

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

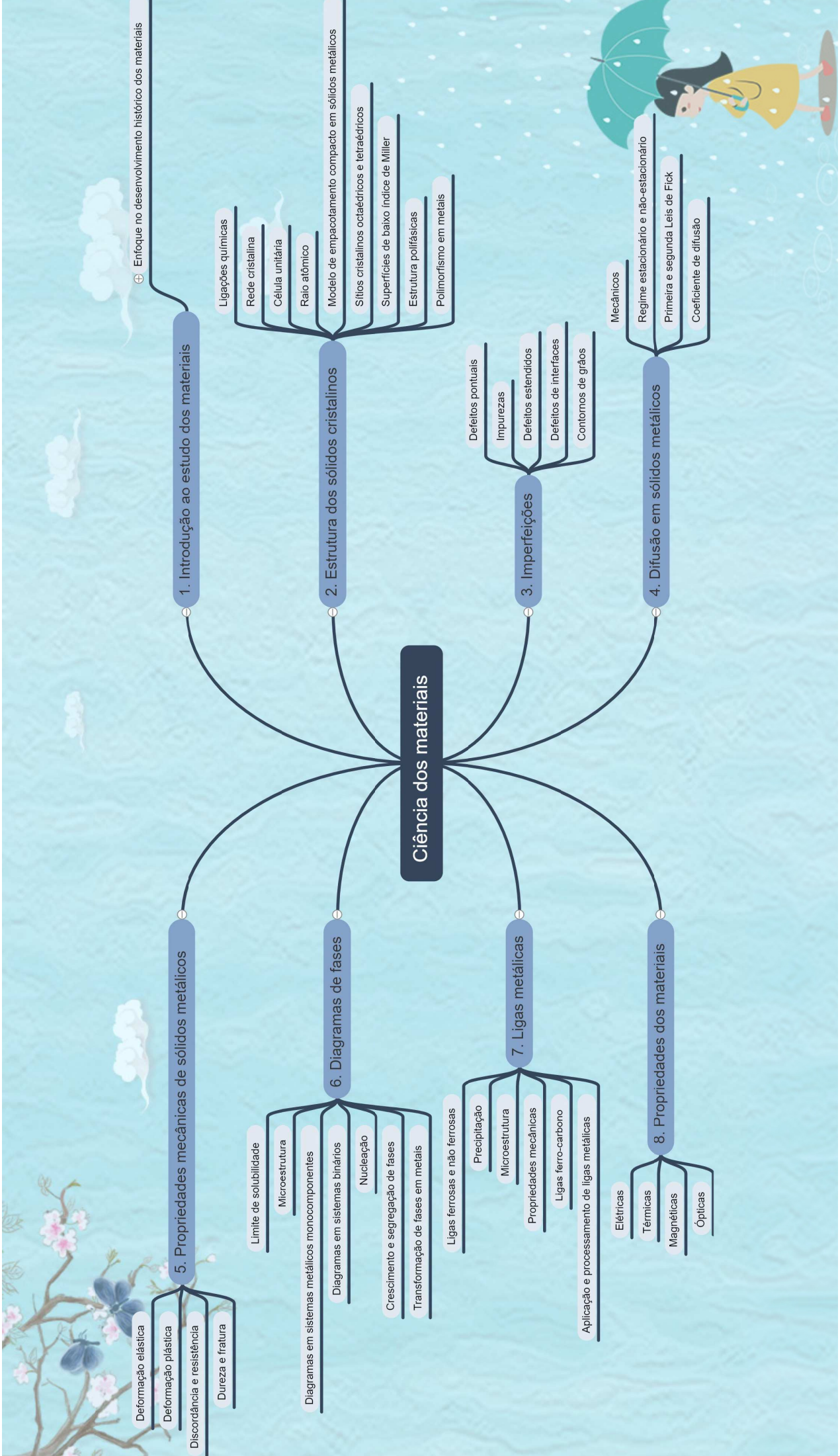
Ligas metálicas

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];
```





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
- Sítios 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 elástica**

Em geral, materiais são submetidos a forças ou cargas quando em uso.

Exemplos: eixo de aço de um carro
asas de liga de alumínio de um avião

- ◆ Então é preciso conhecer as propriedades mecânicas dos materiais para projetar seu uso sem sofrer o risco de ocorrer deformação excessiva ou fratura.
- ◆ Isto envolve o entendimento das relações entre a microestrutura dos materiais e suas propriedades mecânicas.
- ◆ Assim, é preciso submeter os materiais a testes mecânicos pelo emprego de técnicas de ensaio padronizadas.



International
Organization for
Standardization

Propriedades Mecânicas dos Materiais

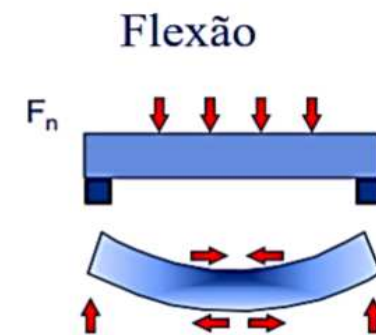
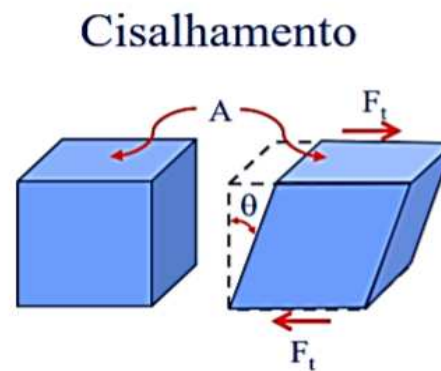
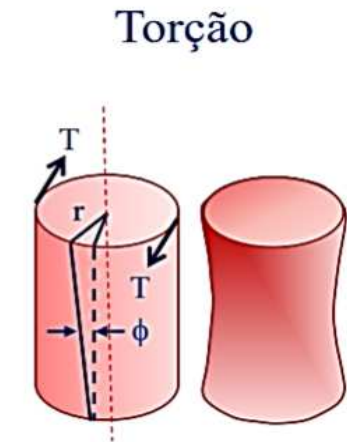
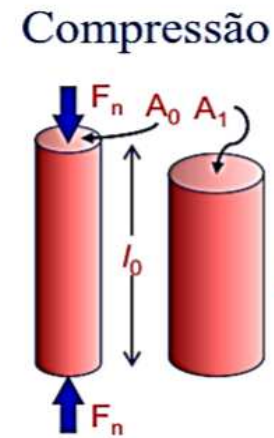
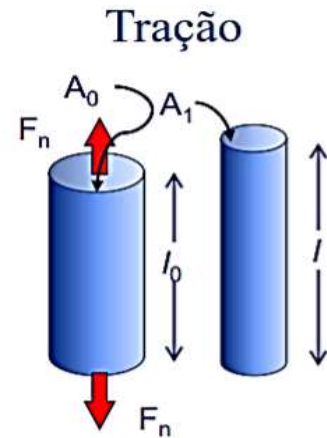
Principais propriedades mecânicas:

- ◆ Resistência à tração
- ◆ Elasticidade
- ◆ Ductilidade
- ◆ Fluência
- ◆ Fadiga
- ◆ Dureza
- ◆ Tenacidade

Cada uma dessas propriedades está associada à habilidade do material de resistir às forças mecânicas e/ou de transmiti-las

Tipos de tensões que uma estrutura está sujeita

- ◆ Tração
- ◆ Compressão
- ◆ Torção
- ◆ Cisalhamento
- ◆ Flexão



Determinações de propriedades mecânicas:

- ◆ São feitas através de ensaios mecânicos
- ◆ Utilizam-se corpos de provas padronizados
- ◆ Usam-se normas técnicas para as medidas e confecção do corpo de prova para garantir resultados comparáveis (exemplo: NBR ISSO 6152).



International
Organization for
Standardization

Testes para determinar as propriedades mecânicas dos metais

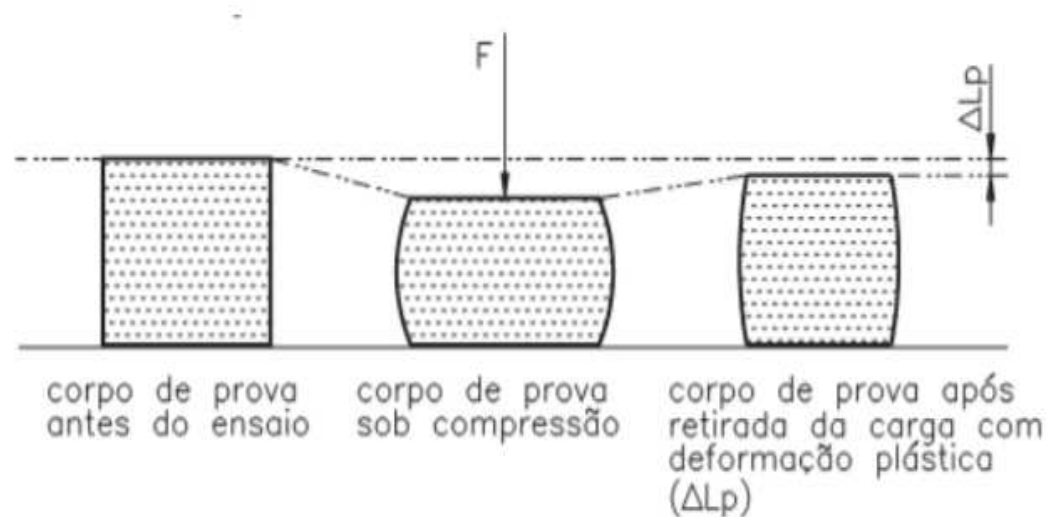
- ◆ Resistência à tração
- ◆ Resistência à compressão
- ◆ Resistência à torção
- ◆ Resistência ao impacto
- ◆ Resistência ao desgaste
- ◆ Resistência à fadiga
- ◆ Dureza

Deformação

Quando uma força é aplicada a um corpo de prova, a sua forma e tamanho mudam. Essas mudanças são denominadas de deformação

A deformação pode ser:

- ◆ Elástica
- ◆ Plástica



Deformação elástica e plástica

Deformação elástica:

- ◆ Precede a deformação plástica
- ◆ É reversível
- ◆ Desaparece quando a tensão é removida.

Deformação plástica:

- ◆ Provocada por tensões que ultrapassam o limite de elasticidade.
- ◆ É irreversível
- ◆ Deslocamento permanente dos átomos com respeito as suas posições de equilíbrio.
- ◆ A deformação não desaparece quando a tensão é removida.

Entendimento em escala atômica

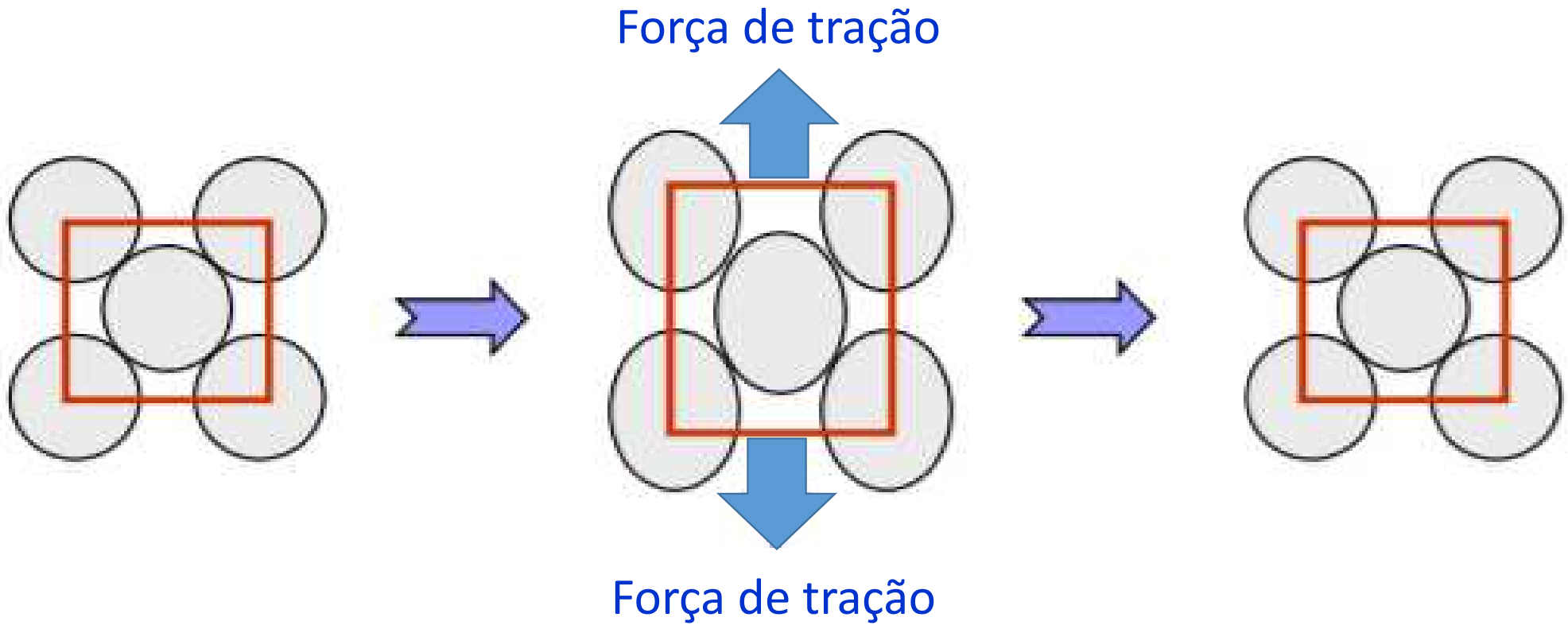
Deformação elástica

É manifestada por pequenas alterações no espaçamento inter-atômico e na extensão de ligações inter-atômicas.

Deformação plástica

Leva a quebra de ligações entre átomos vizinhos originais e em seguida ocorre o estabelecimento de novas ligações com novos átomos vizinhos, uma vez que um grande número de átomos se movem, uns em relação aos outros. Com a remoção da tensão, eles não retornam mais as suas posições originais e novos grãos serão formados.

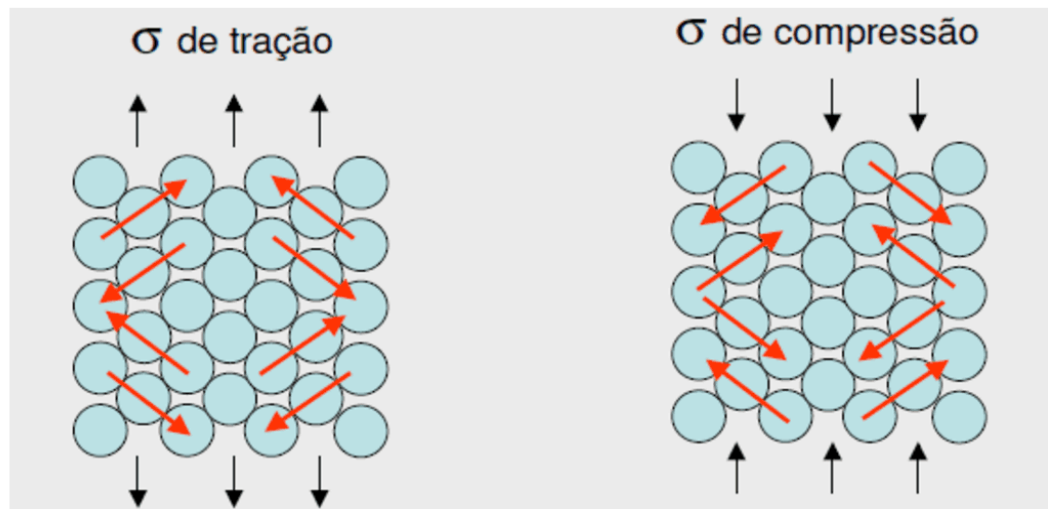
Deformação elástica



Deformação plástica

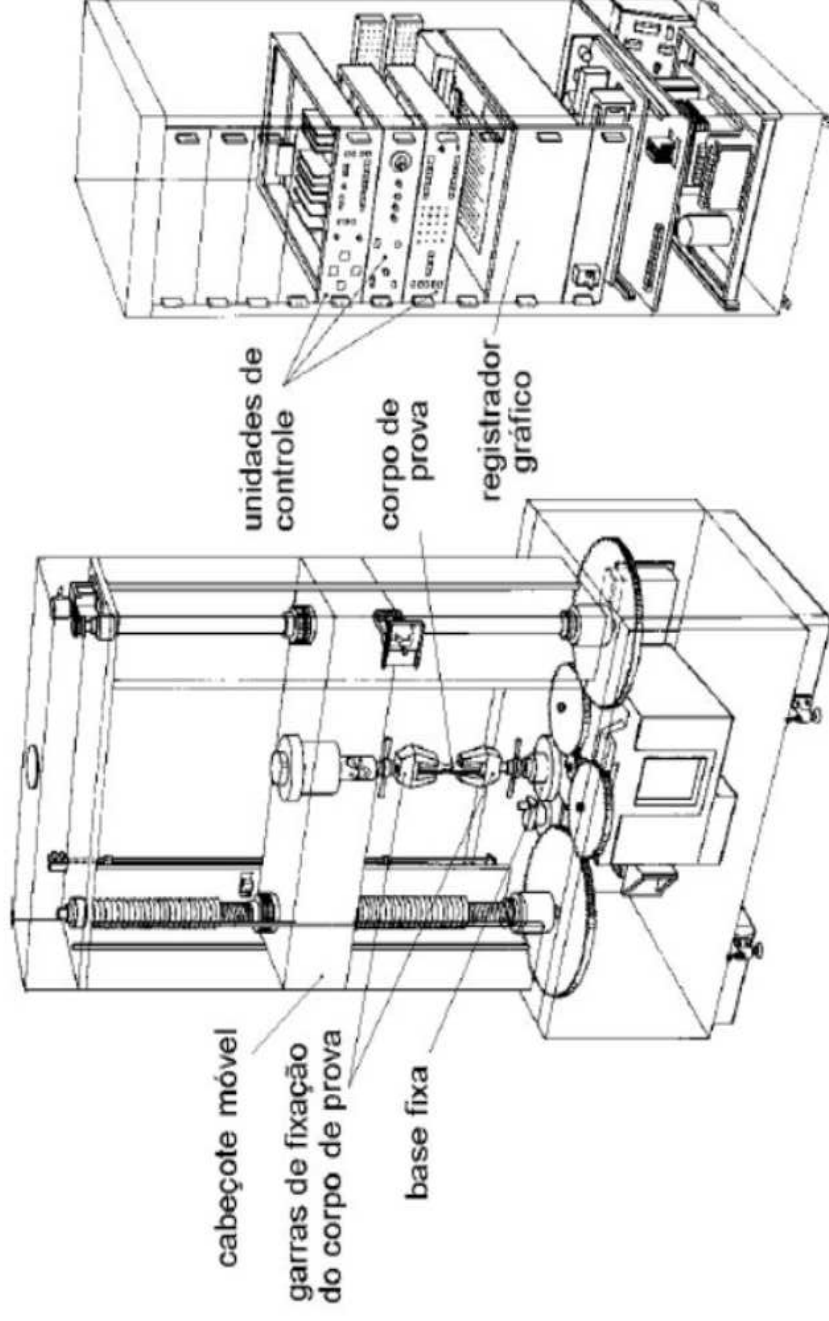
Quando a tensão aplicada supera a tensão de escoamento dos átomos, iniciam-se as rupturas das ligações químicas bem como os movimentos atômicos no interior dos materiais.

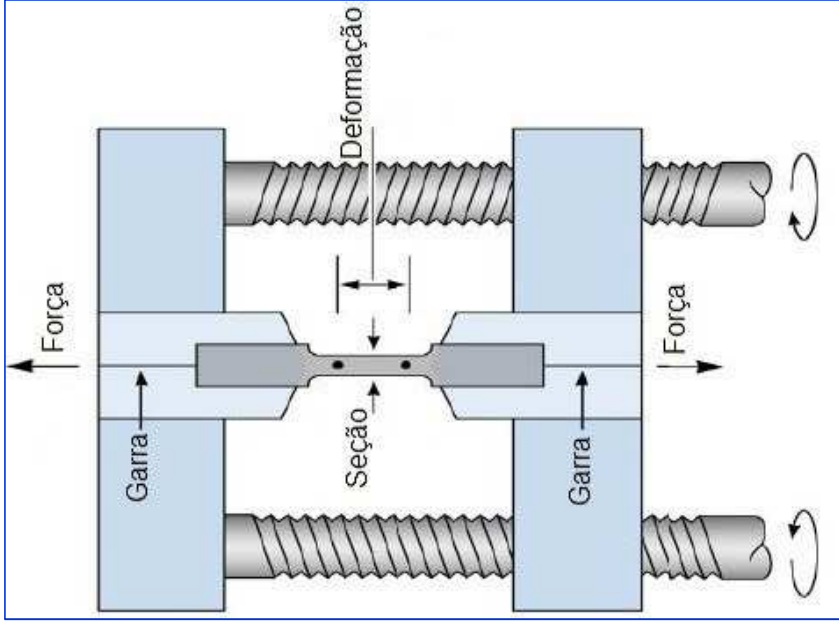
Independente se as tensões aplicadas sejam de tração ou compressão, as tensões responsáveis pela deformação plástica são de cisalhamento.



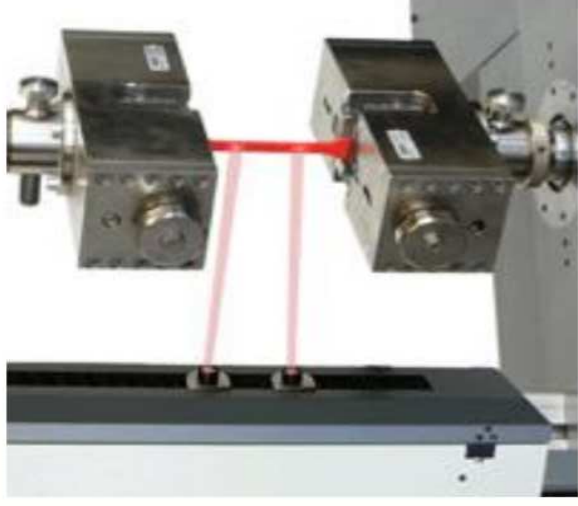
Ensaaios de tração

Equipamento – Ensaio de tração



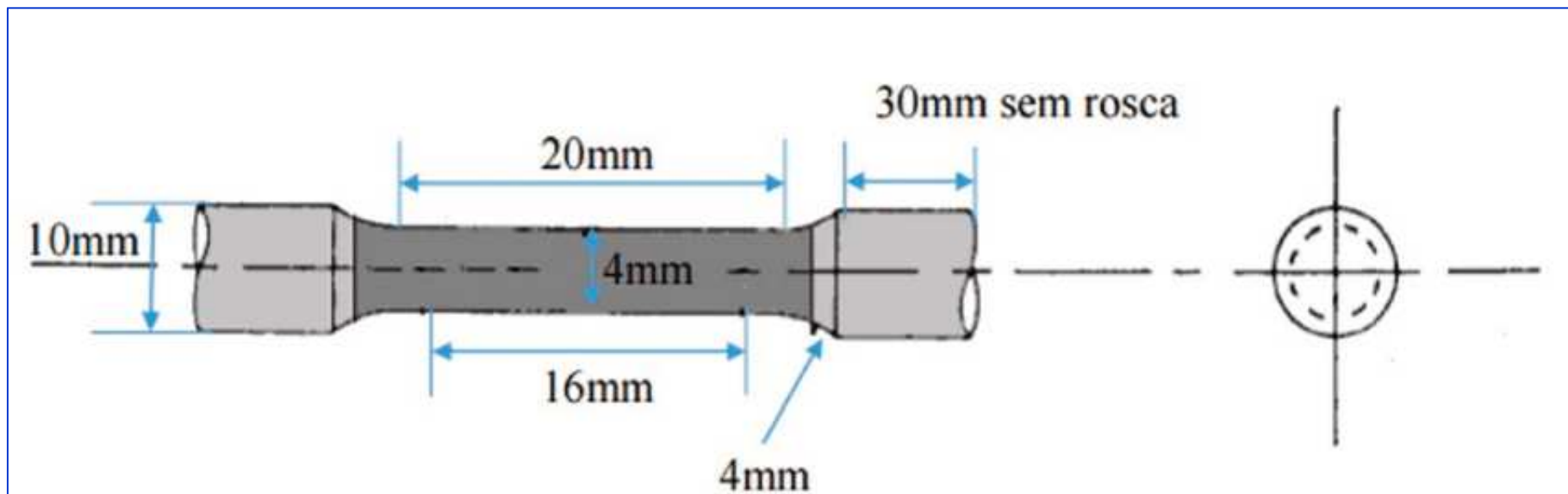


Máquina de Ensaio com
Extensômetro Digital

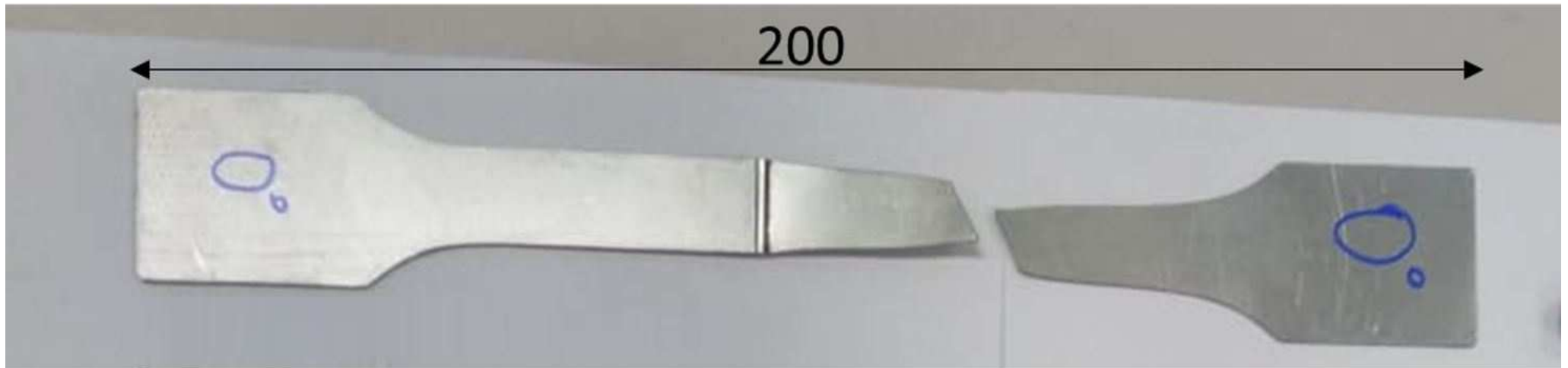


Máquina de Ensaio com
Extensômetro Óptico

Corpo de prova de seção circular



Corpo de prova de seção retangular



No ensaio de tração, uma amostra é deformada até sua fratura, por uma carga uniaxial de tração que cresce gradativamente ao longo do eixo de um corpo de prova. Durante o ensaio de tração, a deformação fica confinada na região central do corpo de prova.

O corpo de prova é preso por suas extremidades, nas garras de fixação do dispositivo de testes. A máquina de ensaio de tração alonga o corpo de prova, em uma taxa constante crescente, medindo precisamente os alongamentos resultantes. O resultado do ensaio é registrado como a carga ou força em função do alongamento. A *tensão* (σ) é definida por:

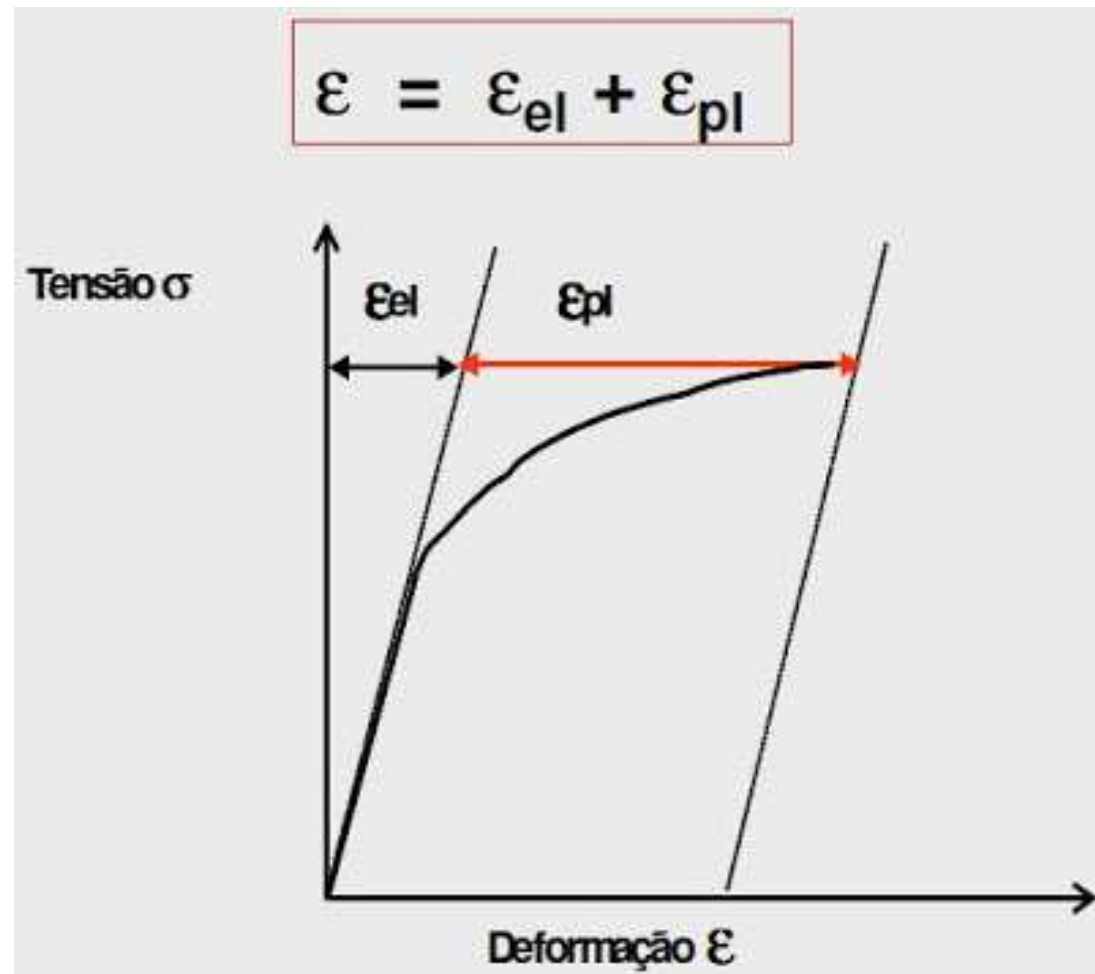
$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

onde, F é a carga instantânea aplicada e A_0 a área original da seção transversal do corpo de prova.

A *deformação* (ε) é definida como:

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

onde, l_0 é o comprimento original do corpo de prova, l_i é o seu comprimento instantâneo. $\Delta l = l_i - l_0$, representa o alongamento.



- Quando as deformações ultrapassam o limite de proporcionalidade (ponto **P**), a relação entre a tensão e a deformação deixa de ser linear (região de **DEFORMAÇÃO ELÁSTICA**), produzindo-se deformação permanente → a chamada **DEFORMAÇÃO PLÁSTICA**.
- Na prática, muitas vezes, é difícil definir a posição do ponto **P** com precisão. Como consequência, geralmente se define uma **TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO (Yield Strength)** (σ_y) como sendo a tensão necessária para se produzir uma pequena deformação plástica.
- Para os metais, assume-se que essa pequena deformação plástica é igual a $\epsilon = 0,002 = 0,2\%$.

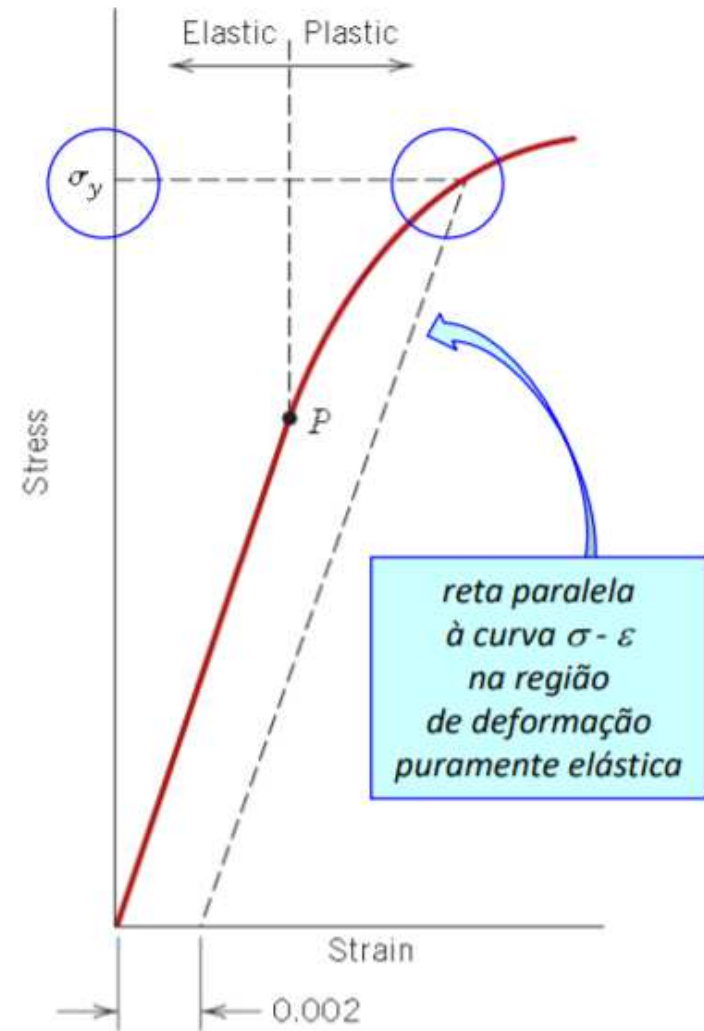
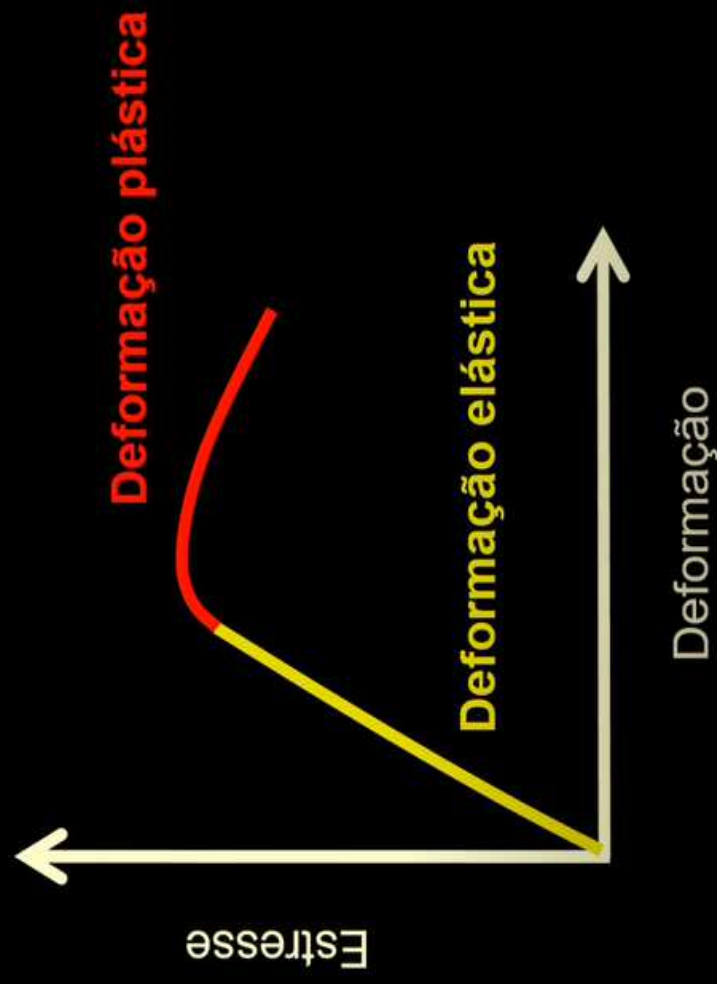
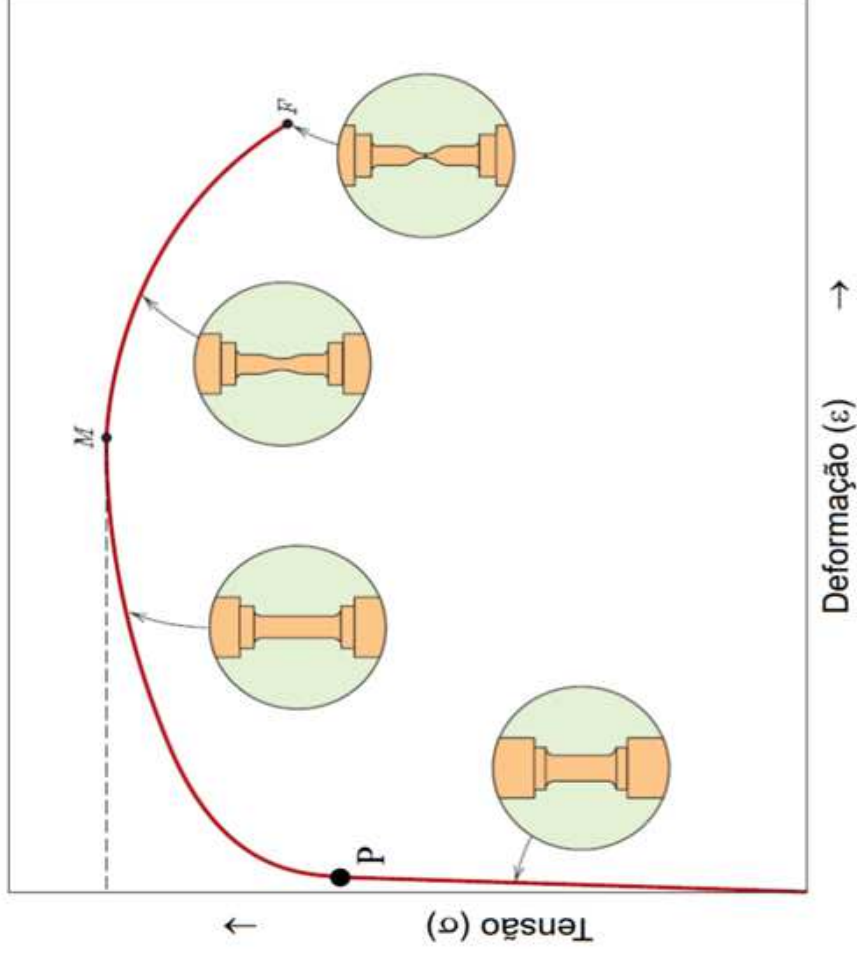


Gráfico Tensão-Deformação



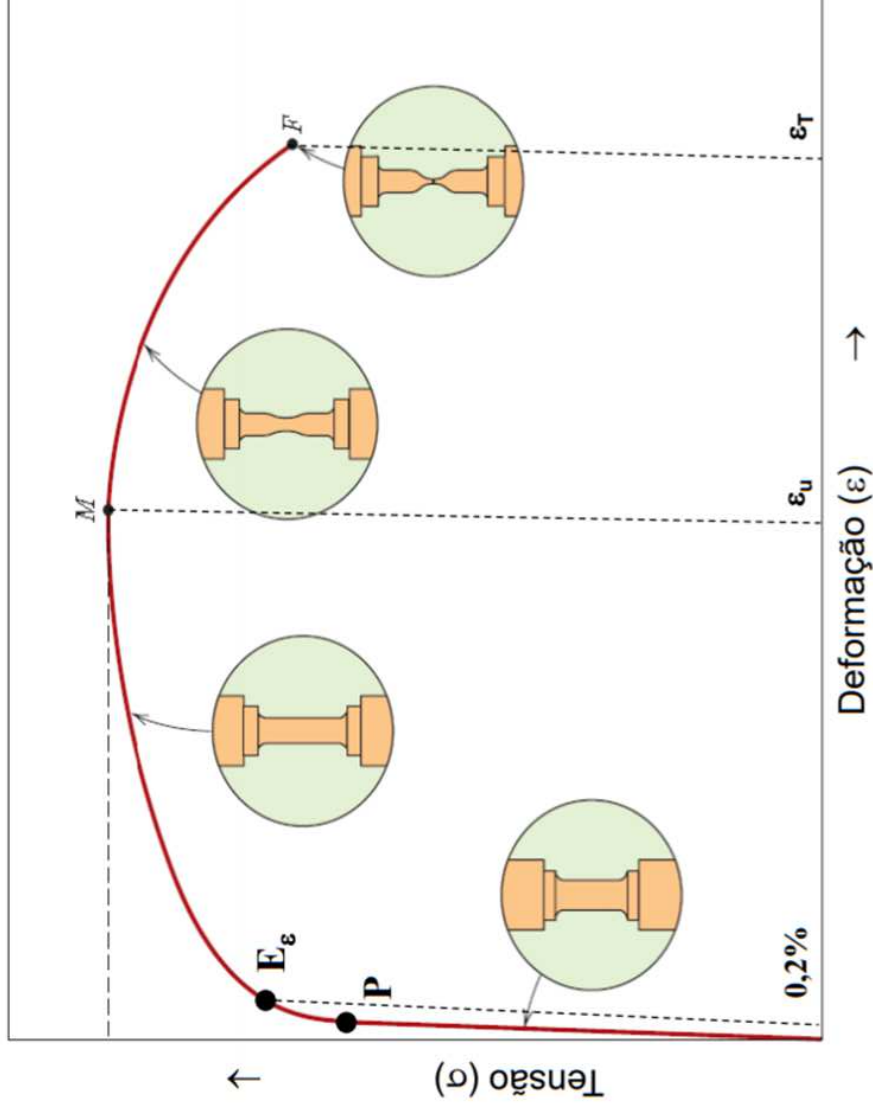
Curva Tensão - Deformação



$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_f - L_0}{L_0}$$

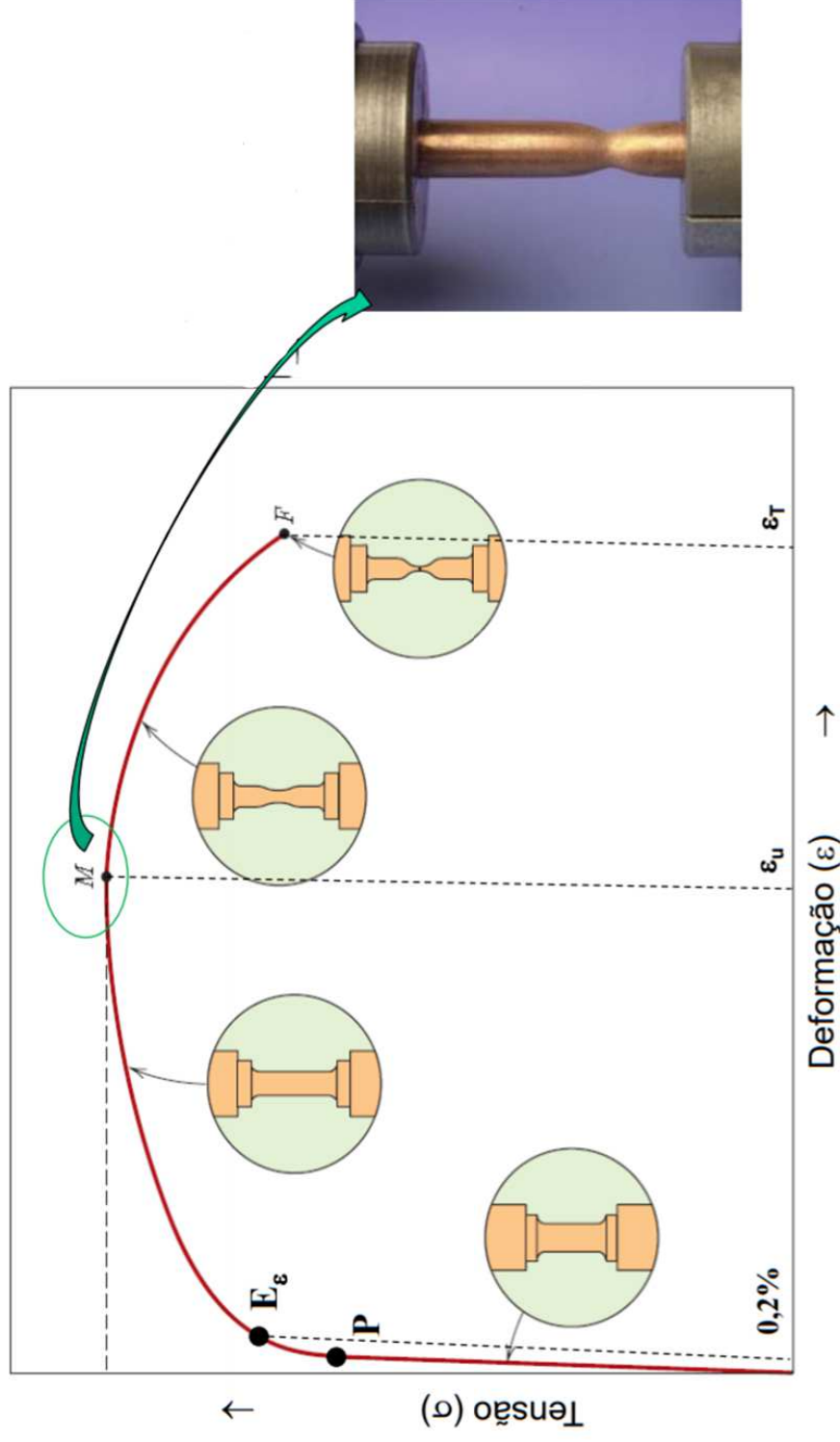
- O ponto **P** corresponde ao **LIMITE DE PROPORCIONALIDADE (LP)**: a deformação a partir do ponto **P** é **plástica**, e antes do ponto **P** é **elástica**.

Curva Tensão - Deformação

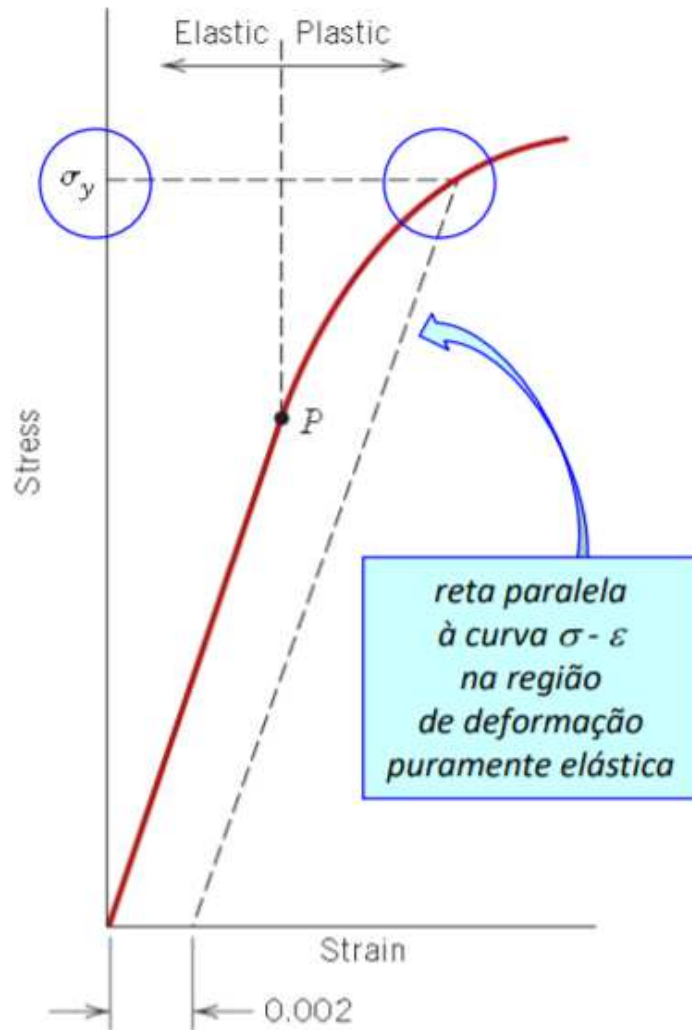


- O ponto E_{ϵ} corresponde ao **LIMITE DE ESCOAMENTO (LE)**.
- O ponto M corresponde ao **LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (LRT)**, que é a tensão máxima atingida durante o ensaio (*Tensile Strength*).

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**.



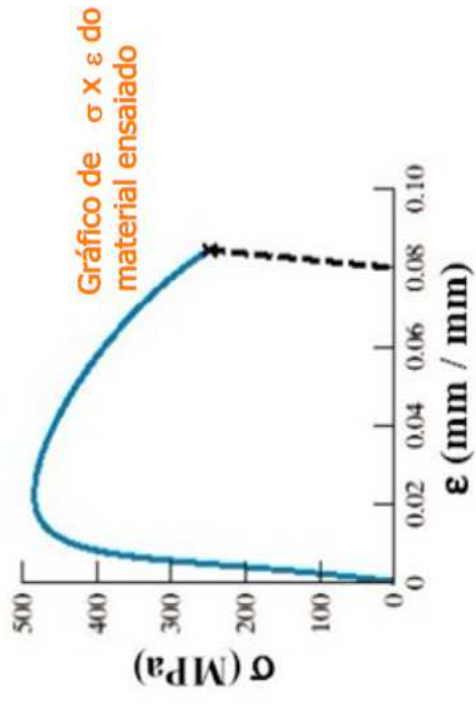
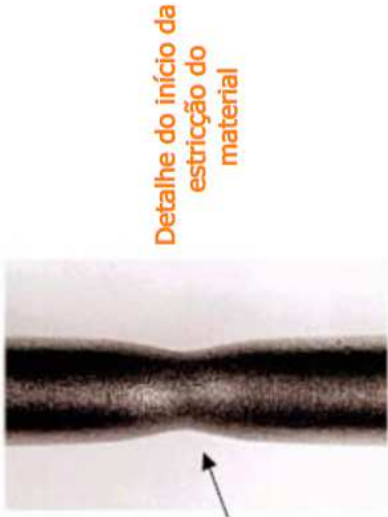
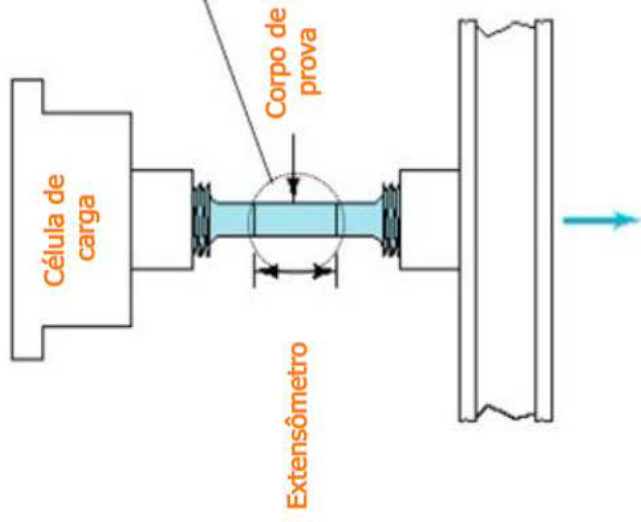
Deformação elástica: é reversível, ou seja, quando a carga é retirada, o corpo de prova volta às suas dimensões originais.

- ◆ Sob carga, as distâncias inter-atômicas se expandem, mas são ocupam novas posições na rede cristalina.
- ◆ Na curva $\sigma \times \epsilon$, a região elástica é a parte linear inicial do gráfico.

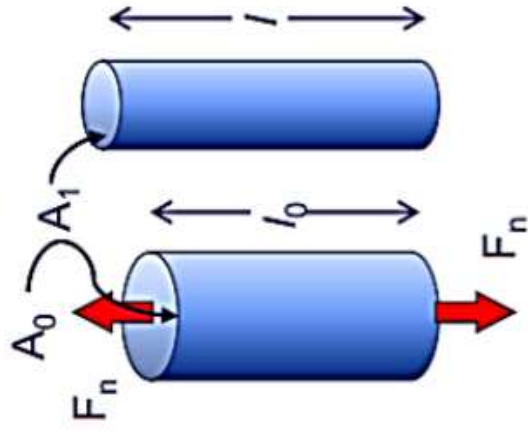
Deformação plástica: é irreversível, ou seja, quando a carga é retirada, o corpo de prova não recupera as suas dimensões originais.

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

Teste de tração:

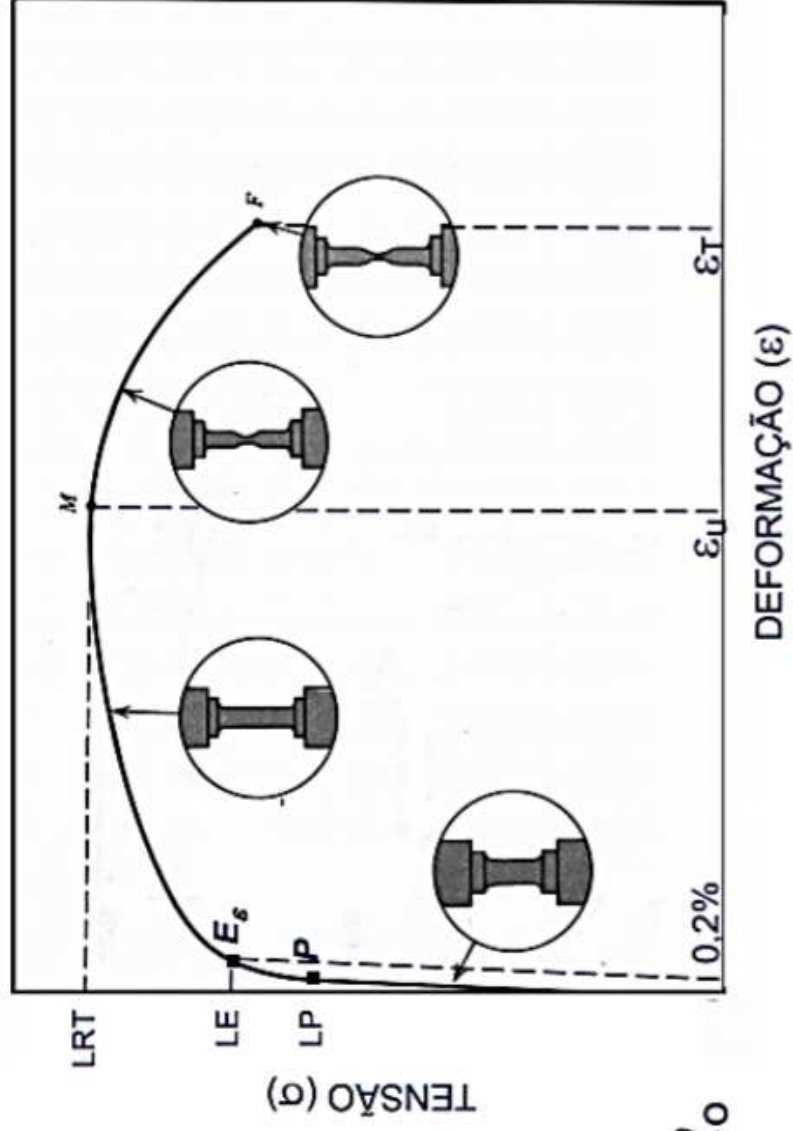


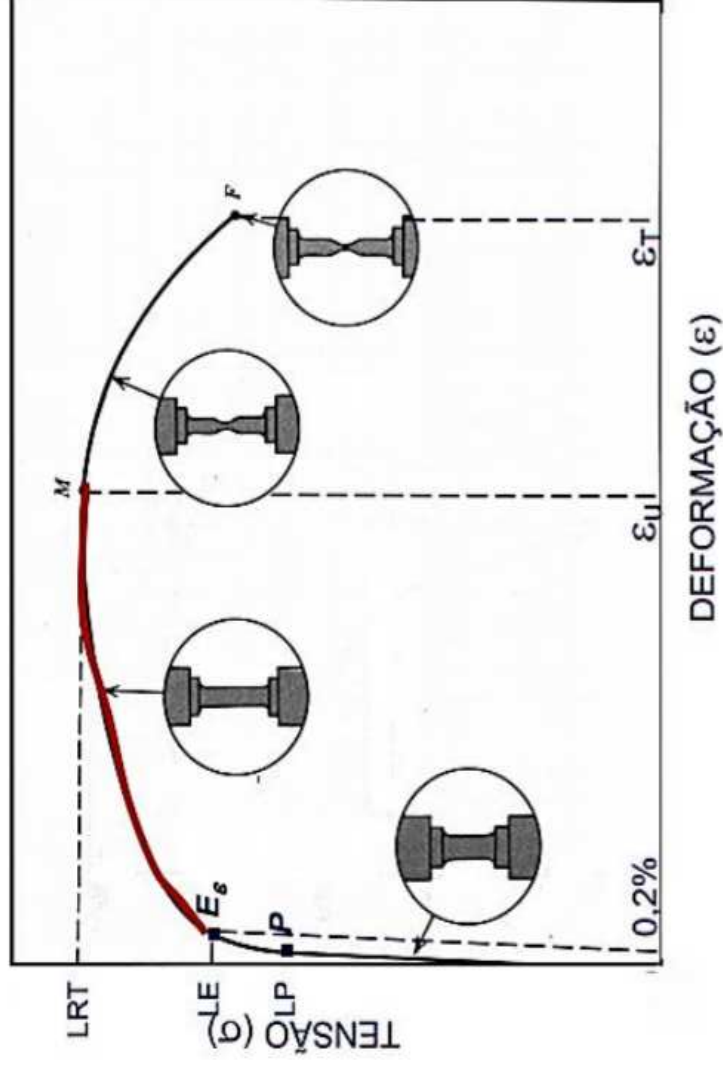
Tração



$$\sigma = F / A_0$$

$$\varepsilon = (l - l_0) / l_0 = \Delta l / l_0$$

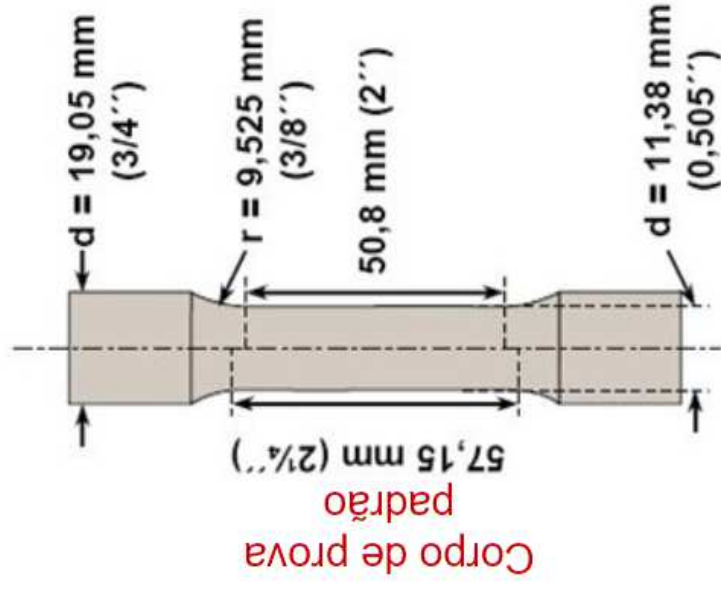
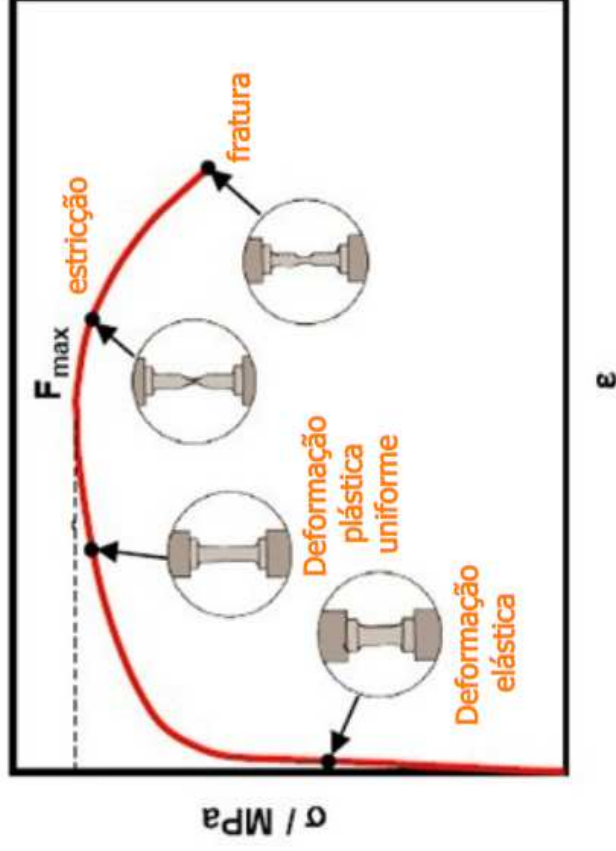




A deformação no ponto M corresponde ao máximo valor de ϵ com alongamento uniforme. Deformações maiores que ϵ_U ocorrem com estricção (empescoamento).

- Deformação Plástica:

- ✓ tensão e deformação não são proporcionais;
- ✓ a deformação não é reversível;
- ✓ a deformação ocorre pela quebra e rearranjo das ligações atômicas (em materiais cristalinos, pelo movimento das discordâncias).



Ensaio de compressão

Um ensaio de compressão é realizado de forma semelhante ao de um ensaio de tração. A força aplicada ao corpo de prova é compressiva. As equações são as mesma empregadas no ensaio de tração. A força compressiva é considerada negativa, o que leva a uma tensão negativa. Como l_0 é maior que l_i , a deformação também é negativa.

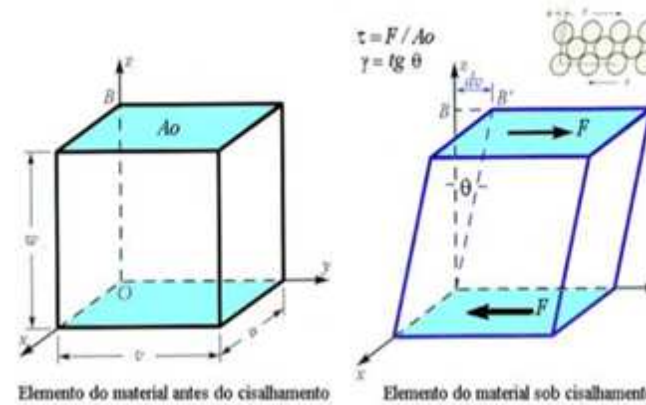
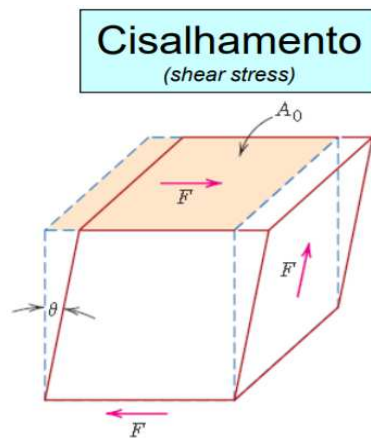


Ensaio de cisalhamento e de torção

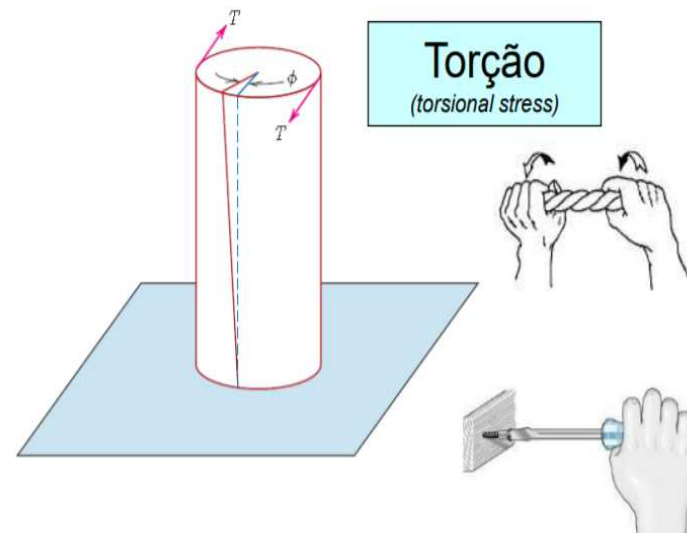
A força cisalhante pura é calculada pela equação:

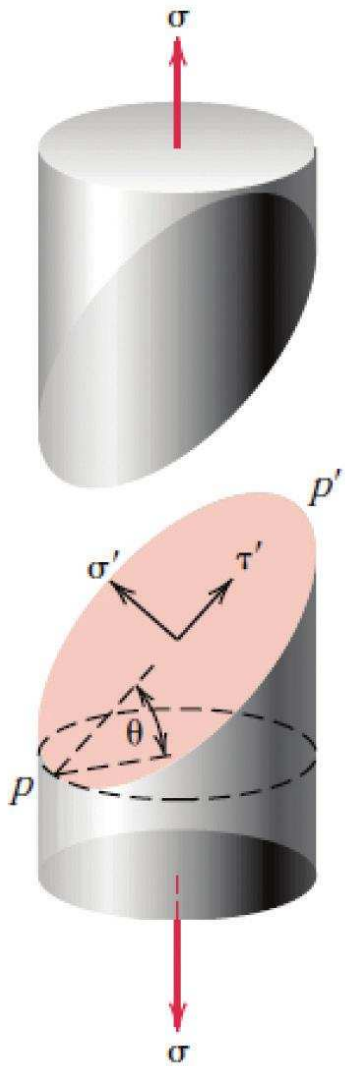
$$\tau = \frac{F}{A_0}$$

onde F é a força imposta paralelamente às faces superior e inferior, sendo que cada uma delas tem uma área A_0 . A deformação cisalhante (γ) é definida como a tangente do ângulo de deformação (θ), vide figura.



Torção é uma variação do **cisalhamento** puro, na qual um elemento estrutural é torcido. As forças de torção produzem um movimento de rotação em torno do eixo longitudinal. A tensão cisalhante (τ) é uma função do torque (T) aplicado, ao passo que a deformação cisalhante (γ) está relacionada com o ângulo de torção (ϕ).





Considerações geométricas a respeito do estado de tração

O estado de tensão é uma função das orientações dos planos sobre os quais as tensões atuam. Considere um corpo de prova cilíndrico submetido a uma tensão de tração (σ) aplicada paralelamente ao seu eixo. Considere também o plano $p-p'$ que está orientado segundo o ângulo θ , arbitrário. A tensão aplicada sobre o plano $p-p'$, não é mais uma tensão pura de tração. Identifica-se, uma tensão de tração normal σ' que atua em uma direção normal ao plano $p-p'$ e uma tensão cisalhante τ' , que atua em uma direção paralela ao plano $p-p'$. Essas duas tensões estão relacionadas a σ e θ , através das equações:

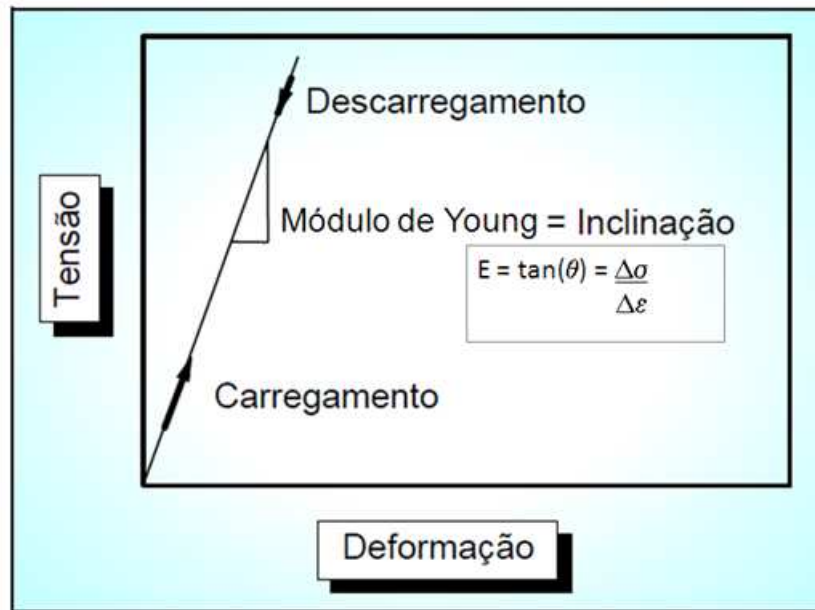
$$\sigma' = \sigma \cos^2 \theta = \sigma \left(\frac{1 + \cos 2\theta}{2} \right)$$

$$\tau' = \sigma \sin \theta \cos \theta = \sigma \left(\frac{\sin 2\theta}{2} \right)$$

Comportamento Tensão – Deformação

A tensão e a deformação são proporcionais entre si na região elástica:

$\sigma = E \varepsilon$, onde E é denominado *Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young*



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

Deformação

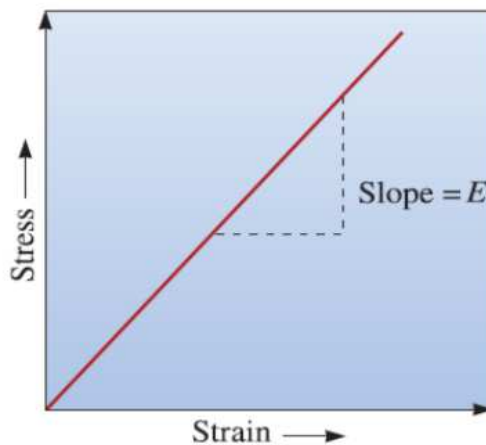
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Módulo de Elasticidade

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

Módulo de Elasticidade

Curva Tensão - Deformação



- Define-se o **MÓDULO DE ELASTICIDADE** como sendo o coeficiente angular da curva σ vs. ϵ , na região linear da curva. Como a curva tem origem no ponto (0,0).

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

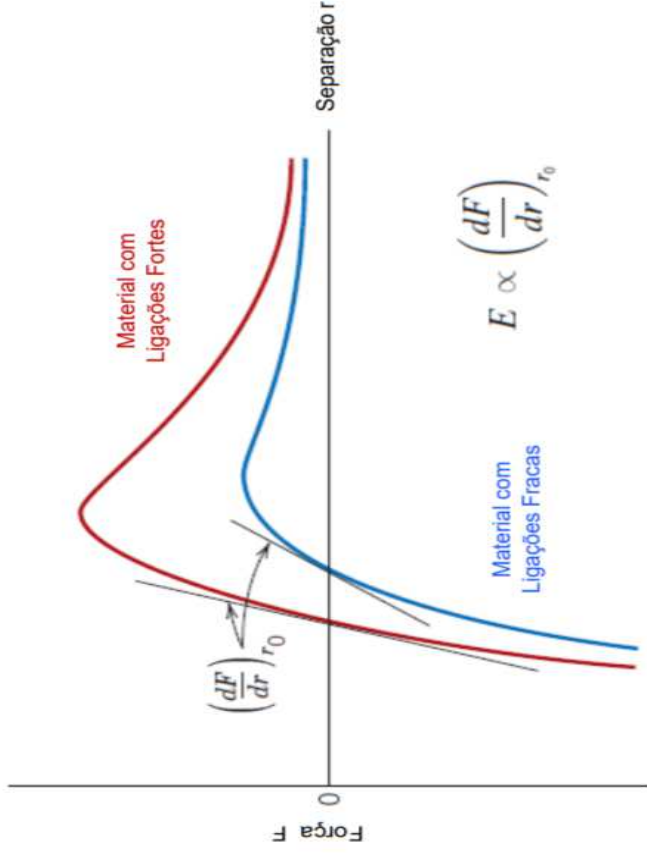
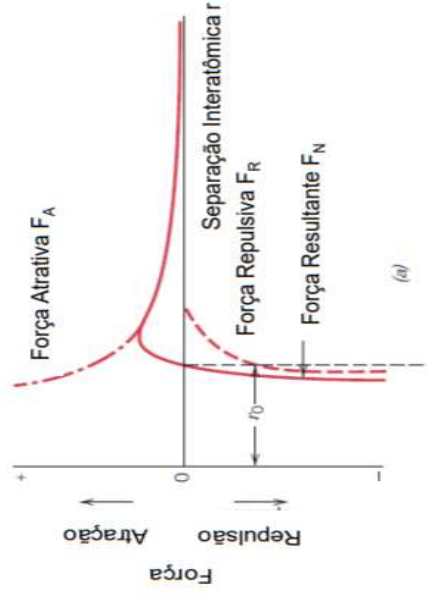
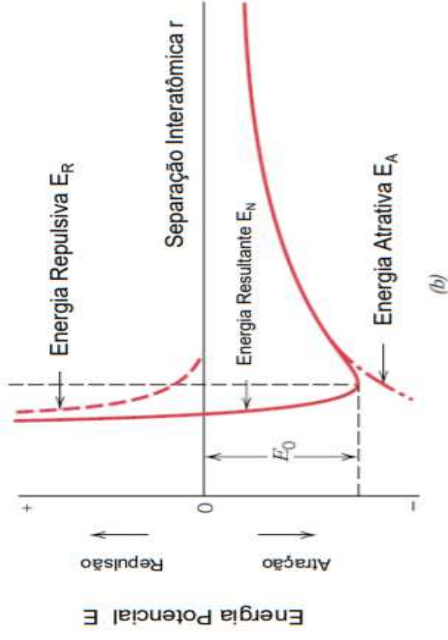
(Lei de Hooke)

Módulo de Elasticidade

Metal ou Liga	Módulo de Elasticidade	
	GPa	10^6 psi
Alumínio	69	10
Latão	97	14
Cobre	110	16
Magnésio	45	6.5
Níquel	207	30
Aço	207	30
Titânio	107	15.5
Tungstênio	407	59

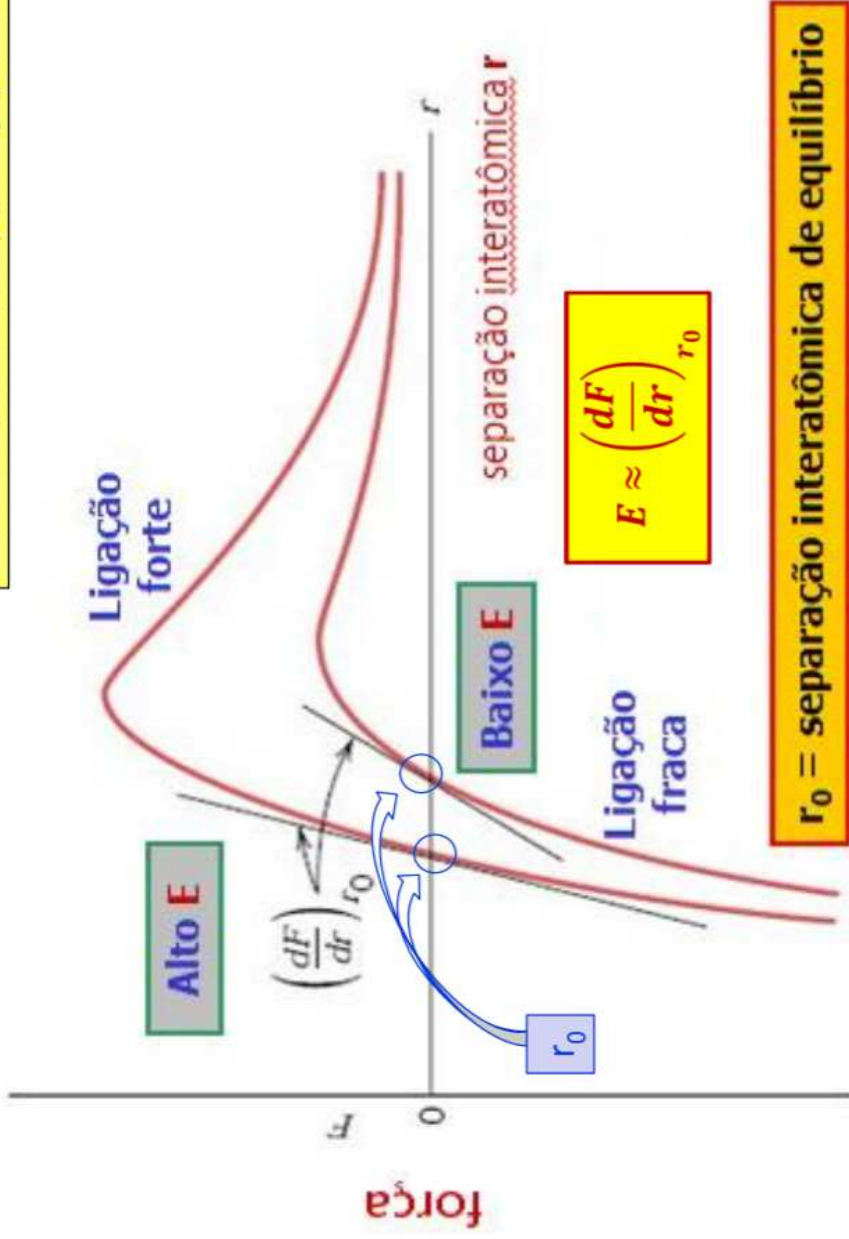
Quanto maior o módulo de elasticidade mais rígido é o material ou menor é a sua deformação elástica quando aplicada uma dada tensão.

Em escala atômica, a deformação elástica é manifestada como pequenas mudanças no espaçamento atômico ou estiramento das ligações atômicas.

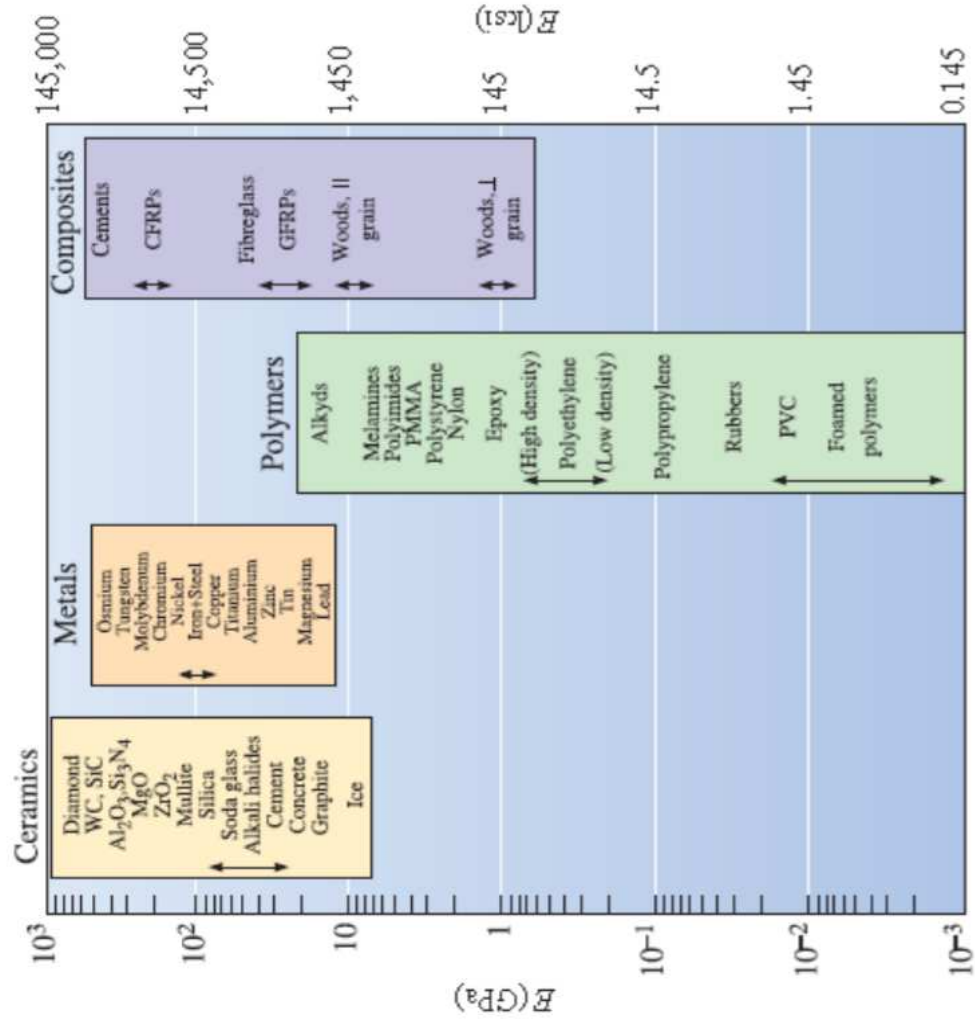


Módulo de Elasticidade

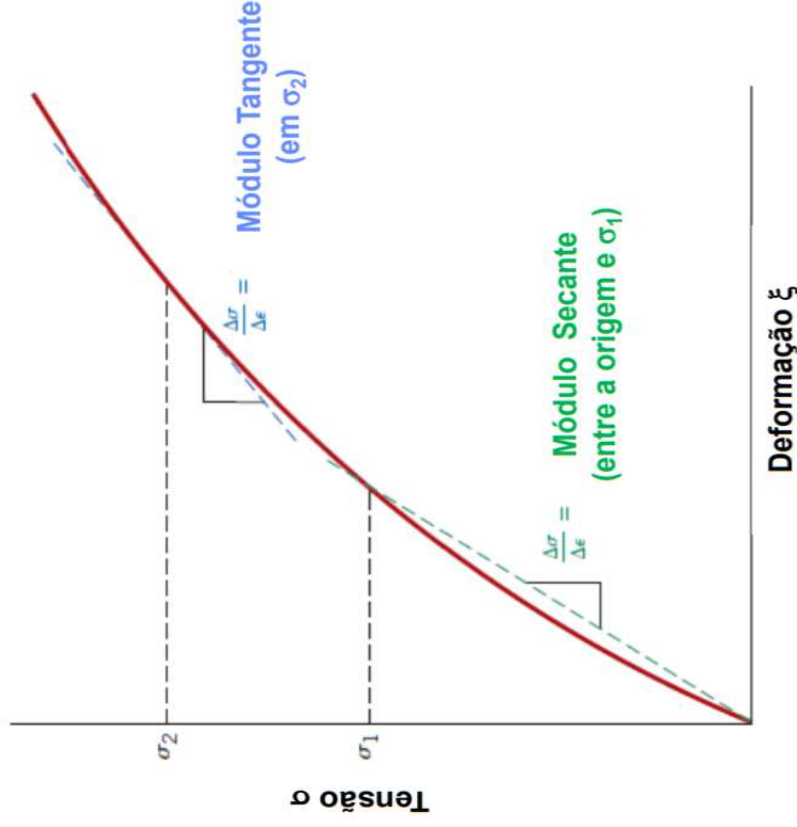
O **módulo de elasticidade E** representa uma medida da intensidade das forças de ligação interatômicas.



Módulo de Elasticidade

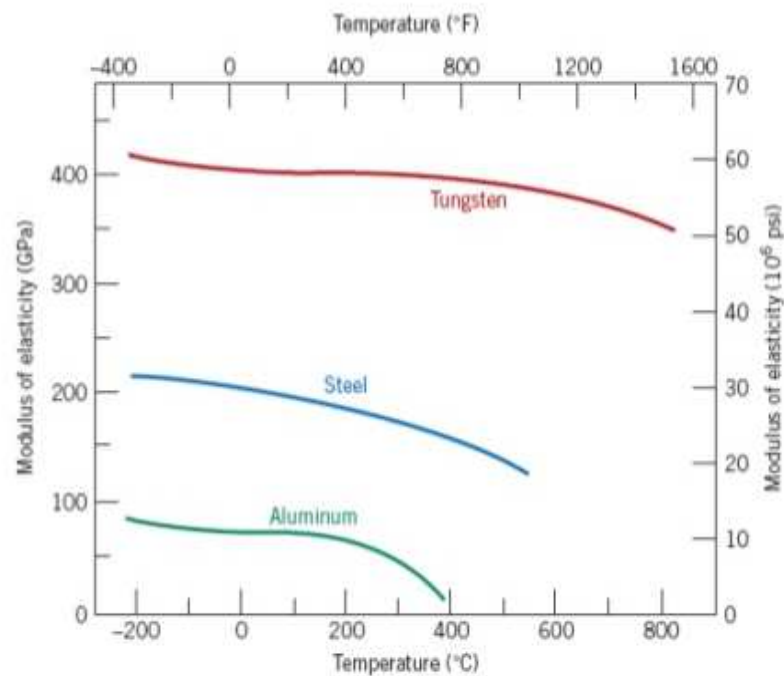


Deformação Elástica Não Linear



- Há materiais como: ferro fundido cinzento, concreto e alguns polímeros para os quais a porção elástica da curva tensão-deformação não é linear.
- Pode-se utilizar: módulo tangente ou secante.
- O módulo tangente é tomado como a inclinação da curva tensão-deformação a um nível especificado de tensão.
- O módulo secante representa a inclinação de uma secante que parte da origem da curva até certo valor de tensão ou deformação.

Módulo de elasticidade diminui com o aumento da temperatura



Módulo de elasticidade em função da temperatura para tungstênio, aço e alumínio

Valores típicos dos módulos de elasticidade a diferentes temperaturas.

Material	Módulo de Elasticidade, GPa.				
	20°C	205°C	427°C	538°C	649°C
Aço carbono	210	190	158	137	127
Ligas de Ti	116	98	75	71	
Ligas de Al	74	67	55		

Módulo de Elasticidade – Aço vs. Alumínio

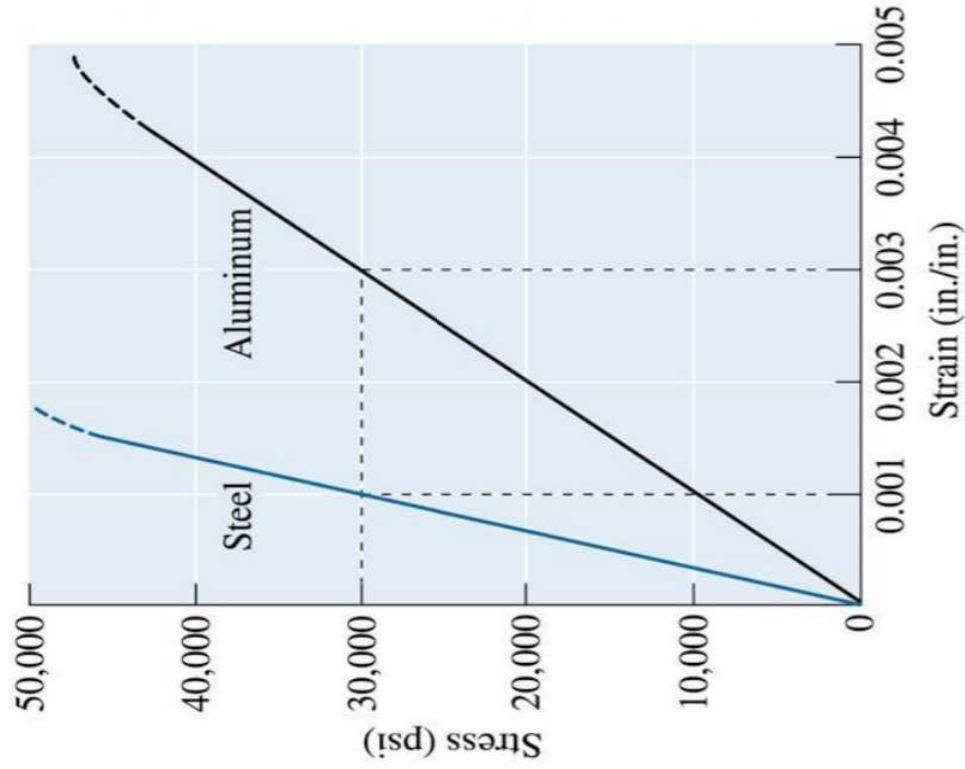


TABLE 2.5 Elastic and Shear Moduli and Poisson Ratios for Polycrystalline Metals^a

Metal (20°C)	E (GPa)	G (GPa)	ν
Aluminum	70.3	26.1	0.345
Cadmium	49.9	19.2	0.300
Chromium	279.1	115.4	0.210
Copper	129.8	48.3	0.343
Gold	78.0	27.0	0.440
Iron	211.4	81.6	0.293
Magnesium	44.7	17.3	0.291
Nickel	199.5	76.0	0.312
Niobium	104.9	37.5	0.397
Silver	82.7	30.3	0.367
Tantalum	185.7	69.2	0.342
Titanium	115.7	43.8	0.321
Tungsten	411.0	160.6	0.280
Vanadium	127.6	46.7	0.365

^a Adapted with permission from R. W. Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Material*, New York: John Wiley, 1976, p. 8.

Tensões de compressão, cisalhamento ou torção também induz comportamento elástico. As características tensão-deformação são virtualmente as mesmas para tração ou compressão na região elástica. A tensão-deformação cisalhante são proporcionais:

$$\tau = G \gamma$$

onde G é o módulo de cisalhamento.

- **Cisalhamento**

Tensão

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

Deformação

$$\gamma = \tan \theta$$

Módulo de cisalhamento

$$\tau = G \cdot \gamma$$

- Módulos de elasticidade, de cisalhamento e coeficientes de Poisson para várias ligas metálicas à temperatura ambiente.

<i>Metal Alloy</i>	<i>Modulus of Elasticity</i>		<i>Shear Modulus</i>		<i>Poisson's Ratio</i>
	<i>GPa</i>	<i>10⁶ psi</i>	<i>GPa</i>	<i>10⁶ psi</i>	
Aluminum	69	10	25	3.6	0.33
Brass	97	14	37	5.4	0.34
Copper	110	16	46	6.7	0.34
Magnesium	45	6.5	17	2.5	0.29
Nickel	207	30	76	11.0	0.31
Steel	207	30	83	12.0	0.30
Titanium	107	15.5	45	6.5	0.34
Tungsten	407	59	160	23.2	0.28

