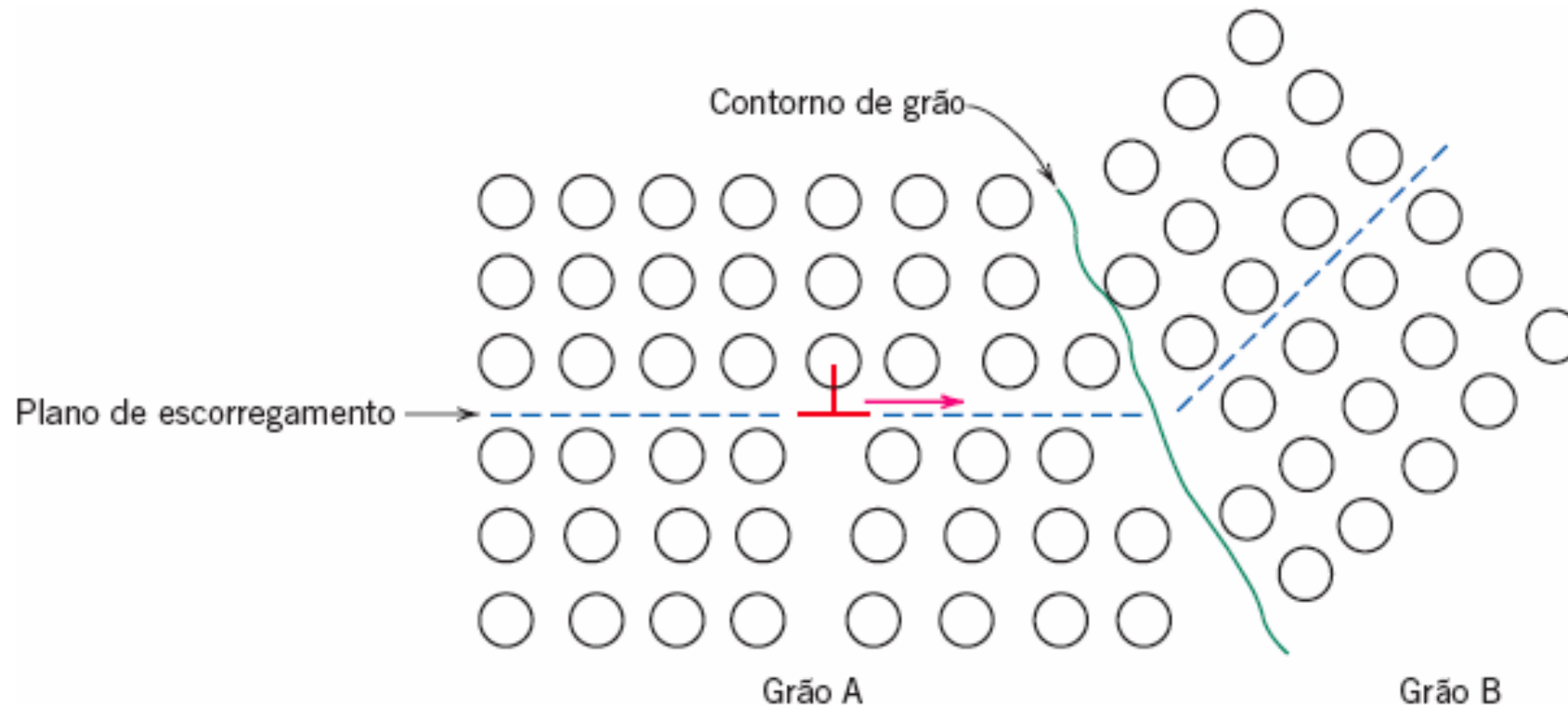




## **2. Mecanismo de aumento de resistência em metais**

# Aumento de resistência pela redução do tamanho de grão

- Tamanho do grão modifica propriedades mecânicas.
- Contorno de grão atua como barreira ao movimento das discordâncias por duas razões:
  - Grãos diferentes possuem orientações diferentes
  - Falta de ordenamento atômico na interface



# Aumento de resistência pela redução do tamanho de grão

- Granulação fina tem dureza maior e mais resistente que um material com granulação grosseira.
- Equação de Hall-Petch:

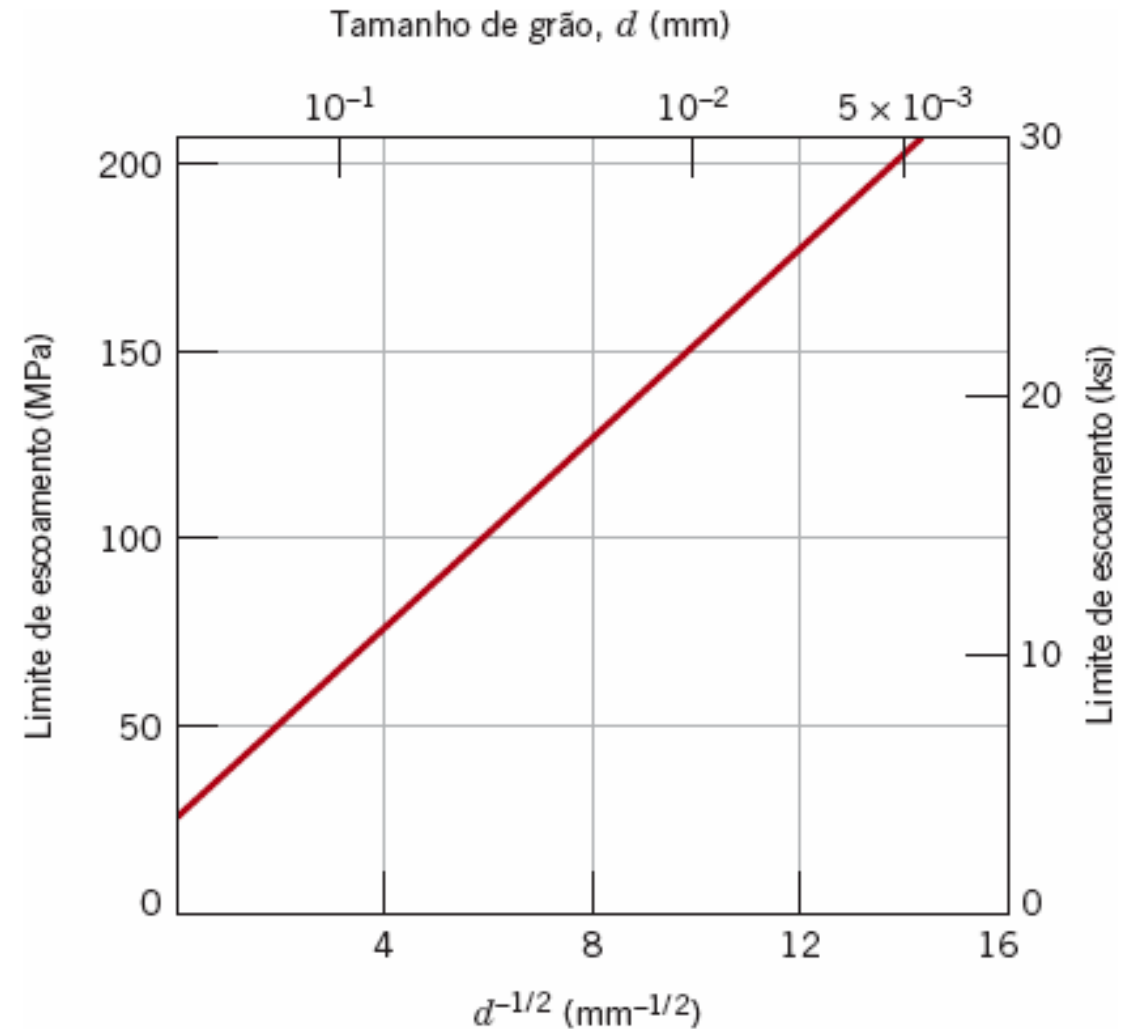
Limite de escoamento

Diâmetro médio do grão

$$\sigma_l = \sigma_0 + k_l d^{-1/2}$$

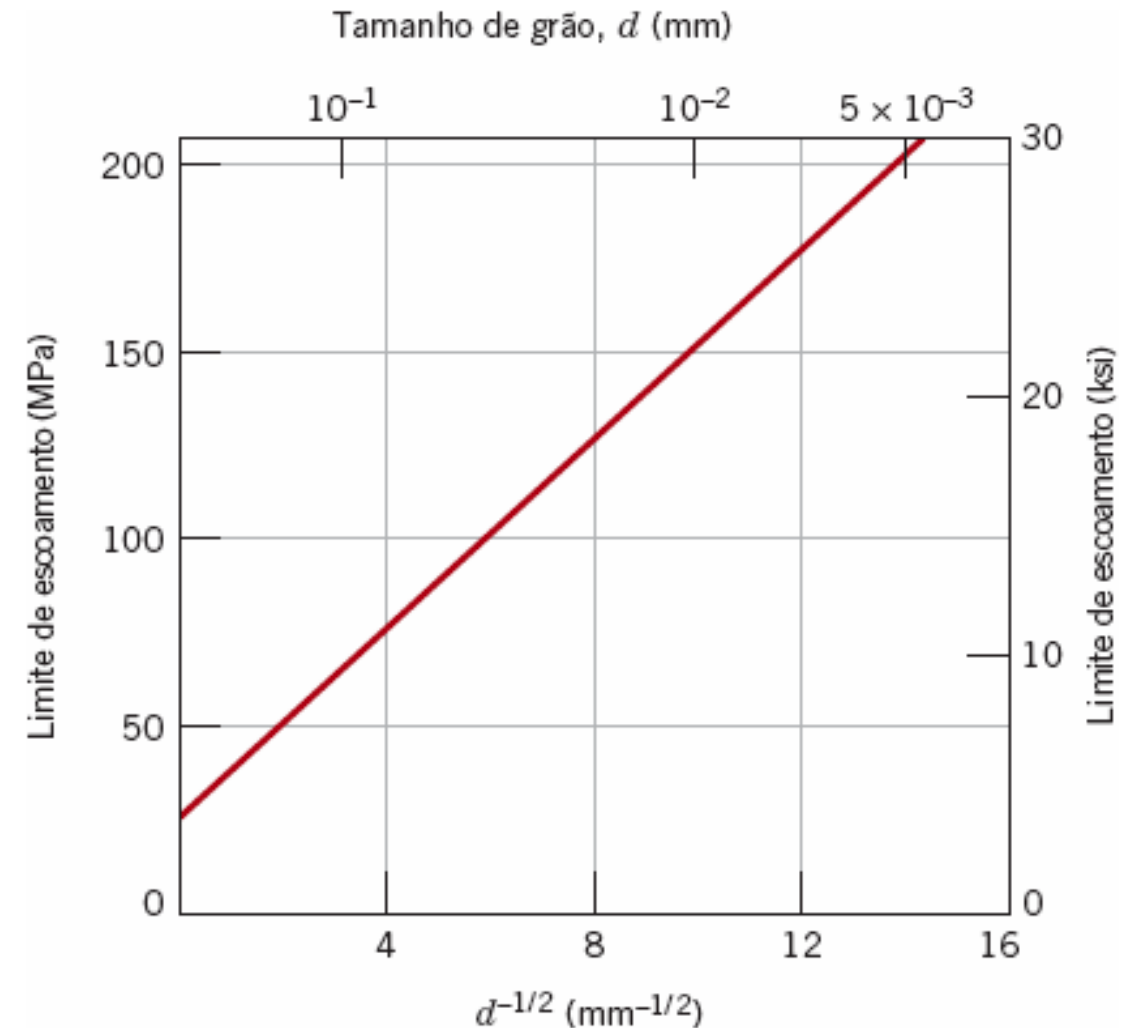
constantes

- Não é válida para grãos grosseiros ou extremamente finos.



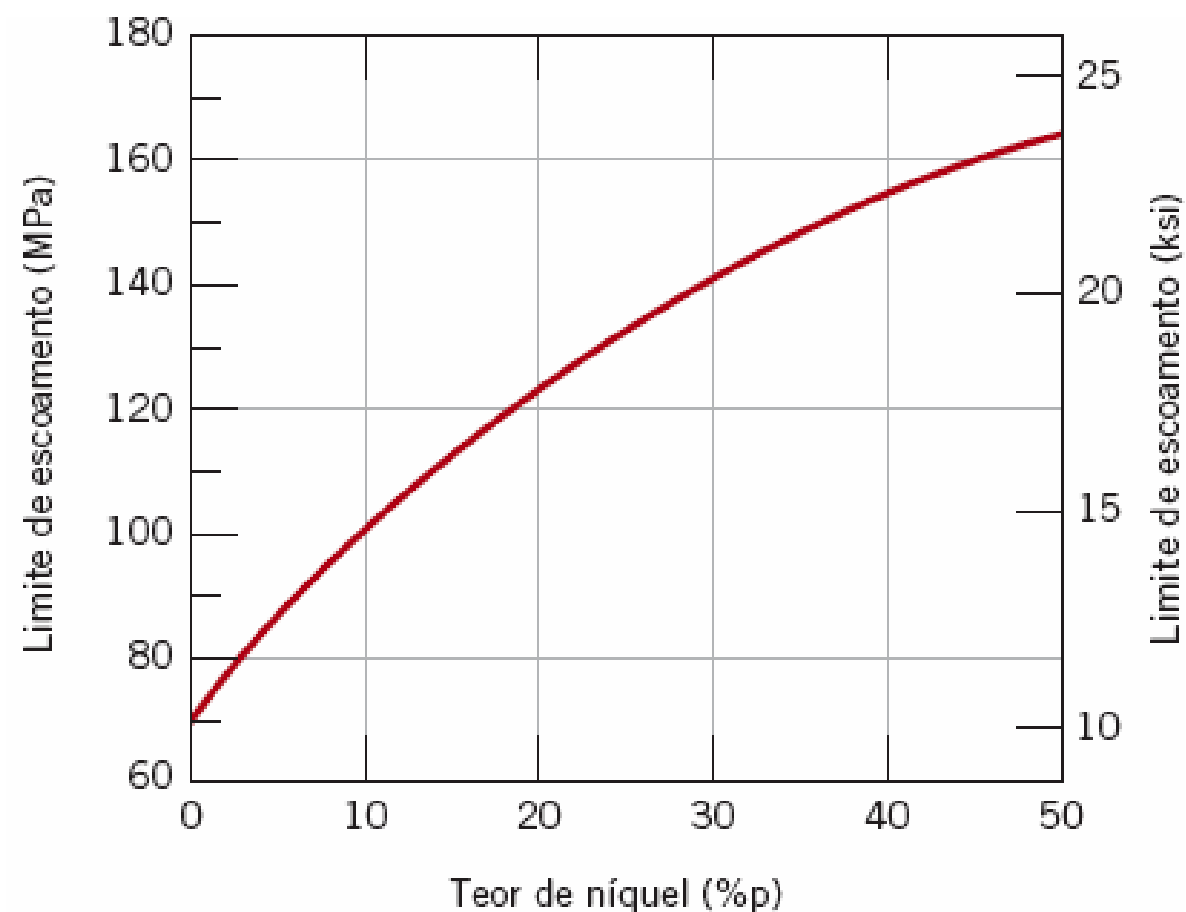
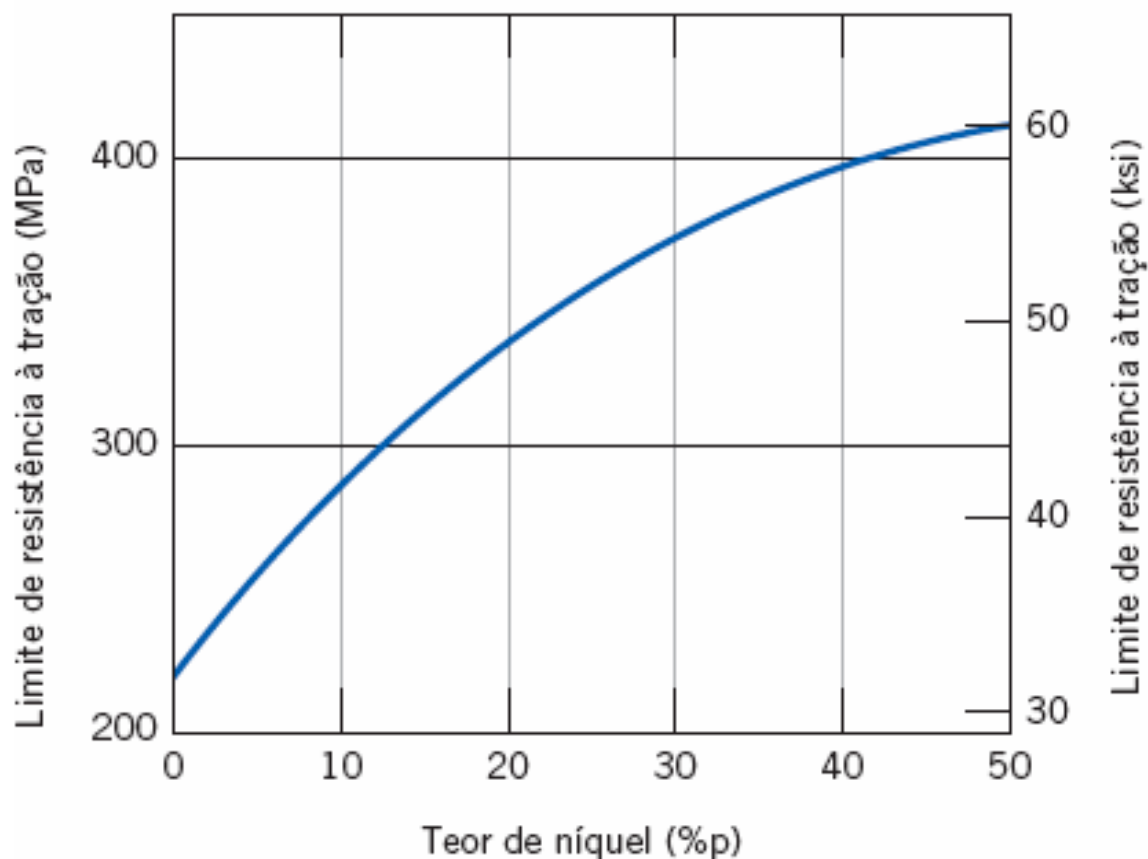
# Aumento de resistência pela redução do tamanho de grão

- Grãos de baixo ângulo não são eficazes na interferência com o processo de escorregamento.
- Maclas efetivamente bloqueiam escorregamento.
- Contorno de grão entre duas fases diferentes também é um impeditivo ao movimento das discordâncias.



# Aumento de resistência por solução sólida

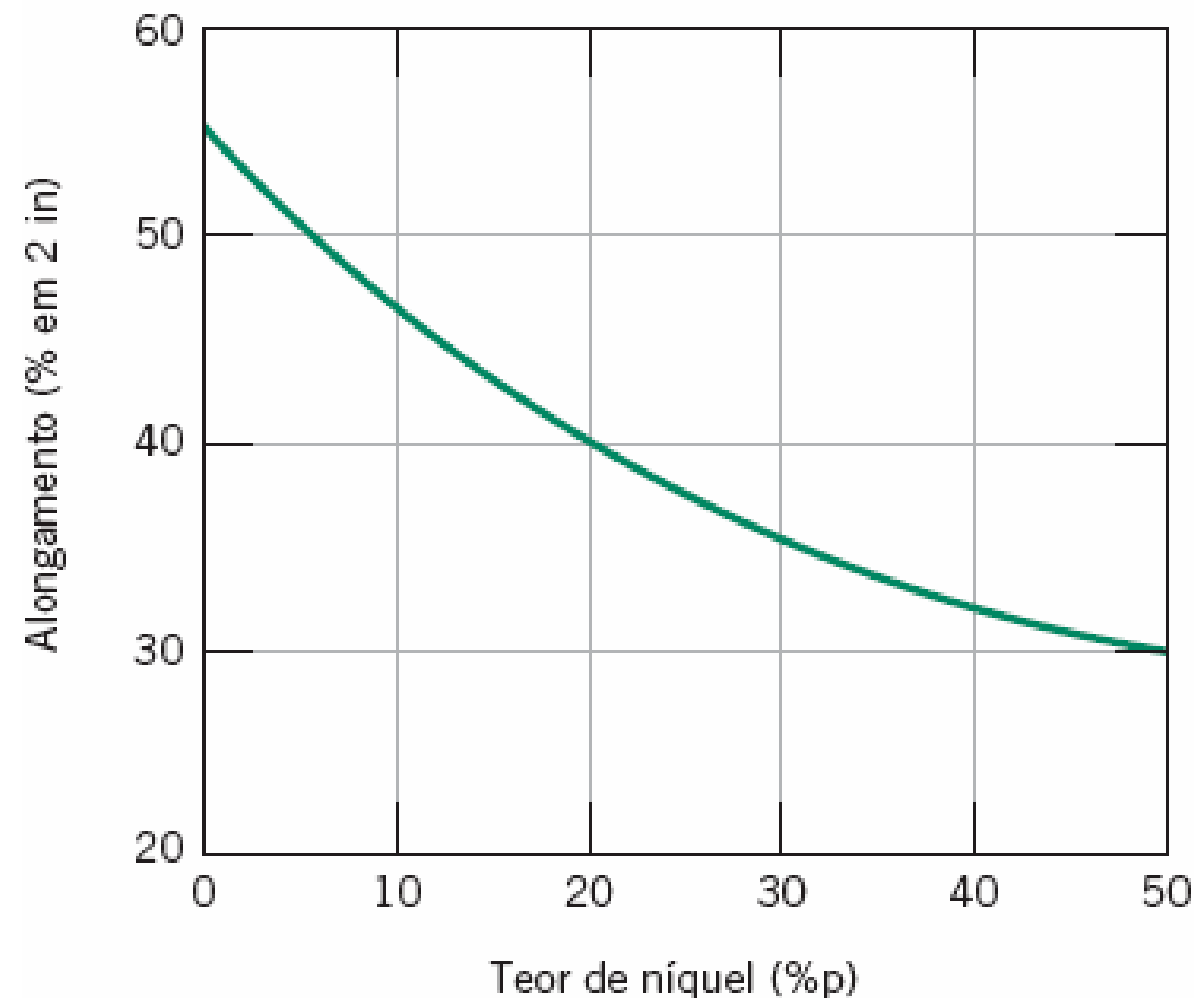
- Formação de ligas: aumento de resistência.
- Impureza resulta em um aumento no limite de resistência a tração e no limite de escoamento.



# Aumento de resistência por solução sólida

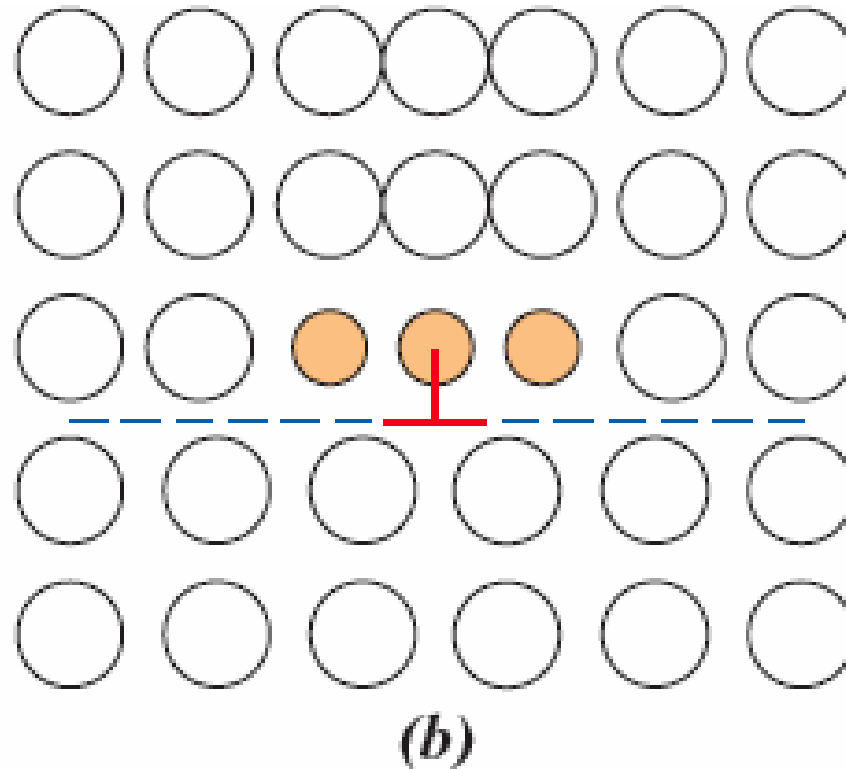
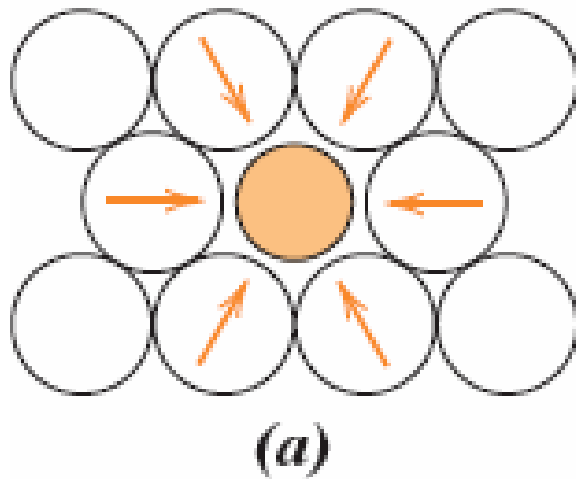
- Ductilidade: medida do grau de deformação plástica que foi suportado até a fratura.

$$\%AL = \left( \frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \times 100$$



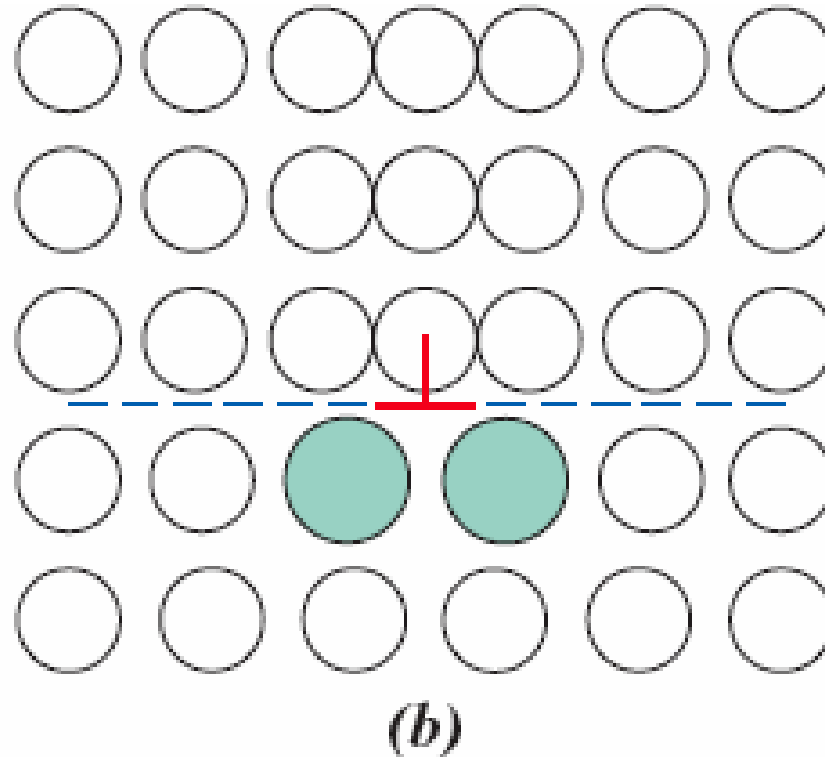
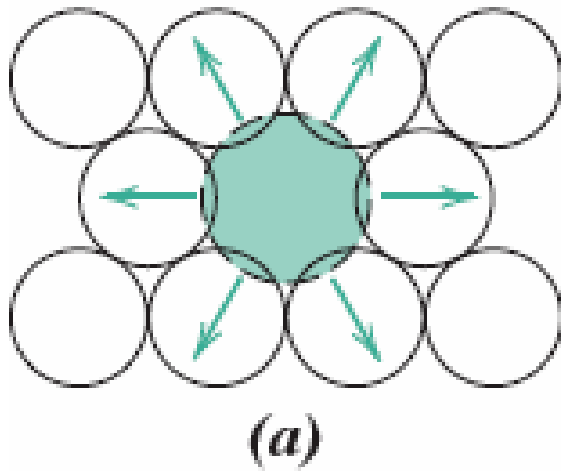
# Aumento de resistência por solução sólida

- Impurezas impõem deformação na rede sobre os átomos hospedeiros vizinhos.
- Impureza substitucional (raio menor que hospedeiros): exerce deformação de tração na rede vizinha.



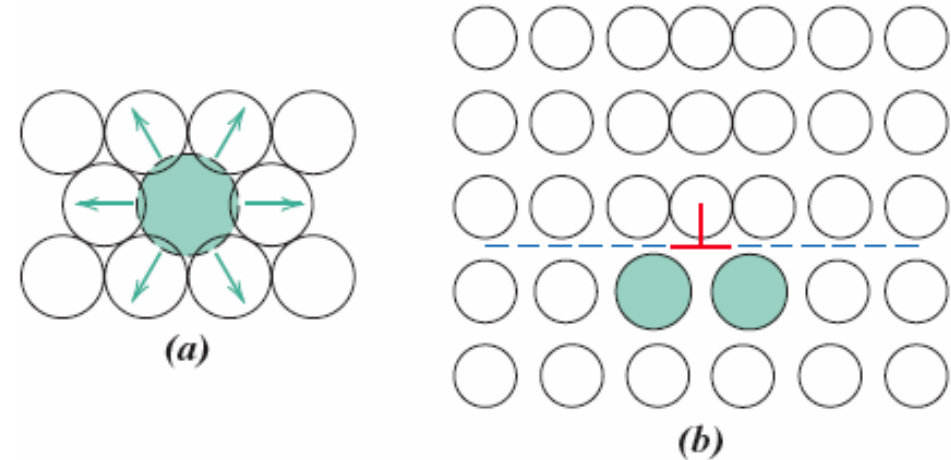
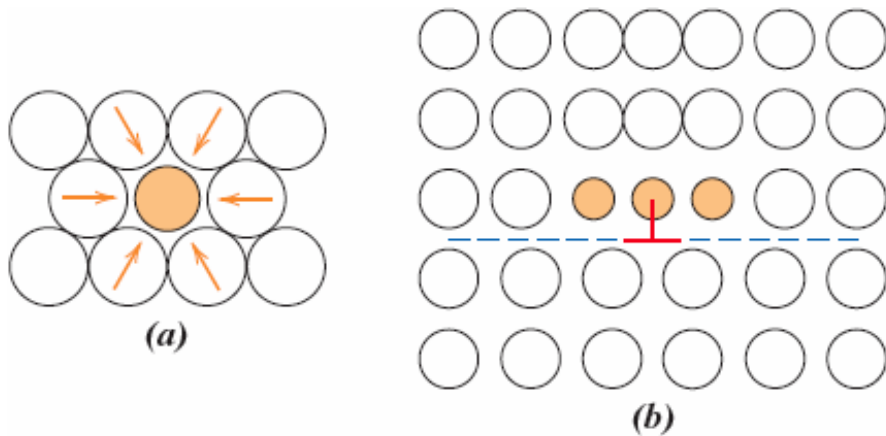
# Aumento de resistência por solução sólida

- Impurezas impõem deformação na rede sobre os átomos hospedeiros vizinhos.
- Impureza substitucional (raio maior que hospedeiros): exerce deformação de compressão na rede vizinha.



# Aumento de resistência por solução sólida

- Impurezas difundem para a região de defeito.
- Impurezas reduzem a energia de distorção local.
- Há um “cancelamento” da discordância.
- Há maior resistência ao escorregamento.



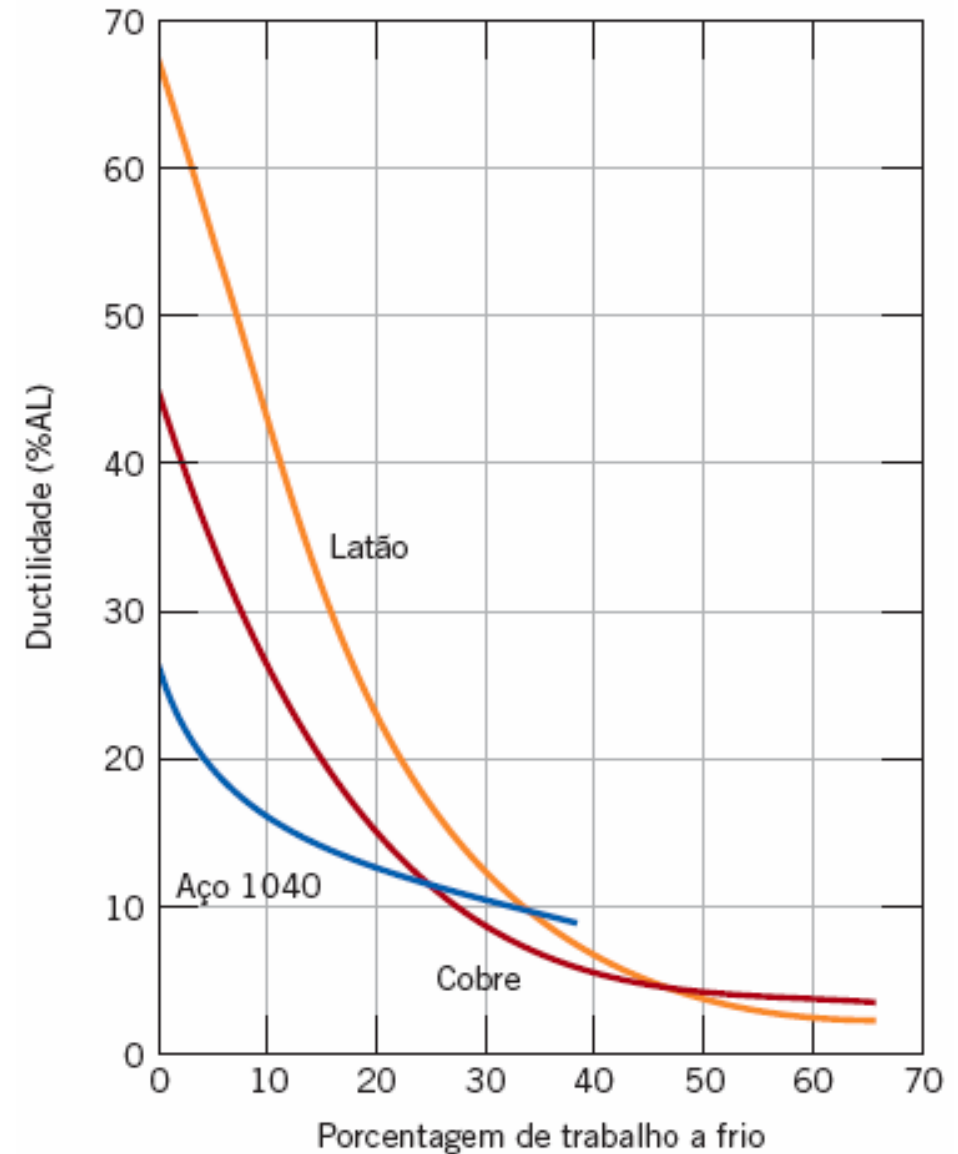
# Encruamento

- **Encruamento, ou endurecimento por deformação**, é o fenômeno pelo qual um metal dúctil se torna mais duro e mais resistente à medida que é deformado plasticamente.
- Às vezes esse fenômeno também é chamado de **endurecimento por trabalho**, ou, pelo fato de a temperatura na qual a deformação ocorre ser “fria” em relação à temperatura absoluta de fusão do metal, de **trabalho a frio**.
- Porcentagem de trabalho frio:

$$\% \mathbf{TF} = \left( \frac{A_0 - A_d}{A_0} \right) \times 100$$

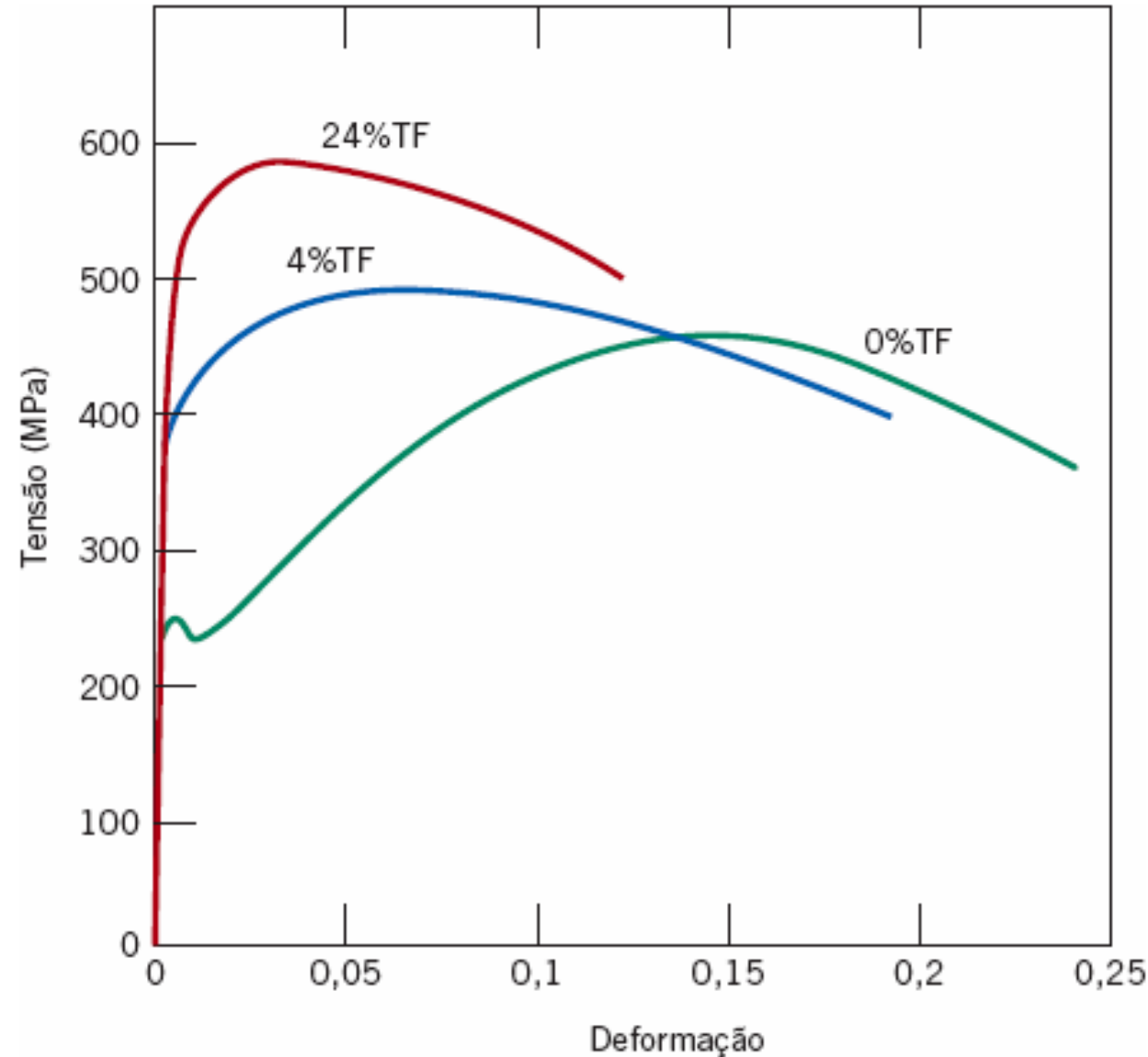
# Encruamento

- Diminuição na ductilidade.

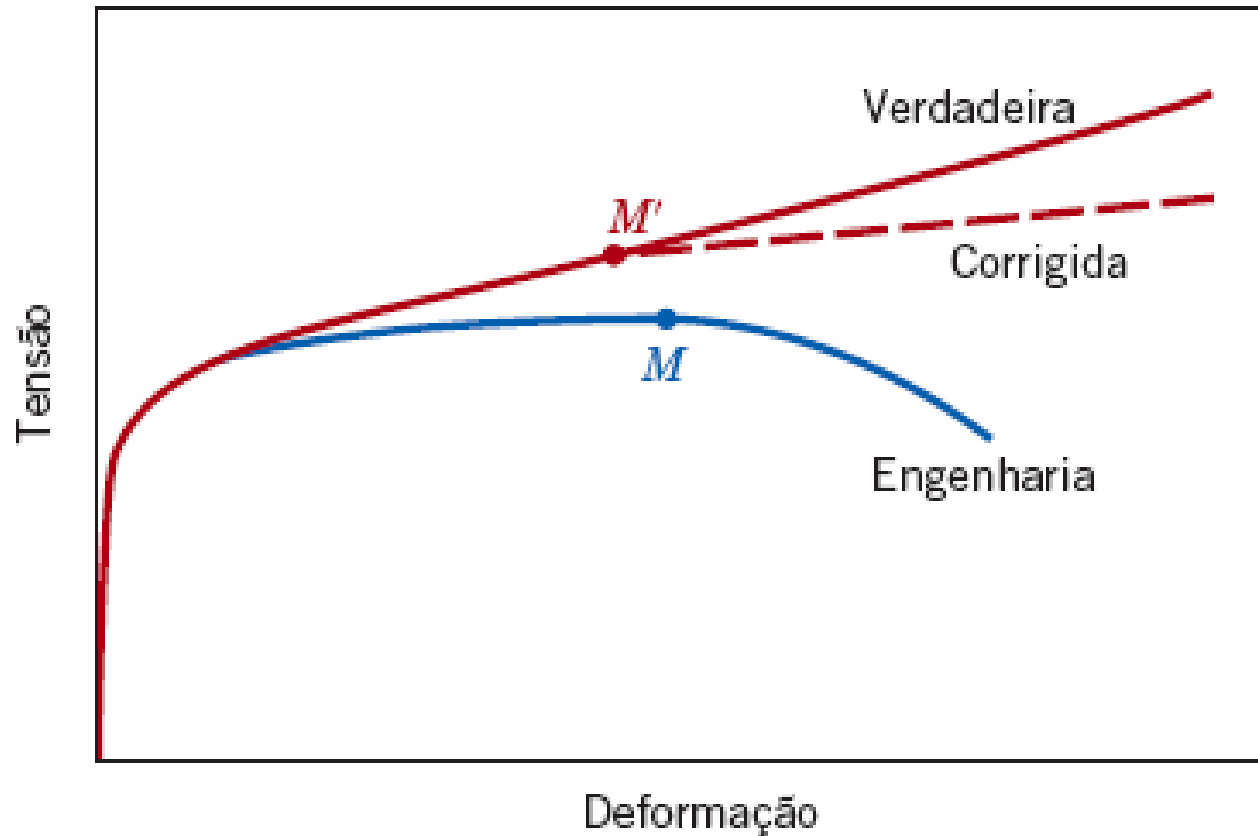


# Encruamento

- Diminuição na ductilidade.
- Trabalho a frio no diagrama tensão deformação do aço:
- A densidade de discordâncias em um metal aumenta com a deformação ou o trabalho a frio.
- Distância média de separação entre as discordâncias diminui.
- As interações de deformações de discordância-discordância são repulsivas.
- O movimento de uma discordância é dificultado pela presença de outras discordâncias.



# Tensão e deformação verdadeira



- Para alguns metais e ligas (eq. de Hollomon):

$$\sigma_v = k \epsilon_v^n$$

Onde K e n são constantes .

- Válido do início da deformação plástica até o de início do pescoço
- O parâmetro n é o **coeficiente de encruamento** e possui valor entre 0 e 1. O coeficiente de encruamento é uma medida da capacidade do material encruar ( ou seja, a capacidade do material aumentar sua resistência quando deformado).

# Tensão e deformação verdadeira

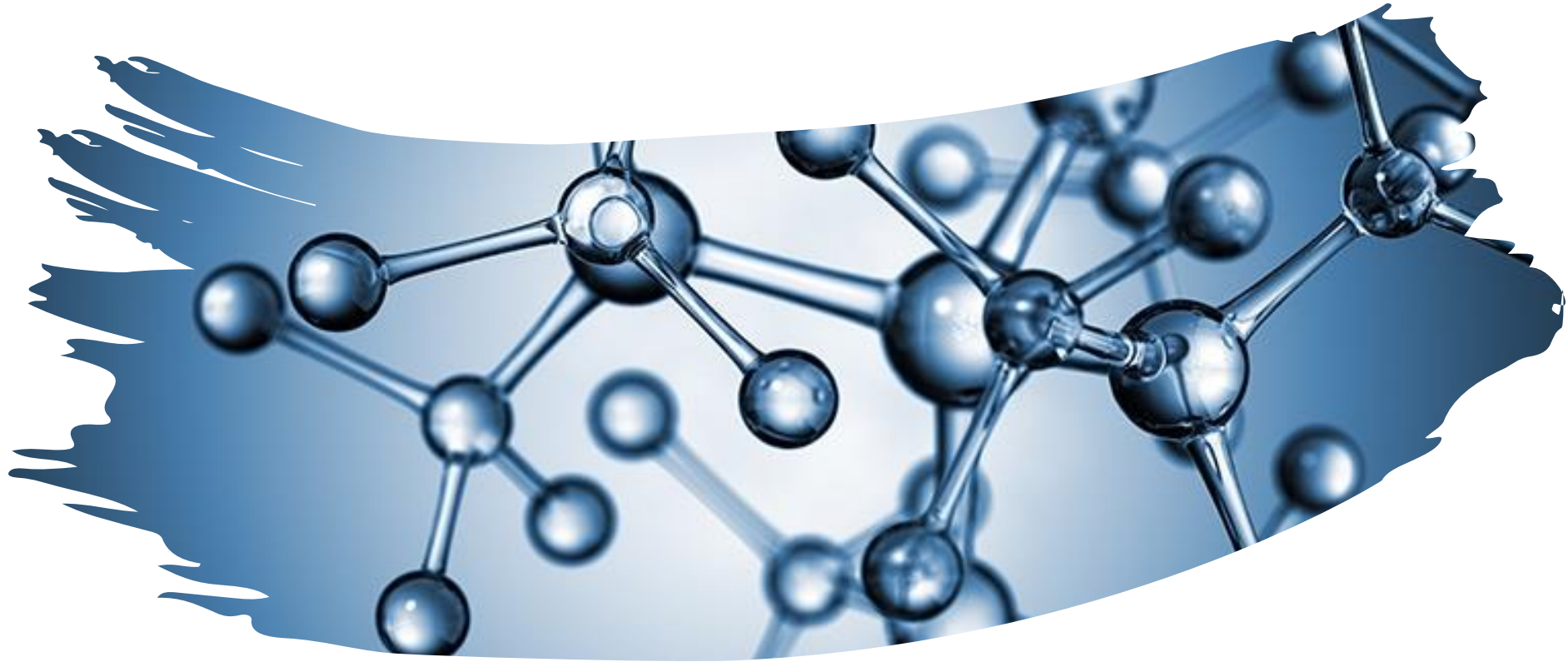
| Material                                              | n    | K    |         |
|-------------------------------------------------------|------|------|---------|
|                                                       |      | MPa  | psi     |
| Aço de baixo teor de carbono (aço doce)<br>(recozido) | 0,21 | 600  | 87.000  |
| Liga 4340 (revenido a 315°C)                          | 0,12 | 2650 | 385.000 |
| Aço inoxidável 304 (recozido)                         | 0,44 | 1400 | 205.000 |
| Cobre (recozido)                                      | 0,44 | 530  | 76.500  |
| Latão naval (recozido)                                | 0,21 | 585  | 85.000  |
| Liga de alumínio 2024 (tratada termicamente — T3)     | 0,17 | 780  | 113.000 |
| Liga de magnésio AZ-31B (recozida)                    | 0,16 | 450  | 66.000  |

- Para alguns metais e ligas (eq. de Hollomon):

$$\sigma_v = k \epsilon_v^n$$

Onde K e n são constantes .

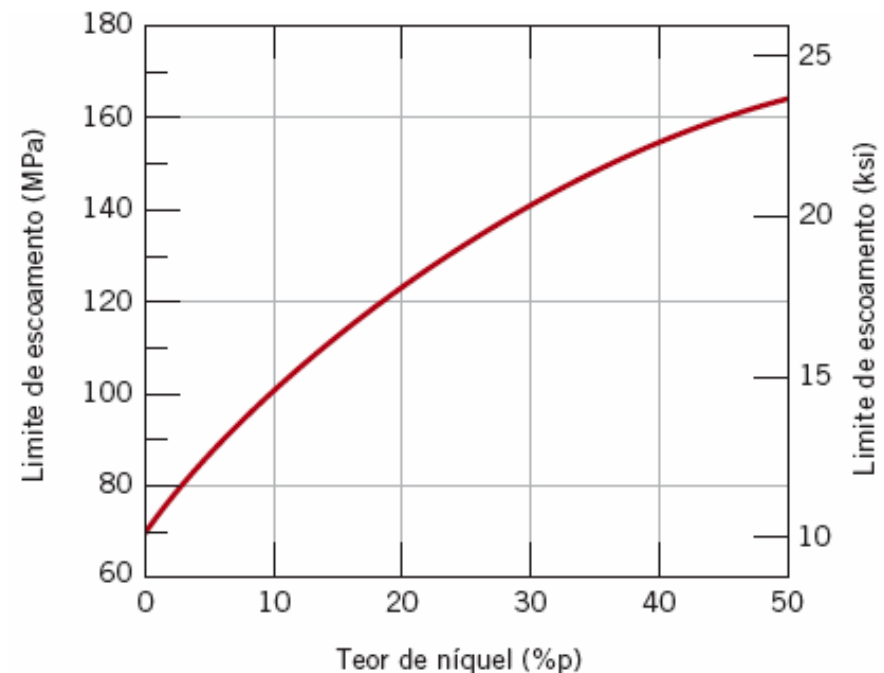
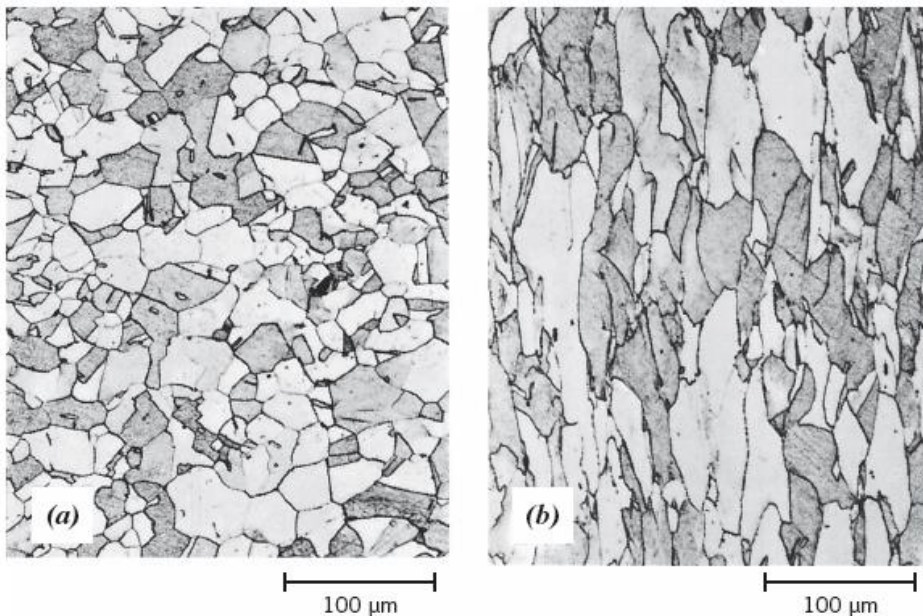
- Válido do início da deformação plástica até o de início do pescoço
- O parâmetro n é o **coeficiente de encruamento** e possui valor entre 0 e 1. O coeficiente de encruamento é uma medida da capacidade do material encruar ( ou seja, a capacidade do material aumenta sua resistência quando deformado).



### **3. Recuperação, recristalização e crescimento de grão**

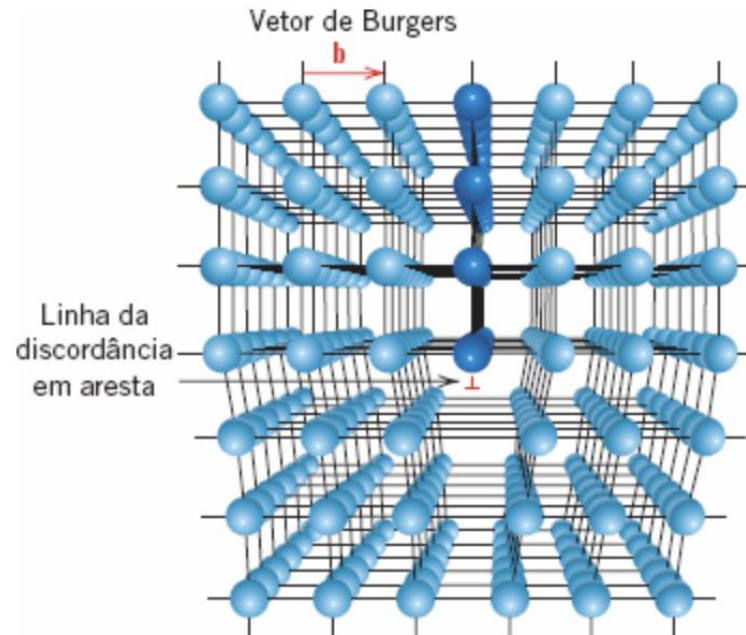
# Recuperação cristalina

- Deformação plástica de metal policristalina em temperaturas que são baixas em comparação à sua temperatura absoluta de fusão produz alterações microestruturais.
- Interação na forma do grão; encruamento; aumento na densidade das discordâncias.
- Uma parcela da energia gasta na deformação é armazenada no metal como energia de deformação, associada a zonas de tração, compressão e cisalhamento ao redor das discordâncias recém-criadas.



# Recuperação cristalina

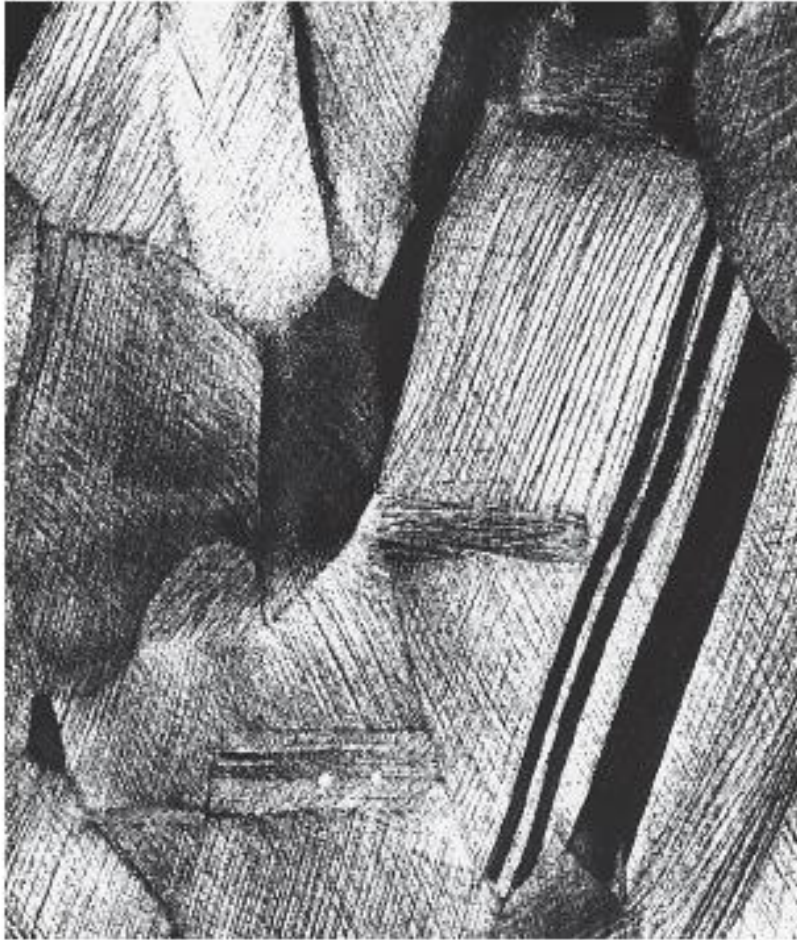
- Durante a recuperação, uma parcela da energia de deformação interna armazenada é liberada (movimento de átomos).
- Existe certa redução no número de discordâncias, e são produzidas configurações de discordâncias que possuem baixas energias de deformação.
- Algumas propriedades físicas, tais como as condutividades elétrica e térmica, são recuperadas aos estados de antes do trabalho a frio.



# Recristalização

- A recristalização é a formação de um novo conjunto de grãos livres de deformação e equiaxiais
- Baixas densidades de discordâncias e que são característicos das condições anteriores ao trabalho a frio.
- A força motriz para produzir essa nova estrutura de grãos é a diferença de energia interna entre o material deformado e o material não deformado.
- Os novos grãos se formam como núcleos muito pequenos e crescem até consumirem por completo seu material de origem, em processos que envolvem difusão de curto alcance.

# Recristalização



(a)

100  $\mu\text{m}$



(b)

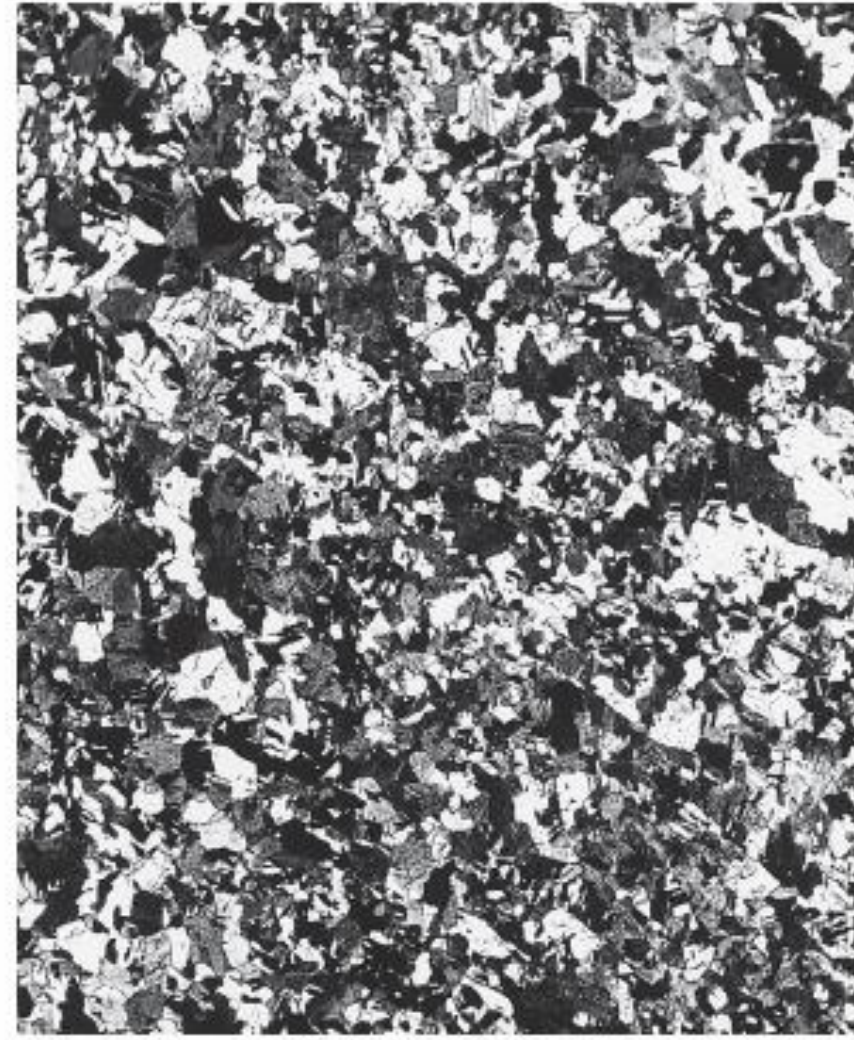
100  $\mu\text{m}$

# Recristalização



(c)

100  $\mu\text{m}$

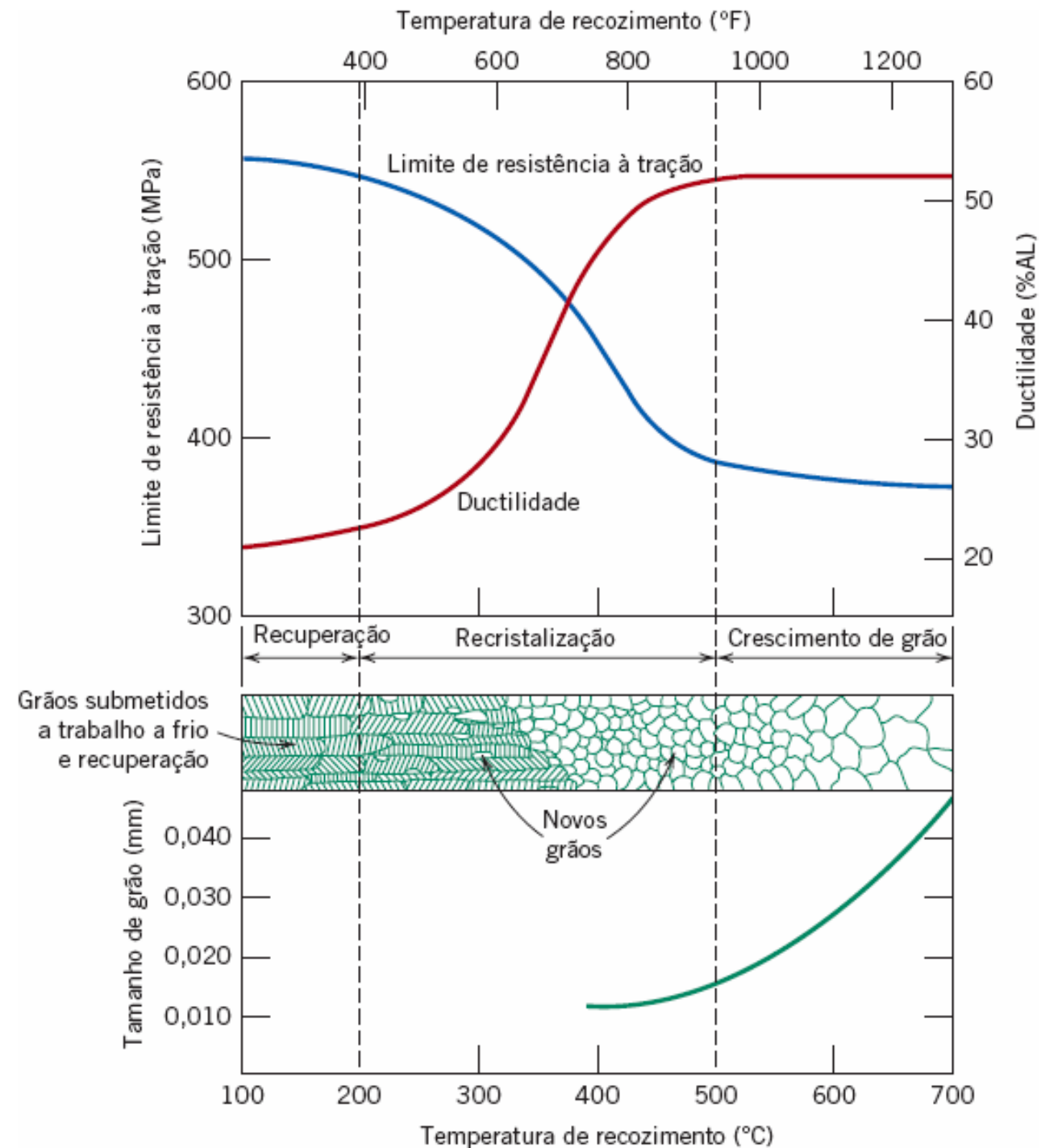


(d)

100  $\mu\text{m}$

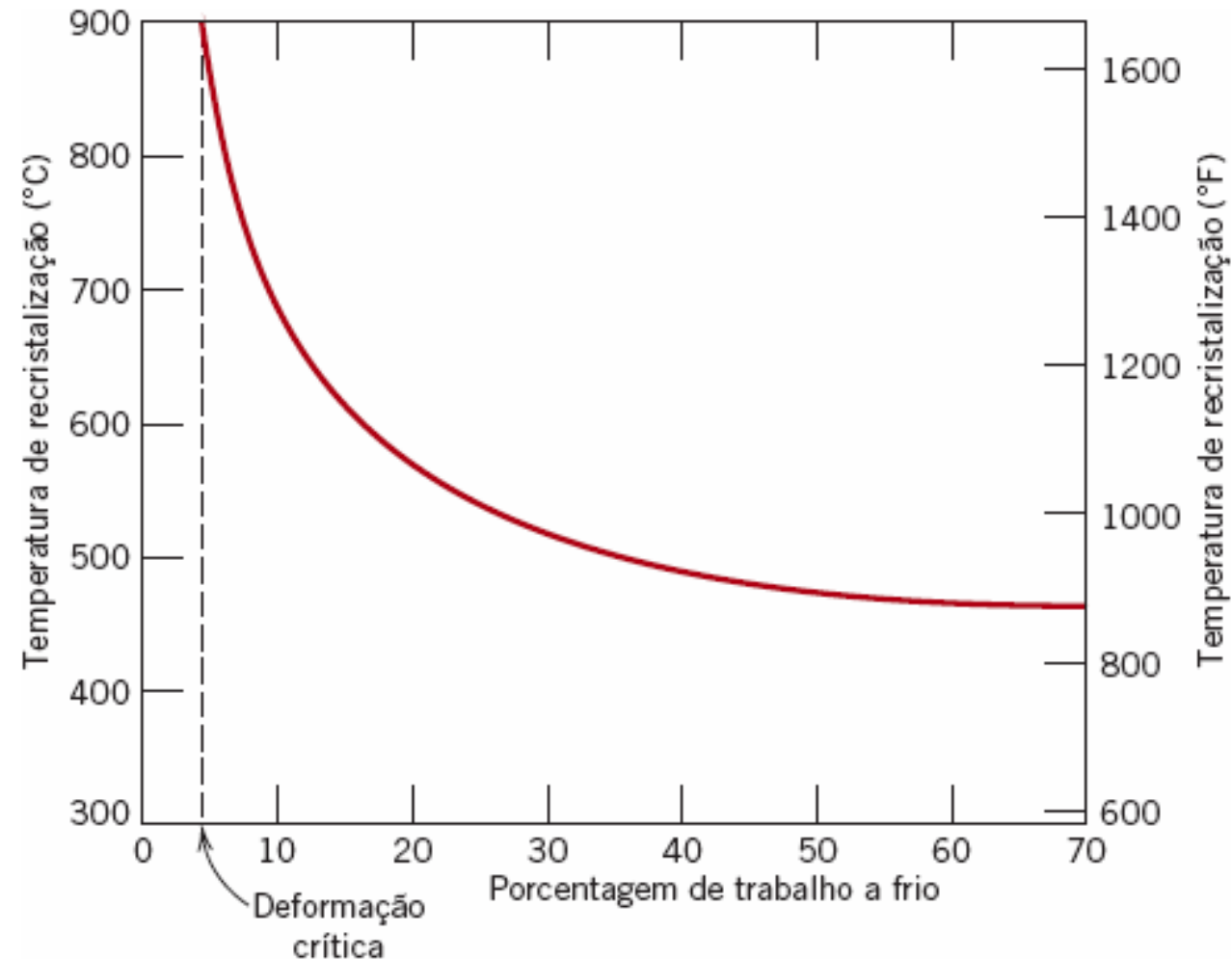
# Recristalização

- O comportamento da recristalização de uma determinada liga metálica é às vezes especificado em termos de uma **temperatura de recristalização**, que é a temperatura na qual a recristalização termina em exatamente 1 h.
- Latão: 450°C (850°F).
- Tipicamente, está entre um terço e metade da temperatura de fusão.
- Depende de vários fatores: quantidade de trabalho a frio a que o material foi submetido; pureza da liga.



# Recristalização

- O aumento do trabalho a frio aumenta a taxa de recristalização.
- Redução da temperatura de recristalização, que tende a um valor constante ou limite sob deformações elevadas.
- Existe um nível crítico de trabalho a frio abaixo do qual a recristalização não pode ser induzida, como mostra a figura; normalmente, esse nível crítico está entre 2% e 20% de trabalho a frio.



# Recristalização

- A recristalização é mais rápida no metais puros do que nas ligas.
- Durante a recristalização, ocorre o movimento dos contornos de grão conforme novos núcleos de grãos se formam e então crescem.
- Acredita-se que os átomos de impurezas segregam-se preferencialmente nos contornos de grão recristalizados e interagem com eles,
- Diminuição na taxa de recristalização e aumenta a temperatura de recristalização,
- Para os metais puros, a temperatura de recristalização é normalmente de  $0,4 T_f$  ; para algumas ligas comerciais, ela pode chegar a  $0,7T_f$ .

| <i>Metal</i>        | <i>Temperatura de Recristalização</i> |           | <i>Temperatura de Fusão</i> |           |
|---------------------|---------------------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|
|                     | <i>°C</i>                             | <i>°F</i> | <i>°C</i>                   | <i>°F</i> |
| Chumbo              | −4                                    | 25        | 327                         | 620       |
| Estanho             | −4                                    | 25        | 232                         | 450       |
| Zinco               | 10                                    | 50        | 420                         | 788       |
| Alumínio (99,999%p) | 80                                    | 176       | 660                         | 1220      |
| Cobre (99,999%p)    | 120                                   | 250       | 1085                        | 1985      |
| Latão (60 Cu-40 Zn) | 475                                   | 887       | 900                         | 1652      |
| Níquel (99,99%p)    | 370                                   | 700       | 1455                        | 2651      |
| Ferro               | 450                                   | 840       | 1538                        | 2800      |
| Tungstênio          | 1200                                  | 2200      | 3410                        | 6170      |

# Recristalização

- As operações de deformação plástica são realizadas frequentemente em temperaturas acima da temperatura de recristalização.
- Processo denominado **trabalho a quente**.
- O material permanece relativamente com baixa dureza e dúctil durante a deformação, pois não encrua; dessa forma, são possíveis grandes deformações.

| <i>Metal</i>        | <i>Temperatura de Recristalização</i> |           | <i>Temperatura de Fusão</i> |           |
|---------------------|---------------------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|
|                     | <i>°C</i>                             | <i>°F</i> | <i>°C</i>                   | <i>°F</i> |
| Chumbo              | −4                                    | 25        | 327                         | 620       |
| Estanho             | −4                                    | 25        | 232                         | 450       |
| Zinco               | 10                                    | 50        | 420                         | 788       |
| Alumínio (99,999%p) | 80                                    | 176       | 660                         | 1220      |
| Cobre (99,999%p)    | 120                                   | 250       | 1085                        | 1985      |
| Latão (60 Cu-40 Zn) | 475                                   | 887       | 900                         | 1652      |
| Níquel (99,99%p)    | 370                                   | 700       | 1455                        | 2651      |
| Ferro               | 450                                   | 840       | 1538                        | 2800      |
| Tungstênio          | 1200                                  | 2200      | 3410                        | 6170      |

# Crescimento de grão

- Após a conclusão da recristalização, os grãos isentos de deformações continuarão a crescer se a amostra do metal for deixada sob uma temperatura elevada.
- Esse fenômeno é chamado **crescimento de grão**.
- O crescimento de grão não precisa ser precedido por recuperação e recristalização; ele pode ocorrer em todos os materiais policristalinos, tanto nos metais quanto nas cerâmicas.

# Crescimento de grão



(e)

100  $\mu\text{m}$



(f)

100  $\mu\text{m}$

# Crescimento de grão

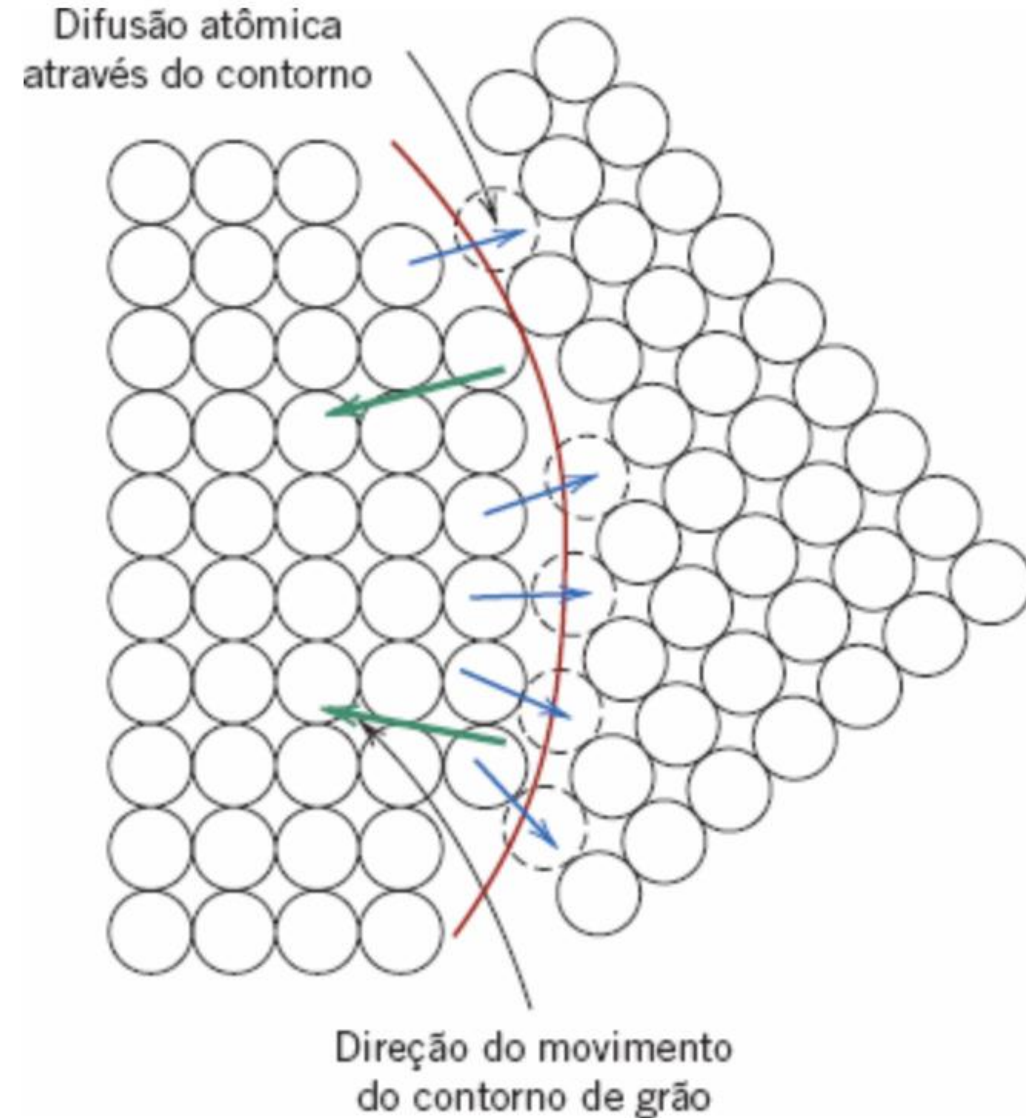
- O crescimento de grão ocorre pela migração dos contornos de grão.
- Grãos maiores crescem à custa de grãos menores que diminuem.
- Diâmetro do grão

$$d^n - d_0^n = Kt$$

$n = 2$  ou  $n > 0$

Diâmetro inicial do grão

Constante Independente de  $t$



# Crescimento de grão

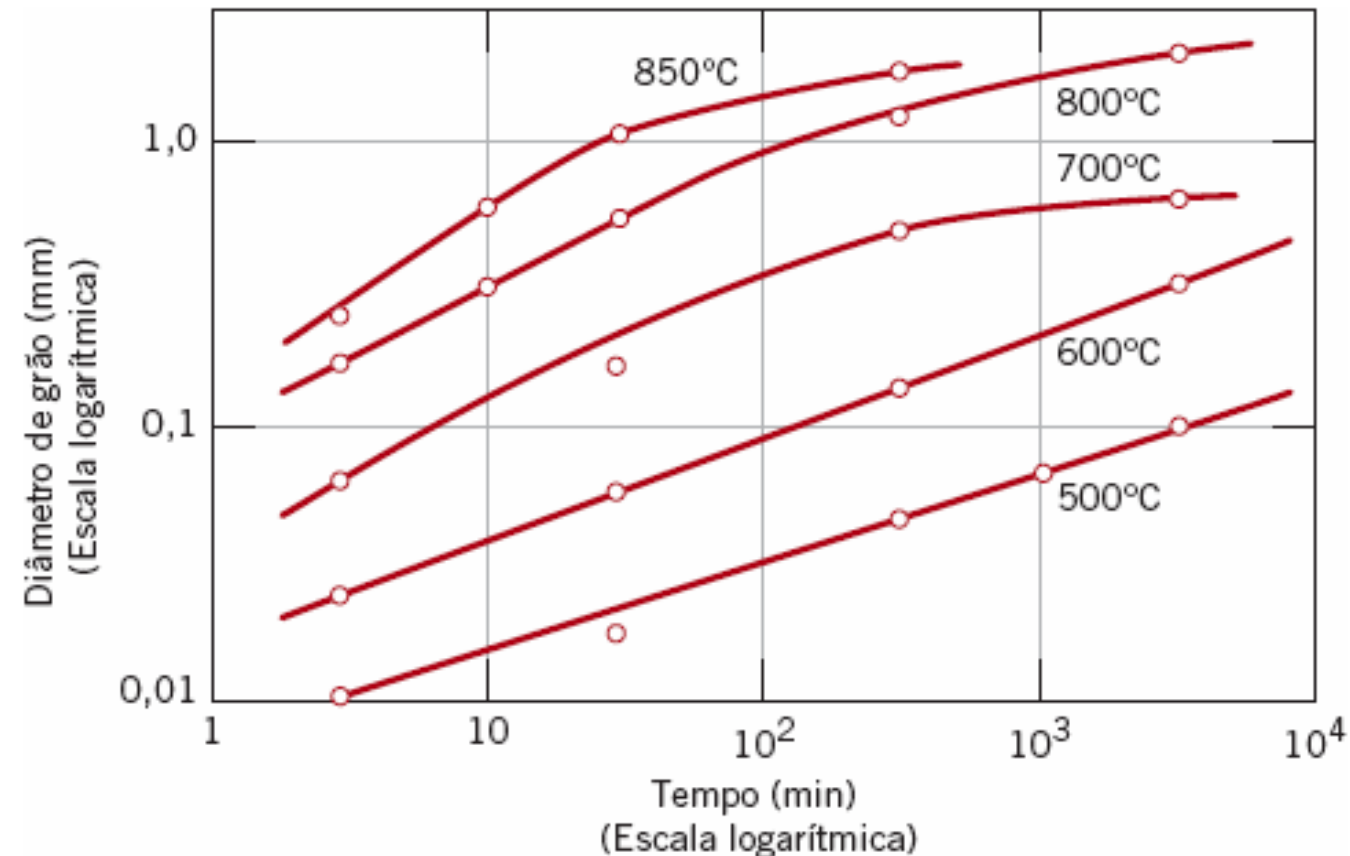
- O crescimento de grão ocorre pela migração dos contornos de grão.
- Grãos maiores crescem à custa de grãos menores que diminuem.
- Diametro do grão

$$d^n - d_0^n = Kt$$

$n = 2$  ou  $n > 0$

Diâmetro inicial do grão

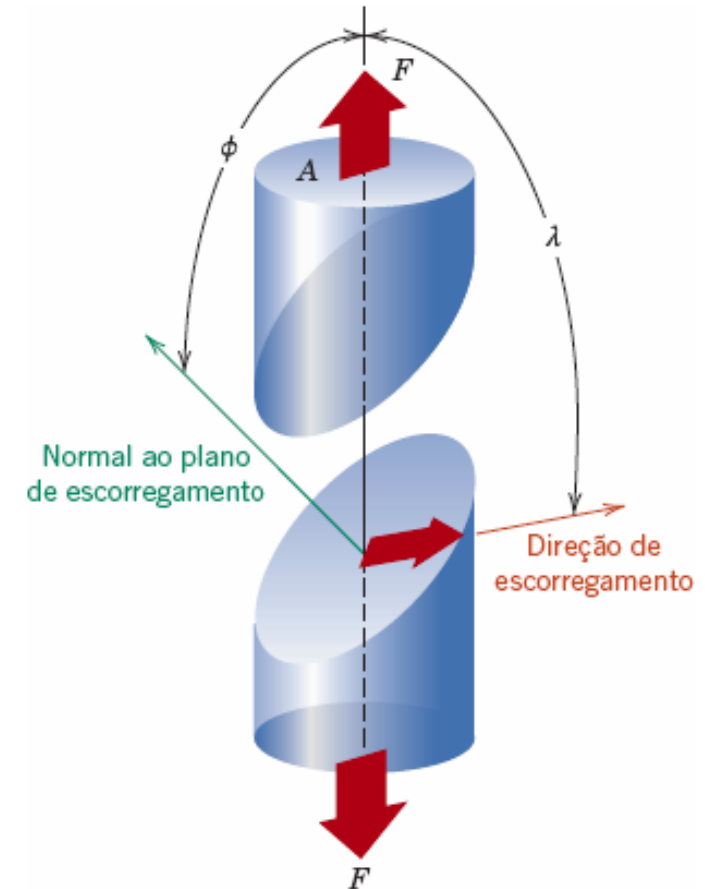
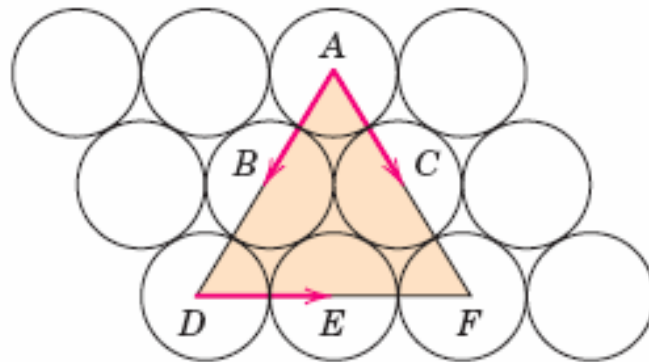
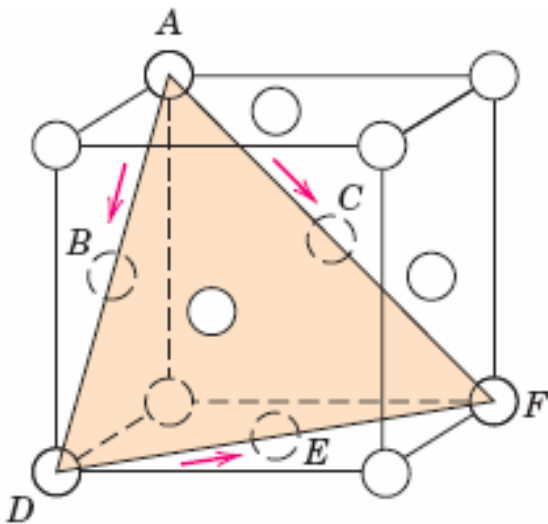
Constante Independente de  $t$



# Take-home message...

## 1. Discordância e deformação plástica

- I. Sistema de escorregamento (estrutura cristalina, planos e direção).
- II. Escorregamento em monocristais e policristais.
- III. Formação de macla.



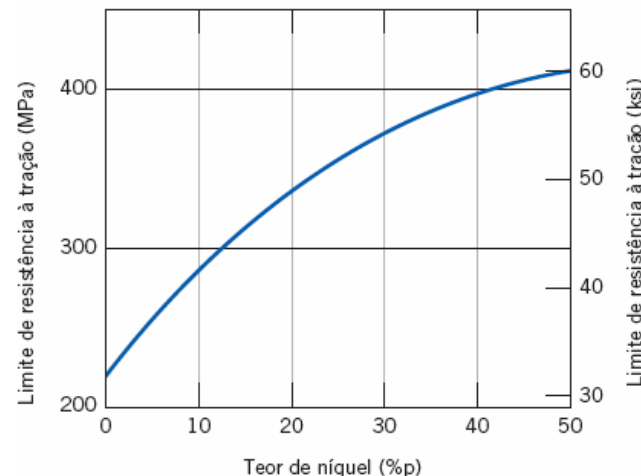
# Take-home message...

## 1. Discordância e deformação plástica

- I. Sistema de escorregamento (estrutura cristalina, planos e direção).
- II. Escorregamento em monocristais e policristais.
- III. Formação de macla.

## 2. Mecanismo de aumento de resistência em metais

- I. Variação nas propriedades mecânicas (limite de escoamento, limite de resistência a tração, ductilidade, encruamento).



# Take-home message...

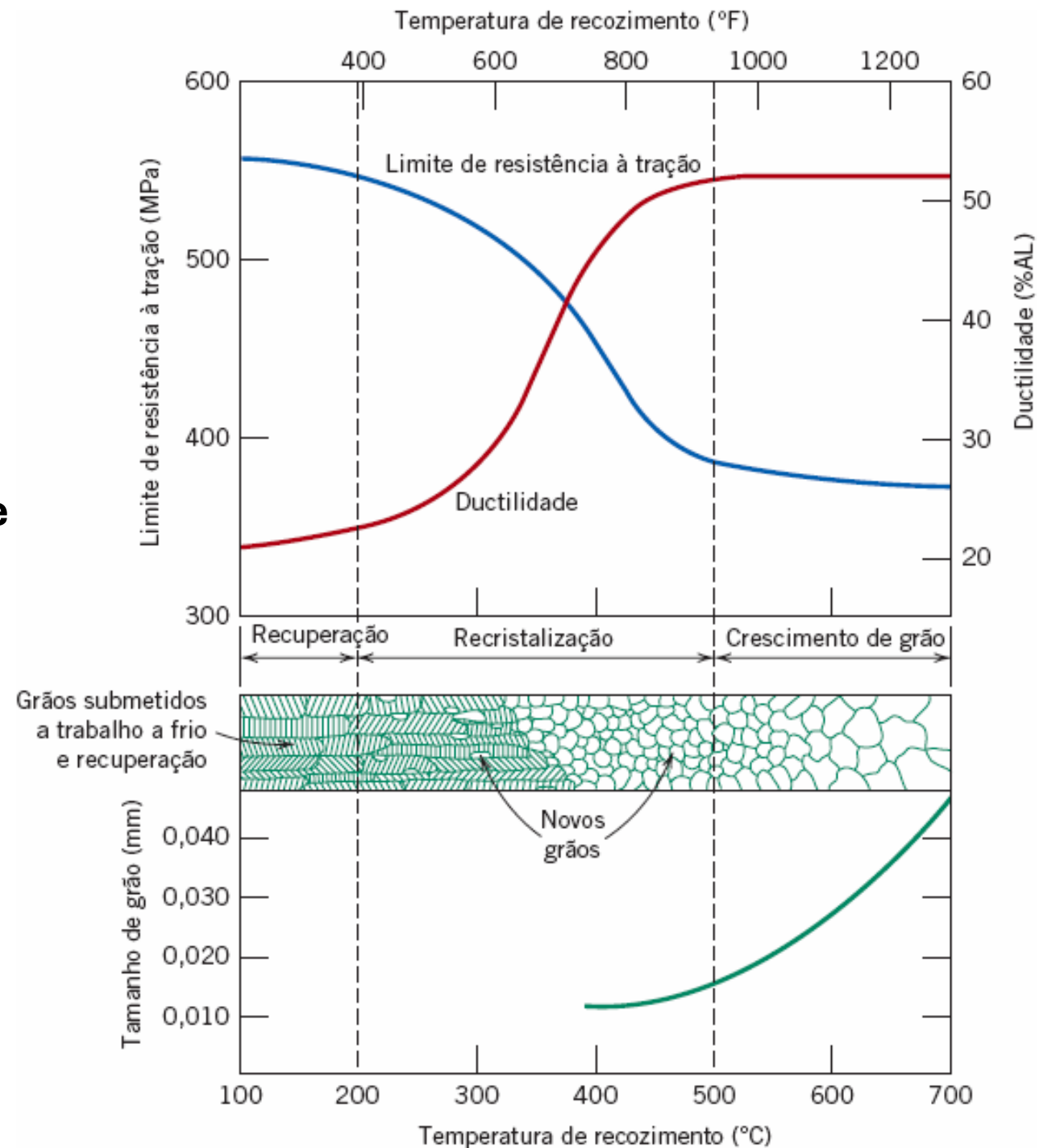
## 1. Discordância e deformação plástica

- I. Sistema de escorregamento (estrutura cristalina, planos e direção).
- II. Escorregamento em monocristais e policristais.
- III. Formação de macla.

## 2. Mecanismo de aumento de resistência em metais

- I. Variação nas propriedades mecânicas (limite de escoamento, limite de resistência a tração, ductilidade, encruamento).

## 3. Recuperação, recristalização e crescimento de grão



# Próxima aula...

## Aula experimental: ensaio mecânico

