

Propriedades mecânicas de sólidos metálicos:

- **Deformação elástica**
- **Deformação plástica**
- **Discordância e resistência**
 - **Dureza e fratura**

Introdução ao estudo dos materiais

Estruturas dos sólidos cristalinos

Imperfeições na rede cristalina

Difusão em sólidos metálicos

Propriedades mecânicas de sólidos metálicos

Diagramas de fase

Ligas metálicas

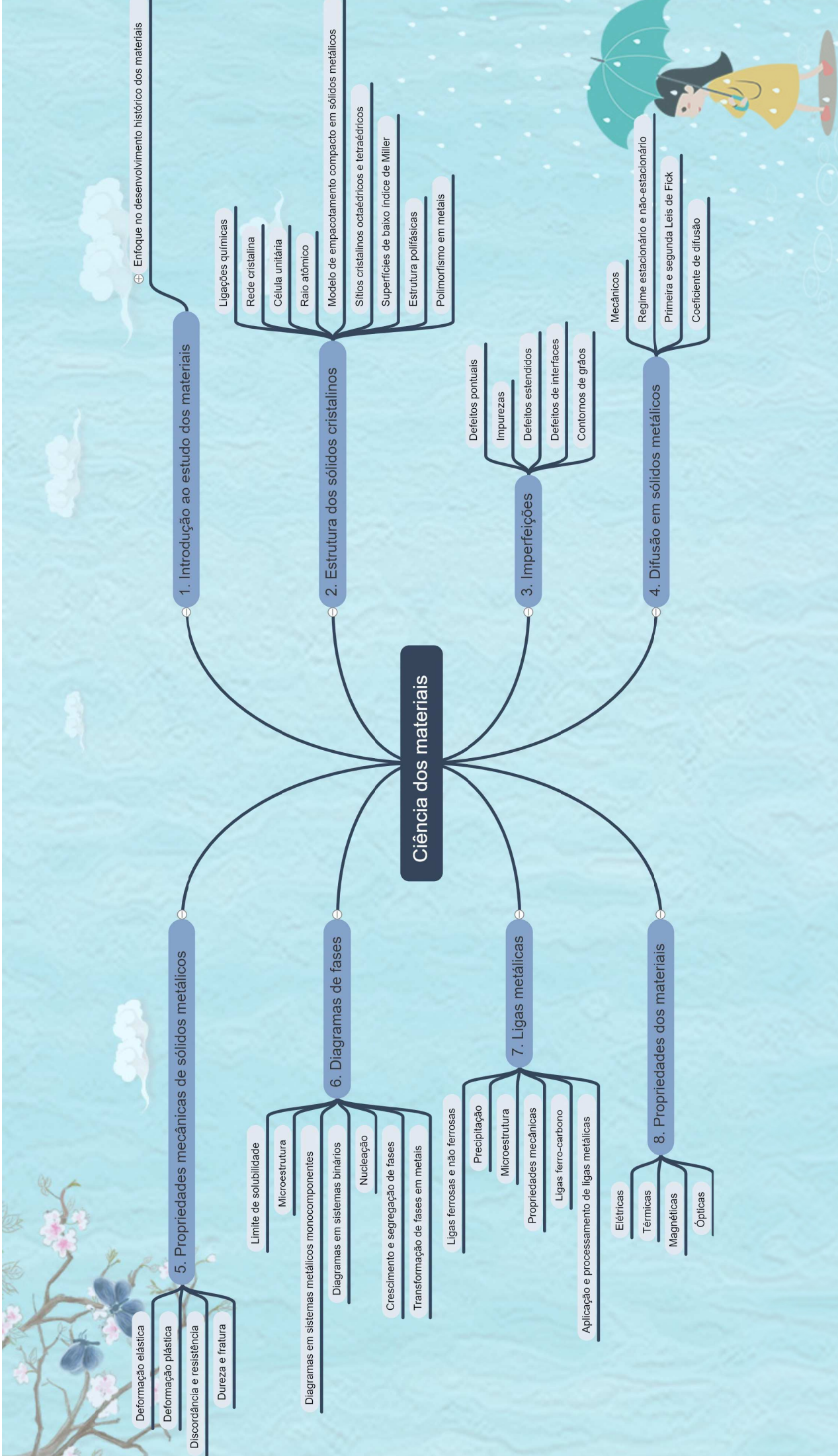
Propriedades das ligas metálicas

Ciência dos Materiais



```
graph TD; A[Ciência dos Materiais] --- B[Introdução ao estudo dos materiais]; A --- C[Estruturas dos sólidos cristalinos]; A --- D[Imperfeições na rede cristalina]; A --- E[Difusão em sólidos metálicos]; A --- F[Propriedades mecânicas de sólidos metálicos]; A --- G[Diagramas de fase]; A --- H[Ligas metálicas]; A --- I[Propriedades das ligas metálicas];
```

The diagram is a mind map with a central node 'Ciência dos Materiais' connected to eight peripheral nodes. The nodes are arranged in a semi-circle around the center. The background is light blue with decorative green and teal circles and patterns.



Ciência dos materiais

1. Introdução ao estudo dos materiais

⊕ Enfoque no desenvolvimento histórico dos materiais

2. Estrutura dos sólidos cristalinos

- Ligações químicas
- Rede cristalina
- Célula unitária
- Raio atômico
- Modelo de empacotamento compacto em sólidos metálicos
- Sítos cristalinos octaédricos e tetraédricos
- Superfícies de baixo índice de Miller
- Estrutura polifásicas
- Polimorfismo em metais

3. Imperfeições

- Defeitos pontuais
- Impurezas
- Defeitos estendidos
- Defeitos de interfaces
- Contornos de grãos

4. Difusão em sólidos metálicos

- Mecânicos
- Regime estacionário e não-estacionário
- Primeira e segunda Leis de Fick
- Coefficiente de difusão

5. Propriedades mecânicas de sólidos metálicos

- Deformação elástica
- Deformação plástica
- Discordância e resistência
- Dureza e fratura

6. Diagramas de fases

- Limite de solubilidade
- Microestrutura
- Diagramas em sistemas metálicos monocomponentes
- Diagramas em sistemas binários
- Nucleação
- Crescimento e segregação de fases
- Transformação de fases em metais

7. Ligas metálicas

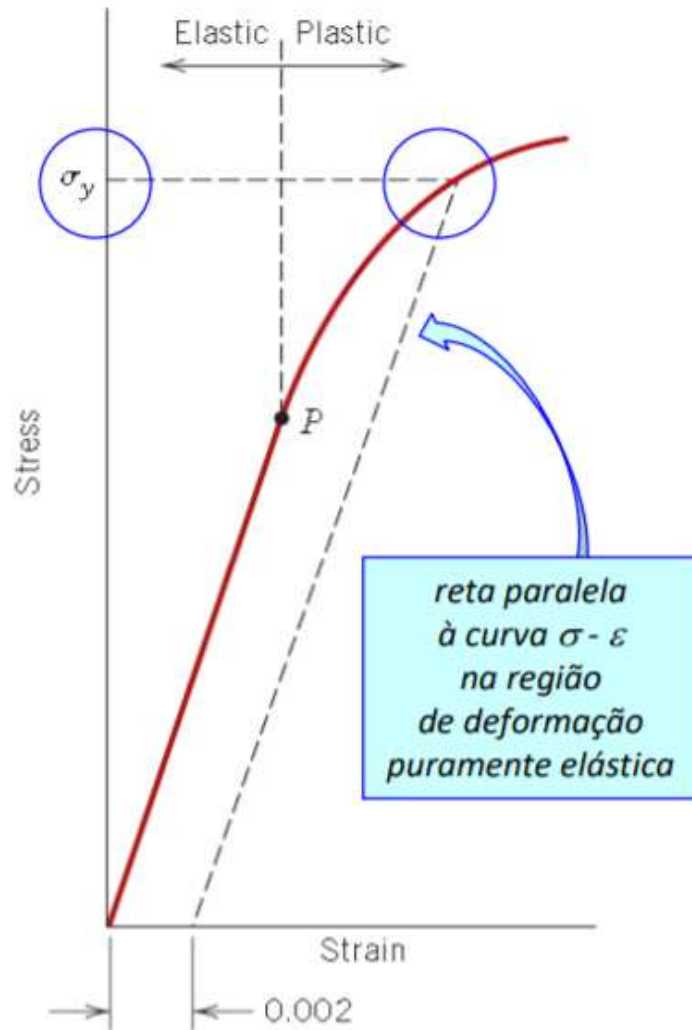
- Ligas ferrosas e não ferrosas
- Precipitação
- Microestrutura
- Propriedades mecânicas
- Ligas ferro-carbono
- Aplicação e processamento de ligas metálicas

8. Propriedades dos materiais

- Elétricas
- Térmicas
- Magnéticas
- Ópticas

Propriedades mecânicas de sólidos metálicos:

- **Deformação plástica**



Deformação elástica: é reversível porque quando a carga é retirada, as dimensões do corpo de prova retornam aos valores originais.

- ◆ Sob carga, as distâncias inter-atômicas se expandem, mas os átomos não ocupam novas posições na rede cristalina.

- ◆ Na curva $\sigma \times \varepsilon$, a região elástica corresponde a parte linear inicial do gráfico.

Deformação plástica: é irreversível, ou seja, quando a carga é retirada, o corpo de prova não recupera as suas dimensões originais.

- ◆ Sob carga, os átomos se deslocam para novas posições em relação aos átomos vizinhos originais.

Tensão

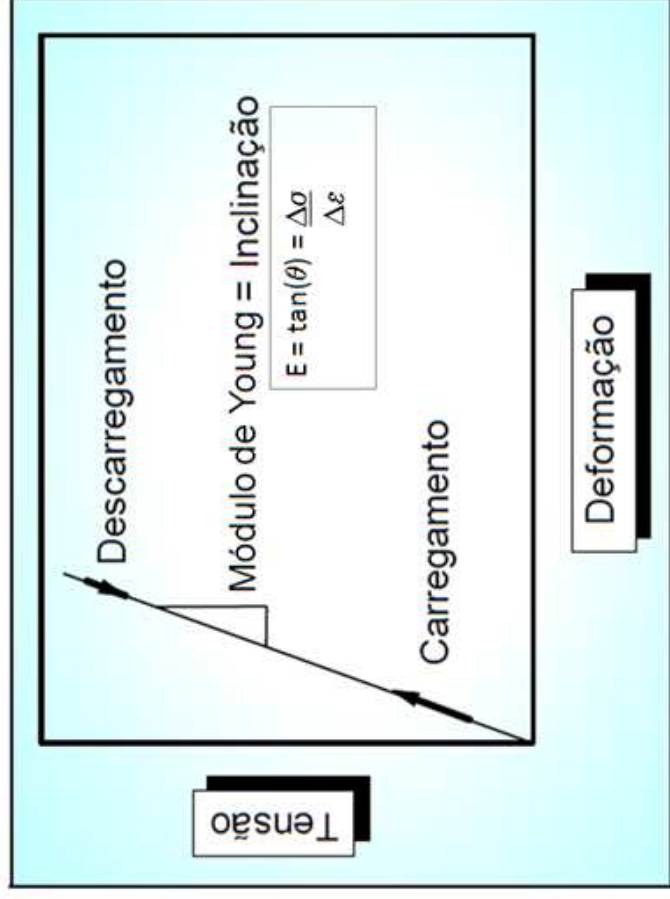
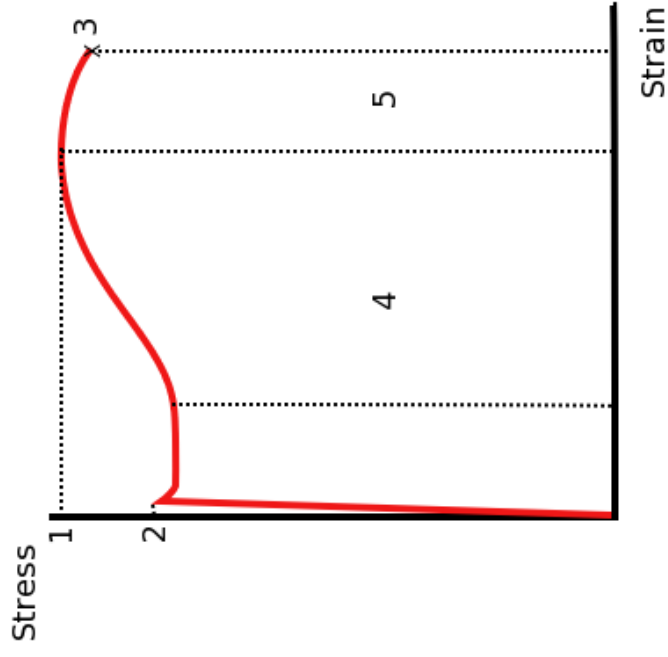
$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Deformação

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

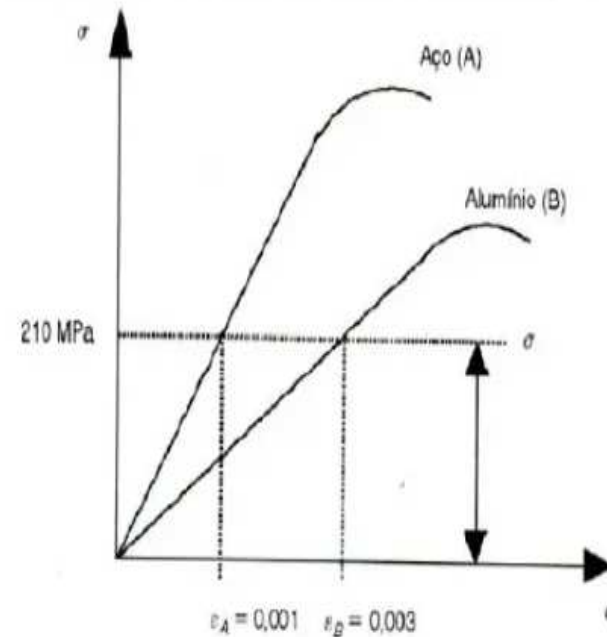
Módulo de Elasticidade

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$



Quanto maior o módulo de elasticidade mais rígido é o material ou menor é a sua deformação elástica quando uma dada tensão é aplicada

<i>Metal Alloy</i>	<i>Modulus of Elasticity</i>	
	<i>GPa</i>	<i>10⁶ psi</i>
Aluminum	69	10
Brass	97	14
Copper	110	16
Magnesium	45	6.5
Nickel	207	30
Steel	207	30
Titanium	107	15.5
Tungsten	407	59

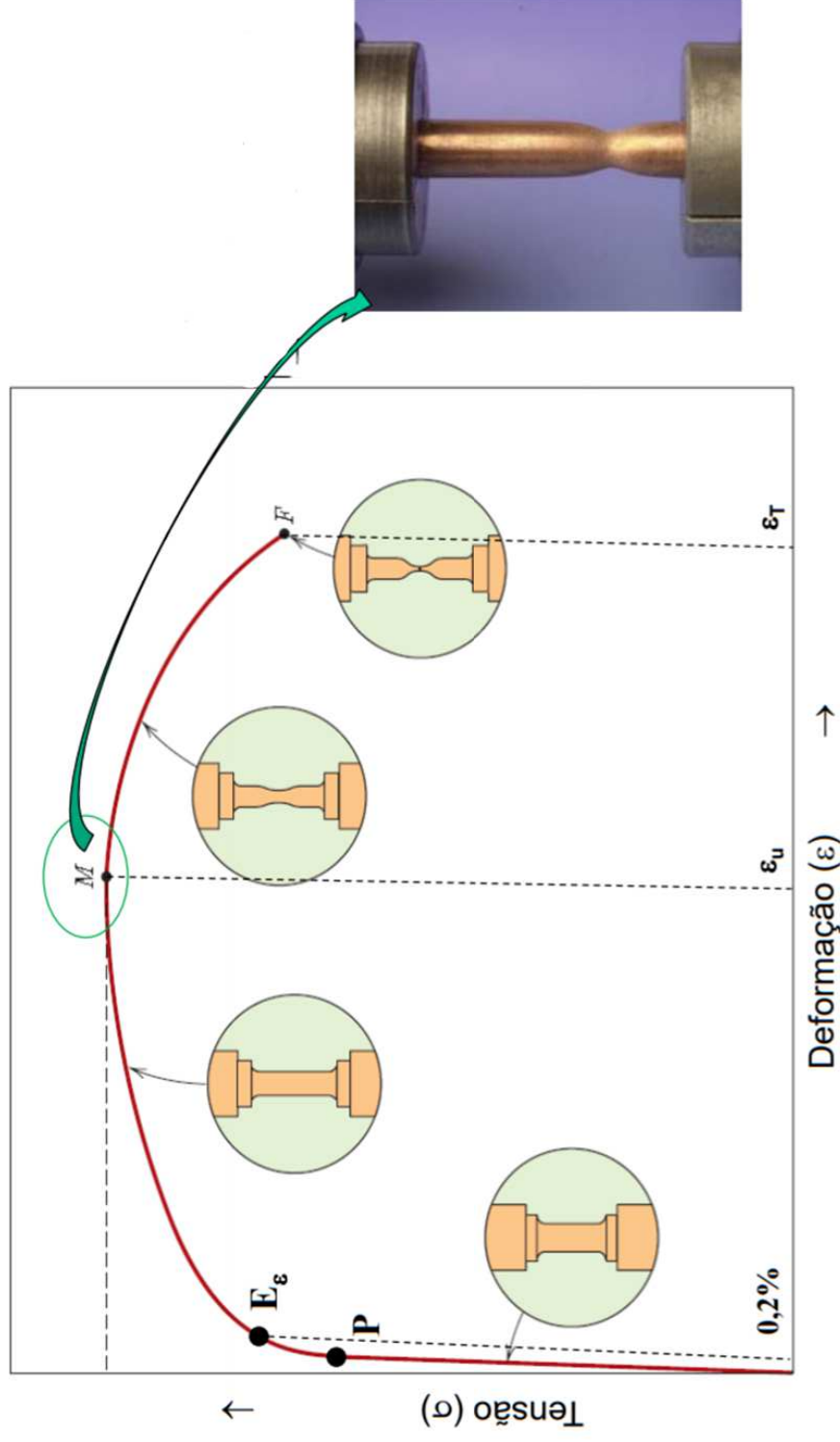


$$E_A = \frac{\sigma}{\epsilon_A}$$

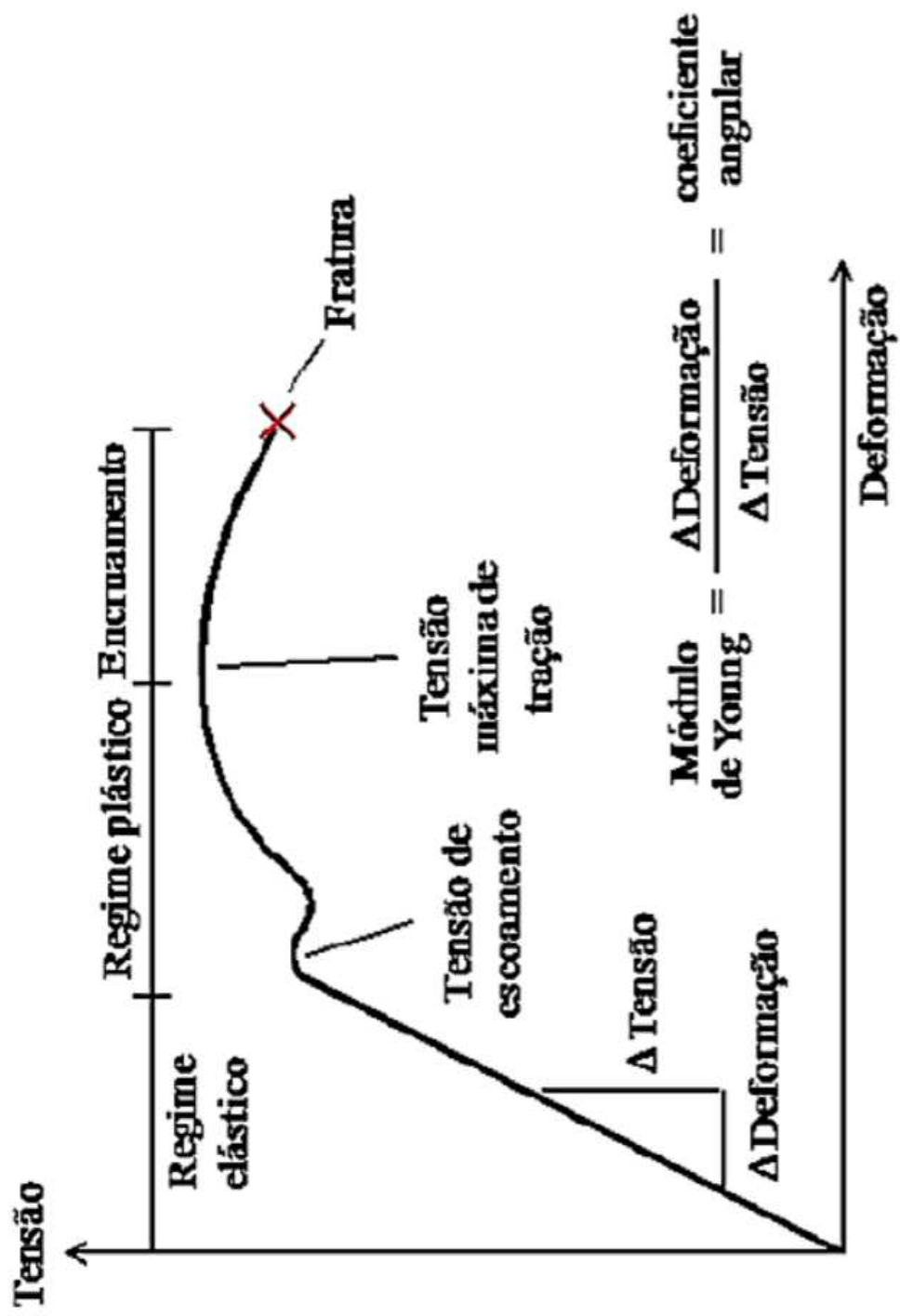
$$E_B = \frac{\sigma}{\epsilon_B}$$

Material	MÓDULO DE ELASTICIDADE OU YOUNG (E)	
	GPa	10 ⁶ Psi
* Polímero termoplástico		
** Polímero termofixo		
*** Compositos		
Poliétileno alto peso molecular *	0,7	0,1
Resina Epóxi **	3,5	0,5
Acrílicos	3,5	0,5
Epóxi reforçado com fibra vidro ***	40	5,8
Magnésio	45	6,5
Alumínio	70	10
Latão	97	14
Titânio	107	15,5
Cobre	110	16
Níquel	207	30
Aço	207	30
Compostos grafite/epóxi ***	280	40,7
Tungstênio	407	59

Curva Tensão - Deformação



- A deformação (ϵ_u) no ponto **M** corresponde ao máximo valor de ϵ com **alongamento uniforme**. Deformações maiores que ϵ_u ocorrem com **estricção** (empescoamento).
- A fratura ocorre no ponto **F**. A deformação (ϵ_T) na fratura corresponde ao **alongamento total**.



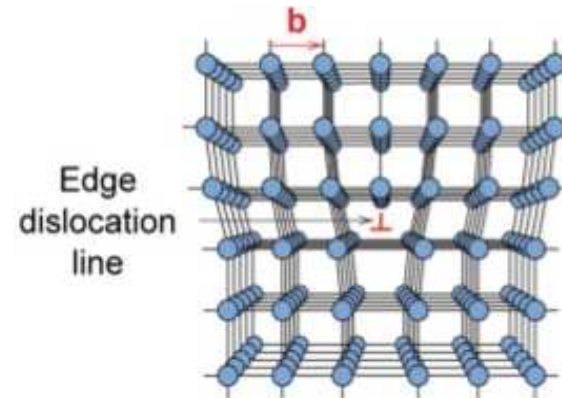
Deformação plástica

- ▶ Esse fenômeno é observado em alguns metais de natureza dúctil, como nos aços com baixo teor de carbono.
- ▶ Caracteriza-se por um grande alongamento sem acréscimo de carga
- ▶ Para a maioria dos materiais metálicos, a deformação elástica persiste apenas até deformações de $\approx 0,005$ (0,5 %). Após este ponto ocorre a deformação plástica (não-reversível).

A lei de Hooke não é válida na região plástica

Em nível atômico, a Deformação Plástica é causada pelo “deslizamento de planos atômicos”, onde ligações atômicas são quebradas pelos deslocamentos dos planos atômicos rompendo ligações e formando novas ligações.

- ▶ O processo pelo qual uma deformação plástica é produzida pelo movimento de uma discordância é chamado de **ESCORREGAMENTO**.
- ▶ O plano cristalográfico ao longo do qual a linha de discordância se movimenta é conhecido como **PLANO DE ESCORREGAMENTO**.



Material deformado:

- 5 % da energia é retida na forma de energia de deformação associada a discordâncias.
 - 95 % da energia é perdida na forma de calor.
- ▶ A distorção do retículo cristalino atômico ao redor da linha de discordância é devido a presença do semi-plano adicional de átomos.

SISTEMAS DE ESCORREGAMENTO

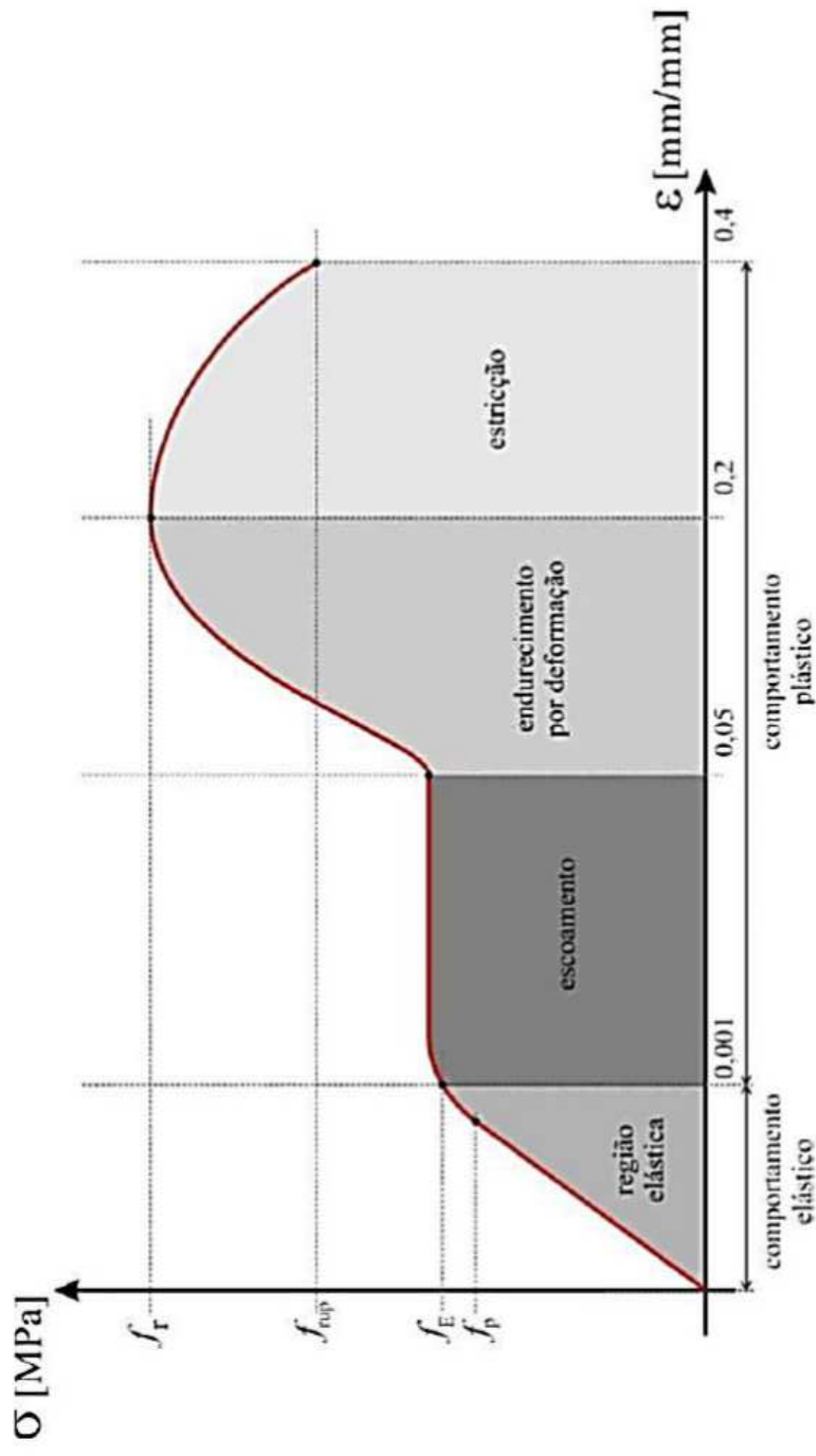
As discordâncias não se movem com a mesma facilidade sobre todos os planos cristalográficos.

▶ Planos e direções preferenciais de movimentação:

- Planos de escorregamento
- Direções de escorregamento

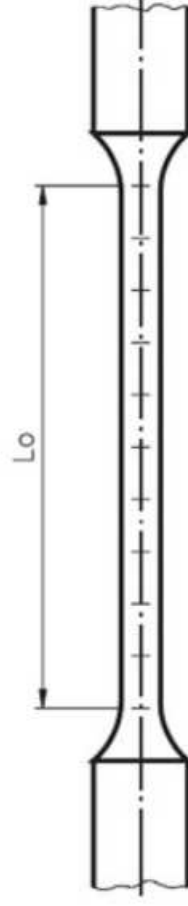
*SISTEMA DE
ESCORREGAMENTO*

Material dúctil

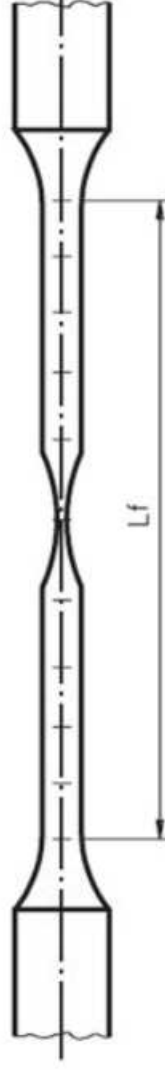


Escoamento: Caracteriza-se por um grande alongamento sem acréscimo de carga.

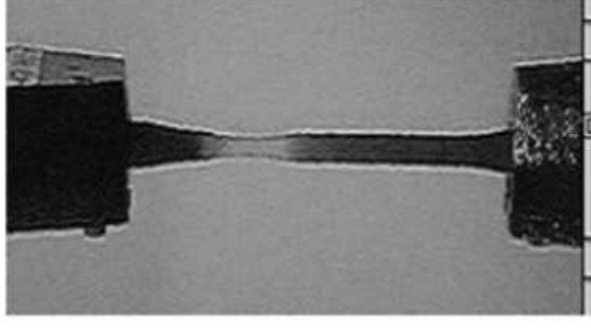
Ensaio de tração – Corpo de prova



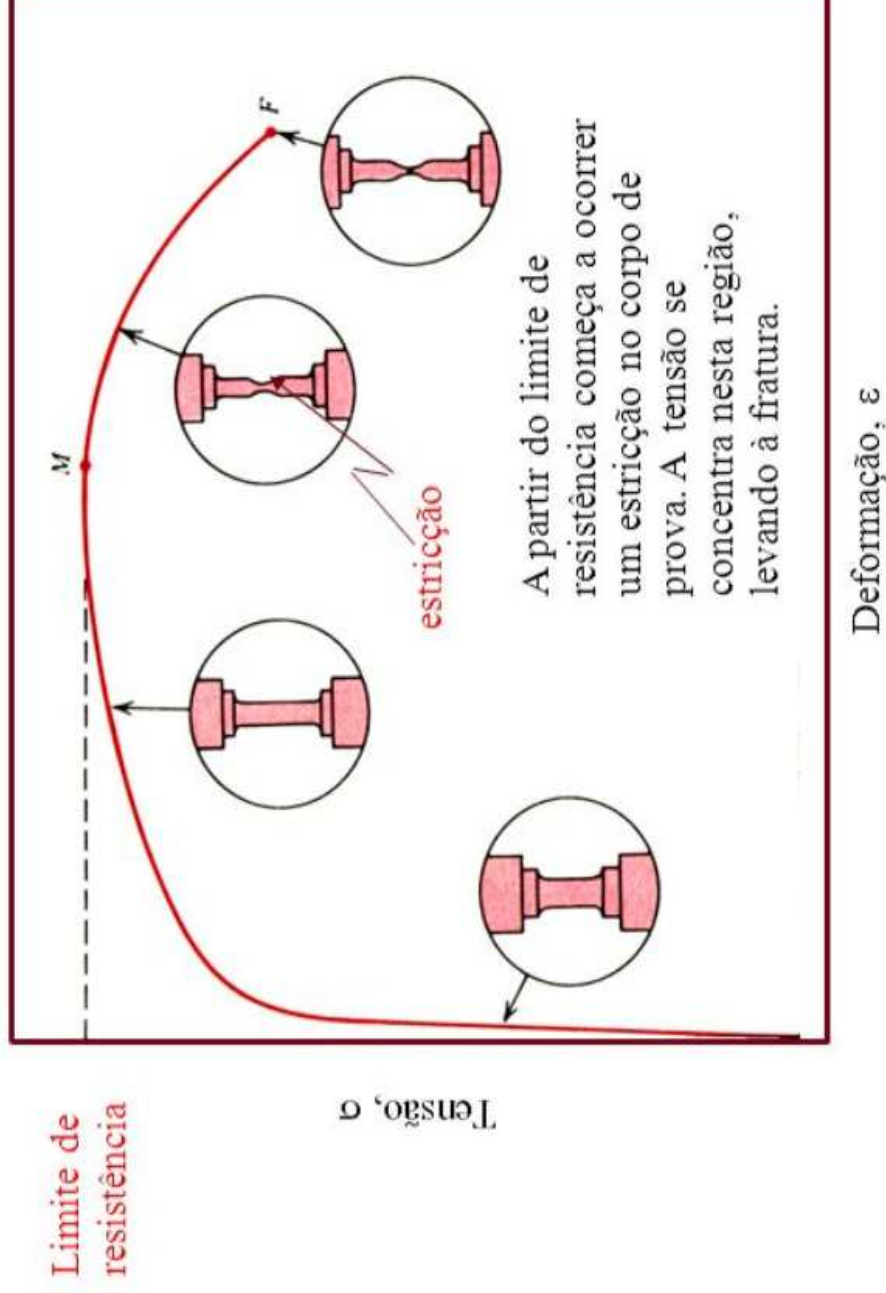
corpo de prova antes do ensaio de tração



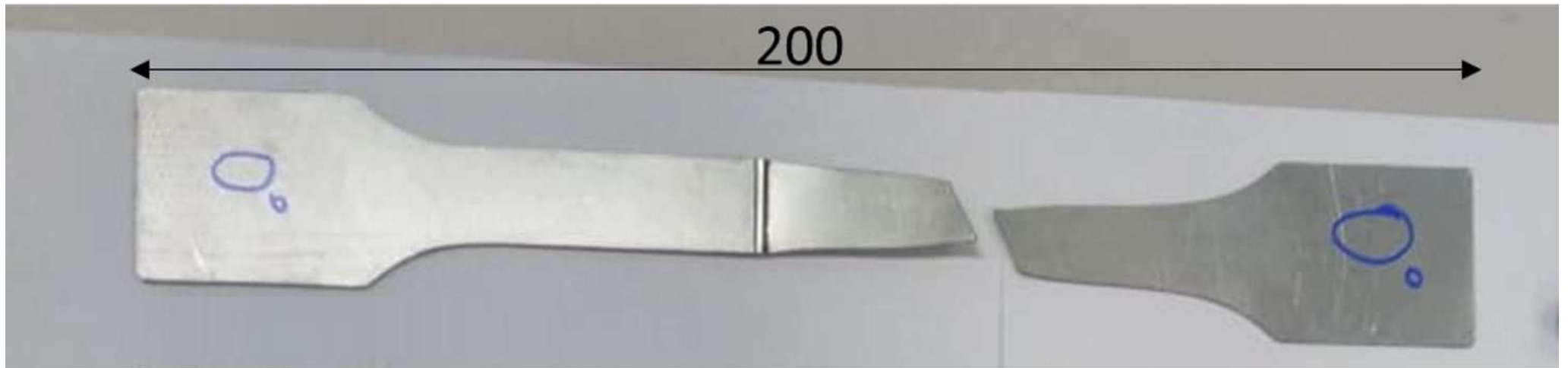
corpo de prova depois do ensaio de tração



Deformação plástica - Limite de resistência



Corpo de prova de seção retangular



Ruptura

OCORRE DE MANEIRA DÚCTIL OU FRÁGIL E DE FORMA DIFERENCIADA PARA CADA TIPO DE MATERIAL



(a)

Dúctil



(b)

Frágil

Ruptura de Materiais Metálicos

Ocorre, normalmente de maneira dúctil: → o material dá um aviso antes do rompimento

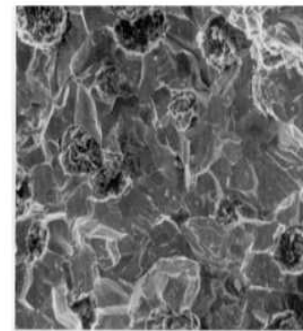
A fratura dúctil pode ocorrer das seguintes maneiras:

- transgranular (crescimento plástico-fratura em taça ou cone)
- Intergranular (presença de vazios nos contornos de grãos)
- cisalhamento
- formação de um pescoço (deformação plástica)

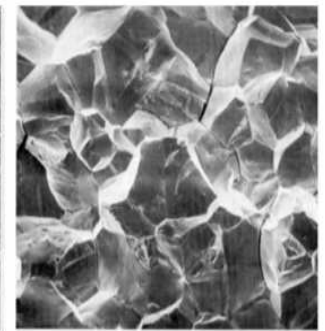
Se ocorrer de maneira frágil (geralmente em baixas tensões):

- clivagem
- intergranular

TRANSGRANULAR



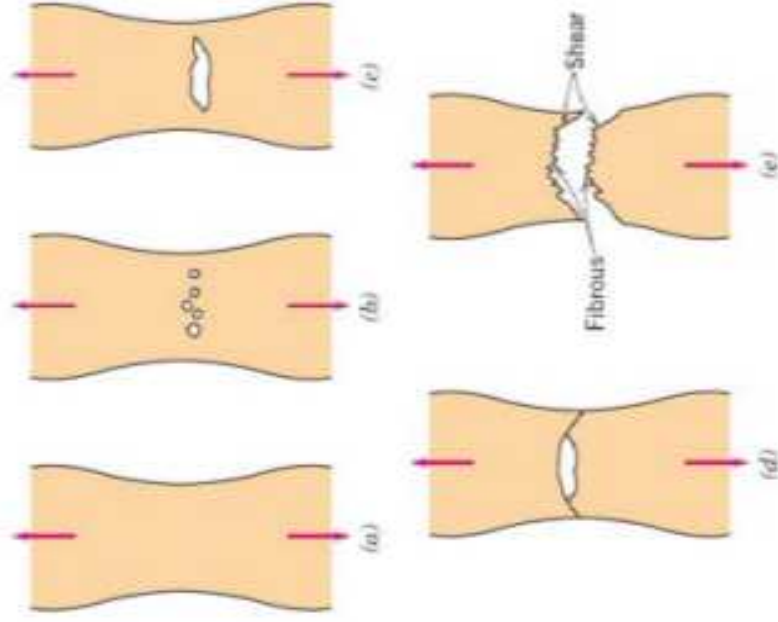
INTERGRANULAR



Ruptura

Materiais metálicos

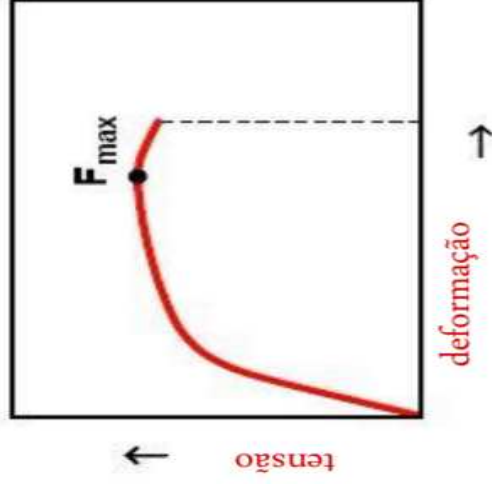
Etapas da formação de uma fratura dúctil em taça e cone.



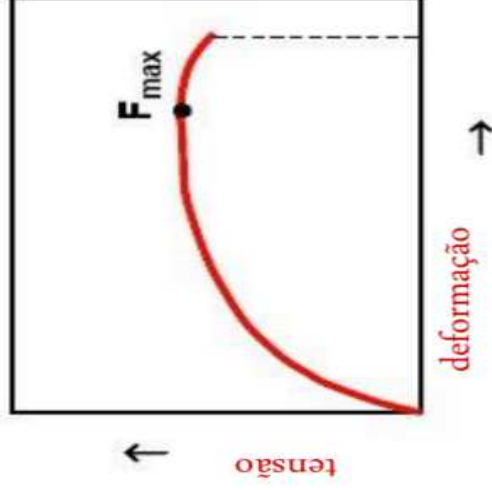
Fissuração interna na zona de estricção de um corpo policristalino de cobre de elevada pureza

Propriedades Mecânicas dos Materiais

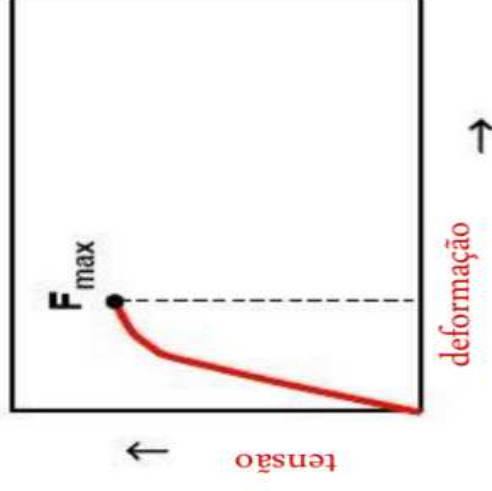
- Tipos de material e as curvas de $\sigma \times \epsilon$



• Normal



• Material dúctil
(cobre)



• Material frágil
(ferro fundido e cerâmicas)

Resiliência

Definição: Capacidade de um material absorver energia sob tração quando ele é deformado elasticamente e devolvê-la quando relaxado (*recuperar*)

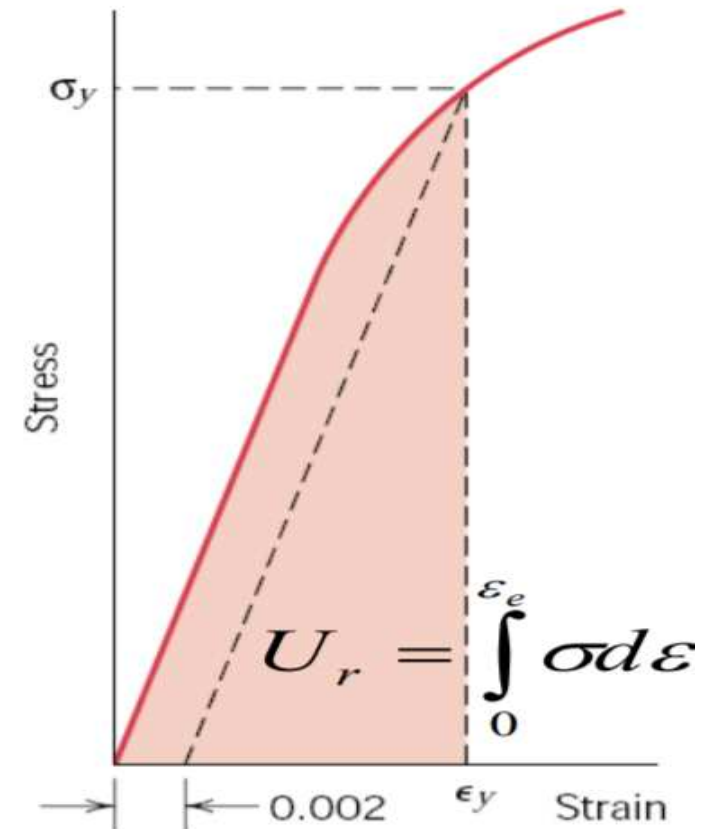
◆ Para aços carbono varia de 35 a 120 MJ/m³

◆ O módulo de resiliência é dado pela área da curva tensão-deformação até o escoamento ou através da

fórmula: $U_r = \int_0^{\epsilon_e} \sigma d\epsilon$

◆ Na região linear : $U_r = \frac{\sigma_y \epsilon_y}{2} = \frac{\sigma_y \left(\frac{\sigma_y}{E}\right)}{2} = \sigma_y^2 / 2E$

Assim, materiais de alta resiliência possuem alto limite de escoamento e baixo módulo de elasticidade. Estes materiais seriam ideais para uso em molas.



Tenacidade

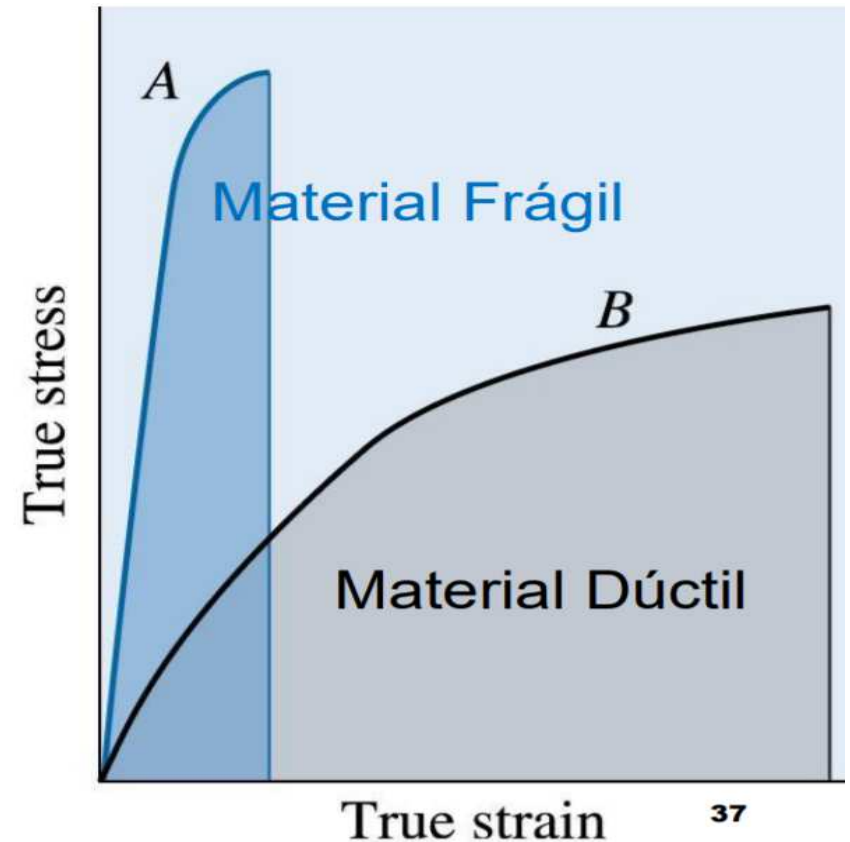
- ▶ Representa uma medida da habilidade de um material em absorver energia até a fratura;
- ▶ Pode ser determinada a partir da curva $\sigma \times \epsilon$. Ela é representada pela área sobre a curva;
- ▶ Para que um material seja tenaz, deve apresentar resistência e ductilidade. Materiais dúcteis são mais tenazes que os frágeis.

Materiais Dúcteis

$$U_t = \sigma_{esc} + \sigma_{LRT} \cdot \epsilon_{fratura} \text{ em } N \cdot m / m^3$$

Materiais Frágeis

$$U_t = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot \sigma_{LRT} \cdot \epsilon_{fratura} \text{ em } N \cdot m / m^3$$



Ductilidade

Definição: é uma medida da extensão da deformação que ocorre até a fratura.

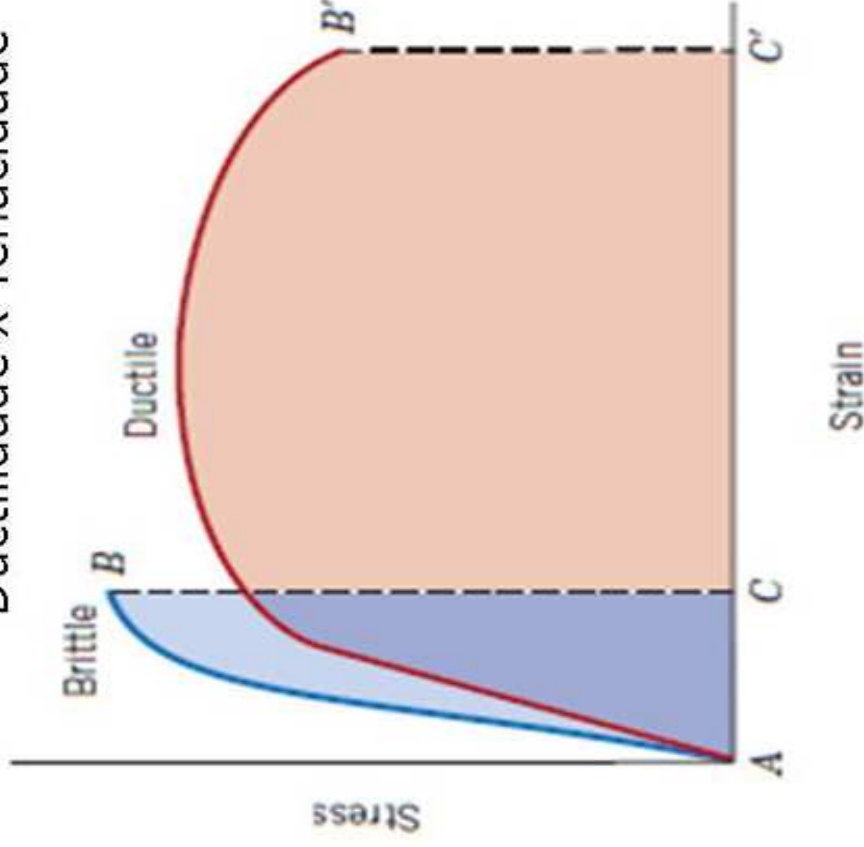
Ductilidade também pode ser definida como:

- ▶ Alongamento percentual $\%AL = 100 \cdot (L_f - L_0) / L_0$
 - onde L_f é o alongamento do corpo de prova na fratura
 - uma fração substancial da deformação se concentra na estrição, o que faz com que $\%AL$ dependa do comprimento do corpo de prova. Assim, o valor de L_0 deve ser citado.

- ▶ Redução de área percentual $\%RA = 100 \cdot (A_0 - A_f) / A_0$
 - onde, A_0 e A_f se referem as área das seções transversais original e na fratura.
 - independente de A_0 e L_0 , e em geral é diferente de $\%AL$.

Deformação Plástica

Ductilidade x Tenacidade



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

Onde:

%AL= Alongamento percentual

l_f= Comprimento na fratura

l₀= Comprimento original

$$\%RA = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \times 100$$

Onde:

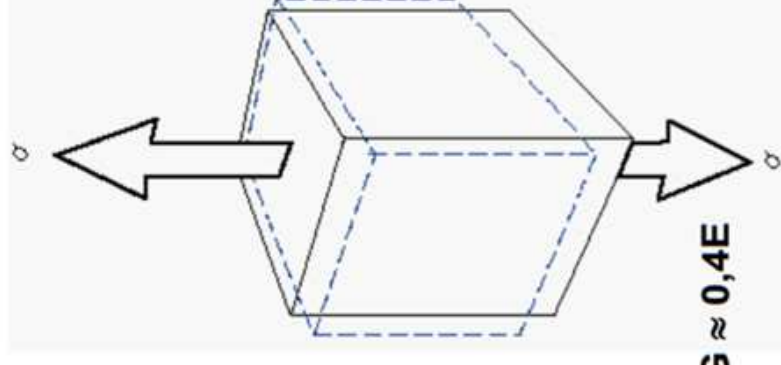
%RA= Redução de área percentual

A_f = Área final

A₀ = Área original

Coeficiente de Poisson

- Quando ocorre alongamento ao longo de uma direção, ocorre contração no plano perpendicular.
- A Relação entre as deformações é dada pelo **coeficiente de Poisson** ν .
 - $\nu = -\epsilon_x / \epsilon_z = -\epsilon_y / \epsilon_z$
 - o sinal negativo apenas indica que uma extensão gera uma contração e vice-versa
 - Os valores de ν para diversos metais estão entre 0,25 e 0,35 (max 0,50)



$$E = 2G(1+\nu) \quad \text{Para a maioria dos metais } G \approx 0,4E$$

O coeficiente de Poisson (materiais isotropicos) pode ser usado para estabelecer uma relação entre o módulo de elasticidade e o módulo de cisalhamento de um material.

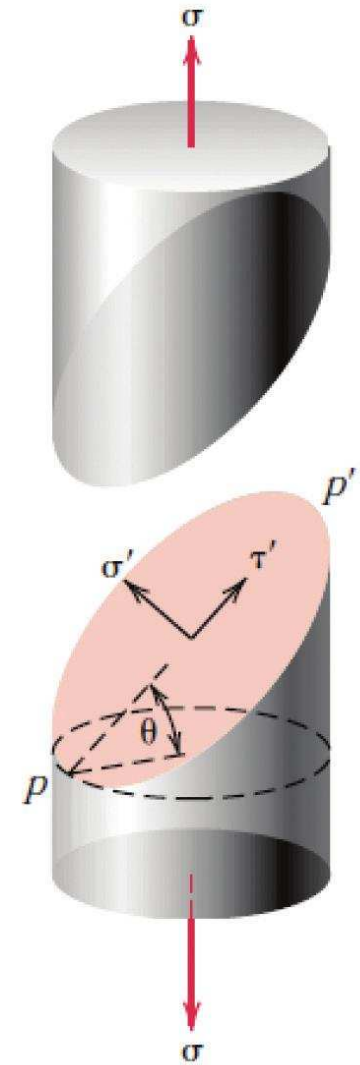
Propriedades mecânicas de sólidos metálicos:

- **Discordância e resistência**

Deformação Plástica

Como a maioria dos metais são menos resistentes ao cisalhamento que a tração e compressão e como estes dois últimos ensaios podem ser decompostos em componentes de cisalhamento, pode-se dizer que os metais se deformam pelo cisalhamento plástico ou pelo escorregamento de um plano cristalino em relação ao outro.

O escorregamento de planos envolve o movimento de discordâncias.



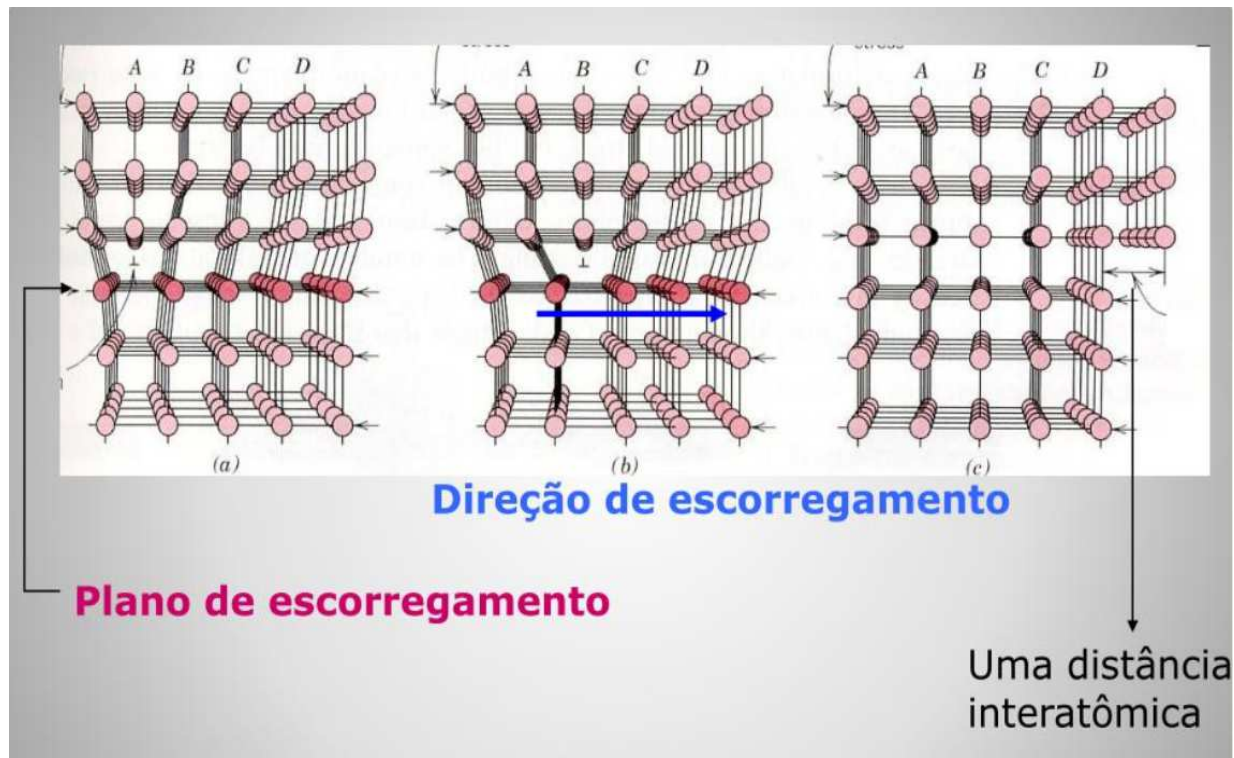
Discordâncias e Deformação Plástica

- ▶ A deformação plástica é o resultado do movimento de átomos devido à tensão aplicada. Durante este processo ligações são quebradas e outras são refeitas.
- ▶ Nos sólidos cristalinos a deformação plástica geralmente envolve o escorregamento de planos atômicos e o movimento de discordâncias. Então, a formação e o movimento das discordâncias tem papel fundamental para o aumento da resistência mecânica nos materiais
- ▶ A resistência mecânica pode ser aumentada restringindo-se o movimento das discordâncias.

Movimento de discordâncias

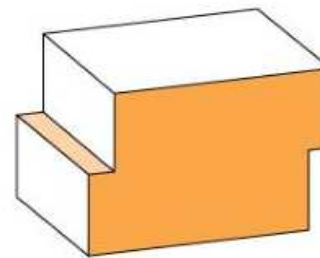
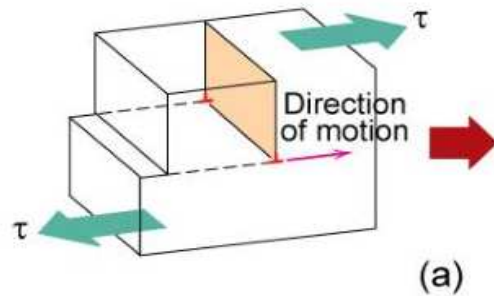
Discordâncias em cunha movem-se devido a aplicação de uma tensão de cisalhamento perpendicular a linha de discordância.

O movimento das discordâncias param na superfície do material, ou no contorno de grão ou em qualquer outro defeito.



Movimento de discordâncias em cunha e em hélice

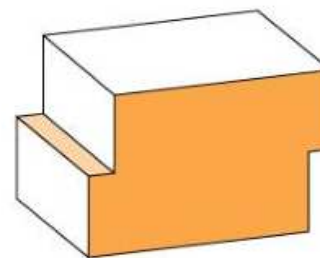
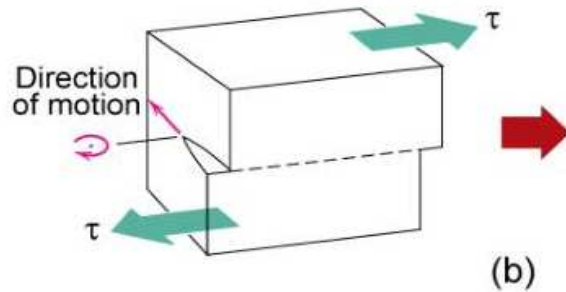
A discordância em **cunha** anda na direção de aplicação das tensões



Edge dislocation

Adapted from Fig. 7.2,
Callister 7e.

A discordância em **hélice** anda perpendicular a direção de aplicação das tensões



Screw dislocation

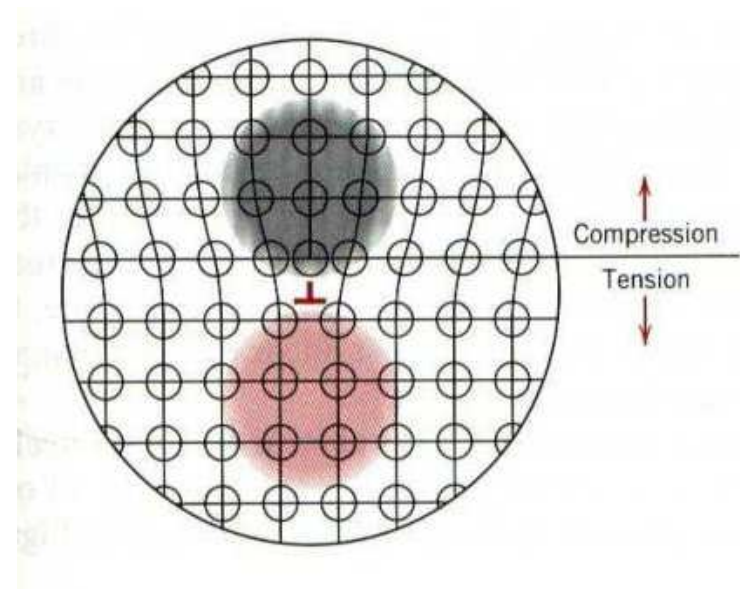
O efeito final é o mesmo

Densidades típicas de discordâncias

- ▶ Materiais solidificados lentamente : 10^3 *discordâncias/mm²*
- ▶ Materiais deformados: $10^9 - 10^{10}$ *discordâncias/mm²*
- ▶ Materiais deformados e tratados termicamente: $10^5 - 10^6$ *discordâncias/mm²*

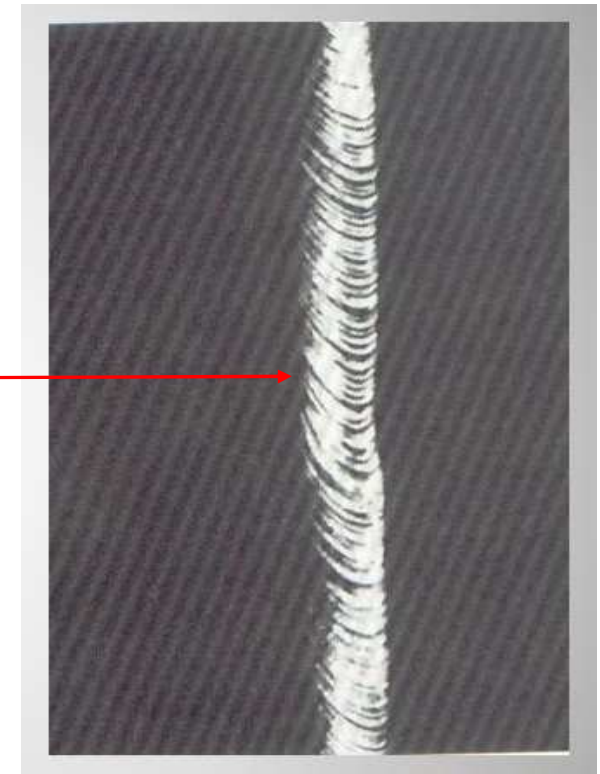
Características das Discordâncias

- ▶ A presença de discordâncias promove uma distorção na rede cristalina, assim, certas regiões sofrem tensões de compressão e outras vizinhas sofrem tensões de tração.
- ▶ Quando metais são deformados plasticamente, cerca de 5 % da energia é retida internamente e o restante é dissipado na forma de calor.
- ▶ A maior parte desta energia armazenada está associada com as tensões vinculadas com as discordâncias.



Movimento de discordâncias em Monocristais

- ▶ Na deformação plástica o número de discordâncias aumenta drasticamente.
- ▶ As discordâncias movem-se mais facilmente nos planos de maior densidade atômica (chamados de planos de escorregamentos). Neste caso, a energia necessária para mover uma discordância é mínima.
- ▶ Então, o número de planos nos quais pode ocorrer o escorregamento depende da estrutura cristalina.



planos de escorregamento

Deformação plástica em materiais policristalinos

A direção de escorregamento varia de grão para grão

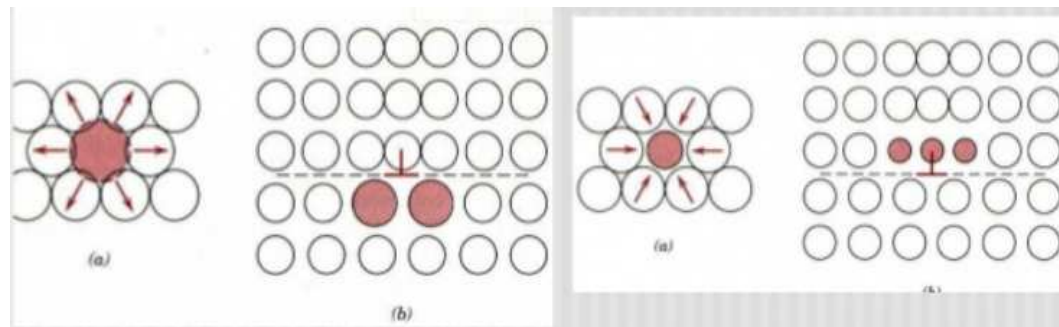


Mecanismos de aumento de resistência dos metais

- ▶ Aumento da resistência por adição de elemento de liga (formação de solução sólida ou precipitação de fases).
- ▶ Aumento da resistência por encruamento.
- ▶ Aumento da resistência por redução do tamanho de grãos.
- ▶ Aumento da resistência por tratamento térmico (transformação de fases).

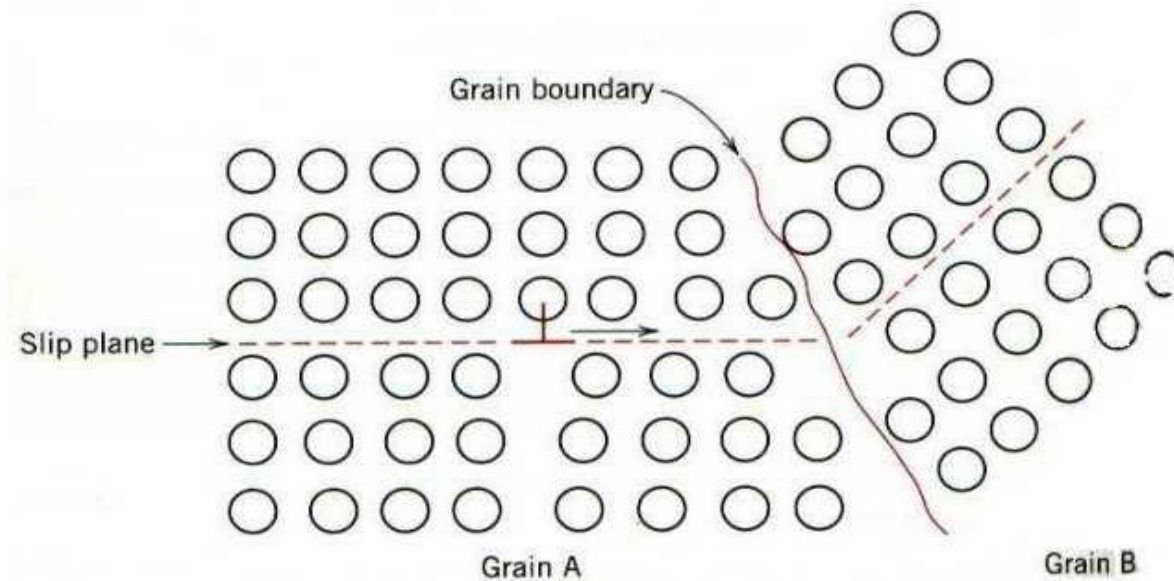
Aumento da resistência por adição de elementos de liga

- ▶ Os átomos de soluto podem causar tanto tração (átomos menores) como compressão (átomos maiores) na rede cristalina.
- ▶ Os átomos de soluto se alojam na rede próximo as discordâncias de forma a minimizar a energia total do sistema.
- ▶ Átomos estranhos a rede restringem o movimento de discordâncias, ou seja, deve-se fornecer energia adicional para que o escorregamento dos planos atômicos continue.
- ▶ Por isso as soluções sólidas são mais resistentes que o metal puro.



Aumento da resistência por diminuição do tamanho de grão

- ▶ O contorno de grão interfere no movimento das discordâncias.
- ▶ Devido as diferentes orientações cristalinas presentes, resultantes do grande número de grãos, as direções de escorregamento das discordâncias variam de grão para grão.

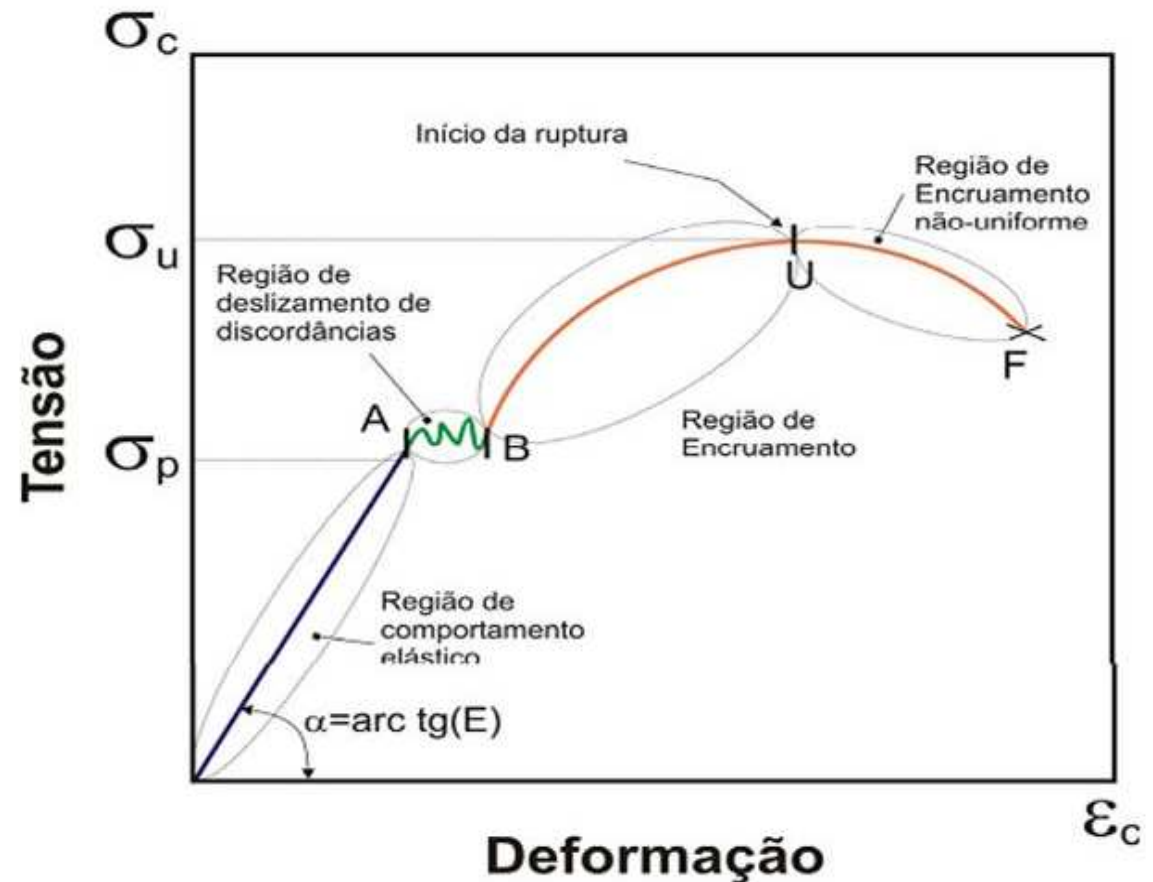


Aumento da resistência por diminuição do tamanho de grão

- ▶ O contorno de grão funciona como uma barreira para a continuação do movimento das discordâncias devido as diferentes orientações cristalinas presentes e também devido as inúmeras descontinuidades presentes no contorno de grão.

Escoamento e discordância

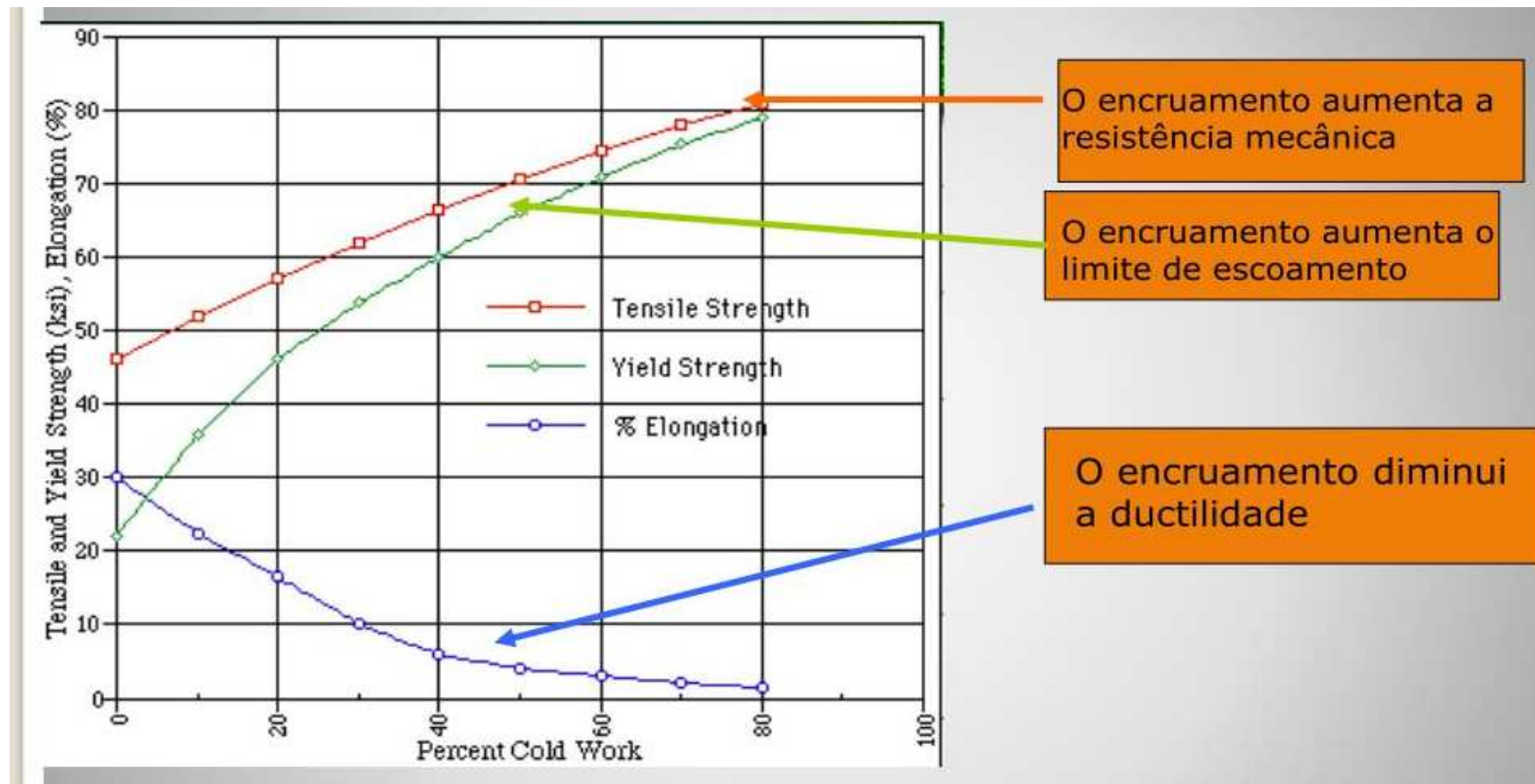
- ▶ Limite de escoamento é a tensão onde o número de discordâncias se movendo no retículo cristalino é tal que a deformação plástica passa a apresentar, valores macroscópicos mensuráveis.
- ▶ A partir da região de escoamento, o material entra no campo de deformações permanentes, onde ocorre endurecimento por trabalho a frio (**encruamento**). Que resulta da interação entre discordâncias e contornos de grãos. Precisa de energia maior para que ocorra movimentação.



Encruamento ou endurecimento pela deformação a frio

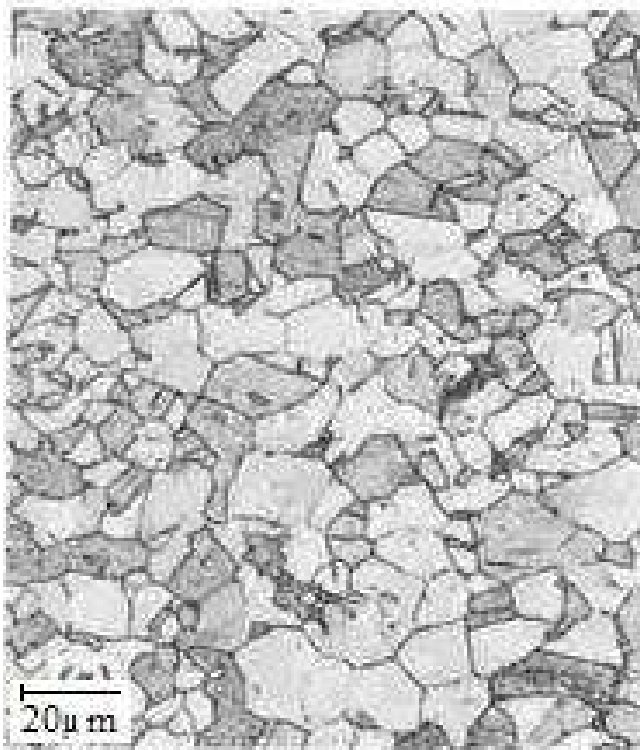
- ▶ É o fenômeno no qual um material endurece devido a deformação plástica (realizado pelo trabalho a frio).
- ▶ Esse endurecimento dá-se devido ao aumento de discordâncias e imperfeições promovidas pela deformação, que impedem o escorregamento dos planos atômicos.
- ▶ A medida que se aumenta o encruamento maior é a força necessária para produzir uma maior deformação.
- ▶ O encruamento pode ser removido por tratamento térmico (recristalização).

Variação das propriedades mecânicas em função do encruamento

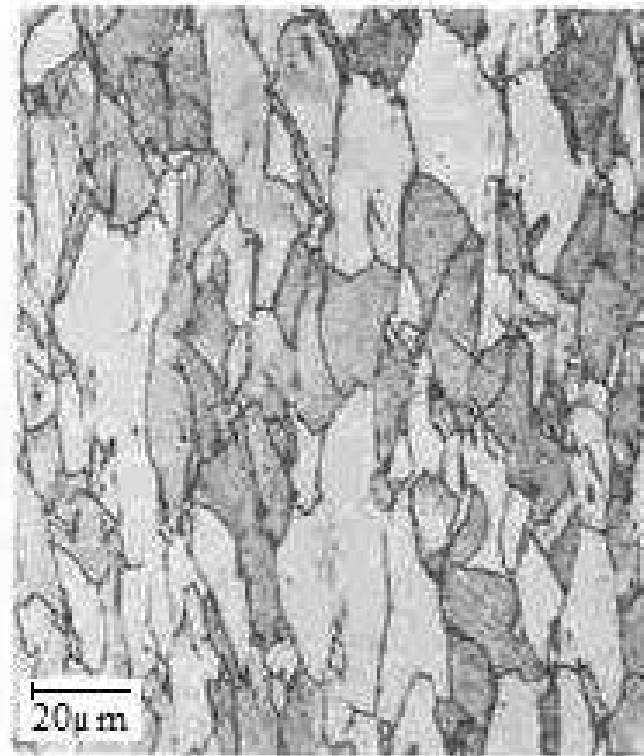


Encruamento e microestrutura

- Antes da deformação



- Depois da deformação



Recristalização

(Processo de recozimento para recristalização)

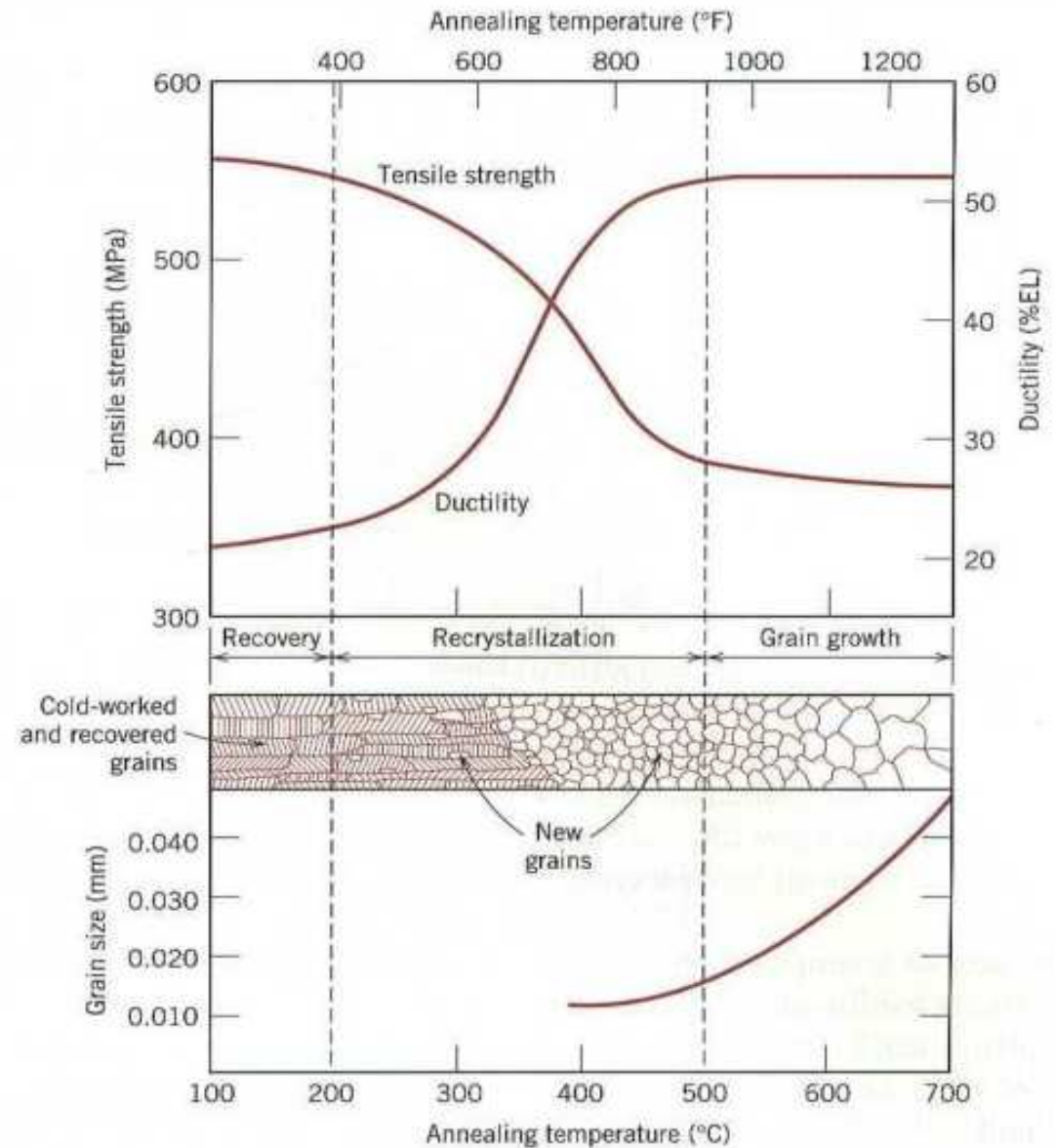
Se os metais deformados plasticamente forem submetidos a um aquecimento controlado, este aquecimento fará com que haja um rearranjo dos cristais deformados plasticamente, diminuindo a dureza dos mesmos.

Mecanismo que ocorre no aquecimento de um material encruado

Estágios:

- ▶ Recuperação
- ▶ Recristalização
- ▶ Crescimento de grãos

Mecanismo que ocorre no aquecimento de um material encruado (ex.: latão)



Recuperação

- ▶ Há um alívio das tensões internas armazenadas durante a deformação devido ao movimento das discordâncias resultantes da difusão atômica.
- ▶ Nesta etapa há uma redução do número de discordâncias e um rearranjo das mesmas.
- ▶ Propriedades físicas como condutividade térmica e elétrica voltam ao seu estado original (correspondente ao material não-deformado).

Recristalização

- ▶ Depois da recuperação, os grãos ainda estão tensionados.
- ▶ Na recristalização, os grãos se tornam novamente equiaxiais (dimensões iguais em todas as direções).
- ▶ O número de discordâncias reduz ainda mais.
- ▶ As propriedades mecânicas voltam ao seu estado original.

Forma-se um novo conjunto de grãos que são equiaxiais.

Crescimento de grãos

- ▶ Depois da recristalização, se o material permanecer por mais tempo em temperaturas elevadas, o grão continuará crescendo.
- ▶ Em geral, quanto maior o tamanho de grão mais mole é o material e menor é sua resistência.

Temperaturas de recristalização

- ▶ A temperatura de recristalização é dependente do tempo.
- ▶ A temperatura de recristalização está entre $\frac{1}{3}$ e $\frac{1}{2}$ da temperatura de fusão.

Temperaturas de recristalização

Chumbo	- 4 °C
Estanho	- 4 °C
Zinco	10 °C
Alumínio de alta pureza	80 °C
Cobre de alta pureza	120 °C
Latão 60-40	475 °C
Níquel	370 °C
Ferro	450 °C
Tungstênio	1200 °C

Deformação a quente:

▶ quando a deformação ou trabalho mecânico é realizado acima da temperatura de recristalização do material.

Deformação a frio:

▶ quando a deformação ou trabalho mecânico é realizado abaixo da temperatura de recristalização do material.

Deformação a quente

▶ *Vantagens:*

- Permite o emprego de menor esforço mecânico para a mesma deformação.
- Promove o refinamento da estrutura do material, melhorando a tenacidade.
- Elimina porosidades.
- Deforma profundamente devido a recristalização

▶ *Desvantagens:*

- Exige ferramental de boa resistência ao calor, o que implica em custo.
- O material sofre maior oxidação, formando casca de óxidos.
- Não permite a obtenção de dimensões dentro de alta precisão.

Deformação a frio

- Aumenta a dureza e a resistência dos materiais, mas a ductilidade diminui.
- Permite a obtenção de dimensões dentro de tolerâncias estreitas.
- Produz melhor acabamento superficial.

