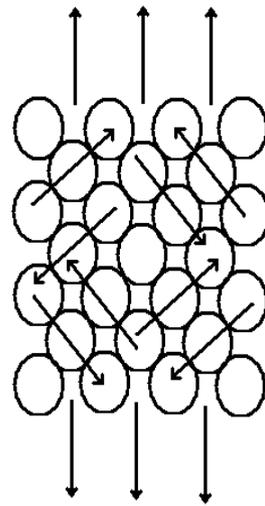
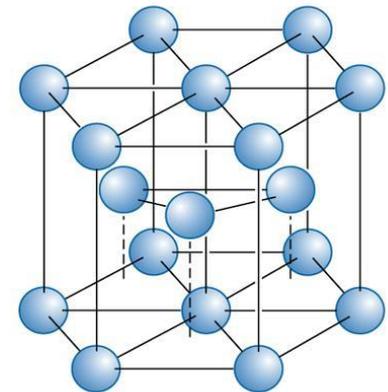
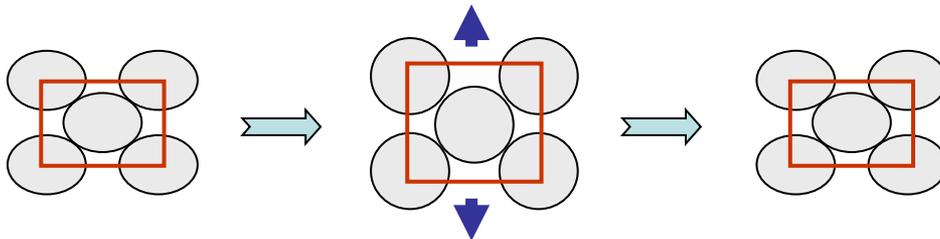


Universidade de São Paulo  
Escola de Engenharia de São Carlos  
Departamento de Engenharia de Materiais



# *ENSAIOS MECÂNICOS DOS MATERIAIS*



Engenharia e Ciência dos Materiais I  
Prof. Dr. Eduardo Bellini Ferreira

# Propriedades mecânicas

- Refletem a resposta ou deformação do material a uma dada carga aplicada
- É necessário conhecer as características do material e projetar peças a partir dele de tal maneira que qualquer deformação resultante de uma tensão aplicada **não seja excessiva e não ocorra fratura**
- Resistência, dureza, ductilidade, rigidez

# Verificação das propriedades mecânicas

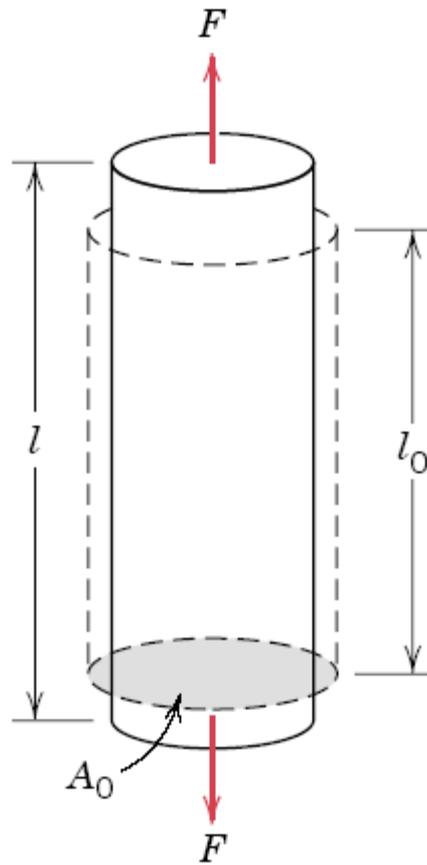
- Experimentos controlados
  - Natureza da carga aplicada
  - Duração da aplicação
  - Condições ambientais
- Cargas
  - Tração
  - Compressão
  - Cisalhamento
    - » Constantes ou variáveis

- Engenheiros de projeto
  - Estabelecem as tensões e distribuição de tensões em uma máquina ou estrutura sujeitas a cargas bem definidas
- Engenheiro de materiais
  - Desenvolvimento e fabricação de materiais para atender as exigências de serviço previstas
    - » Relação **microestrutura** *versus* **propriedades**

# Ensaio tensão-deformação

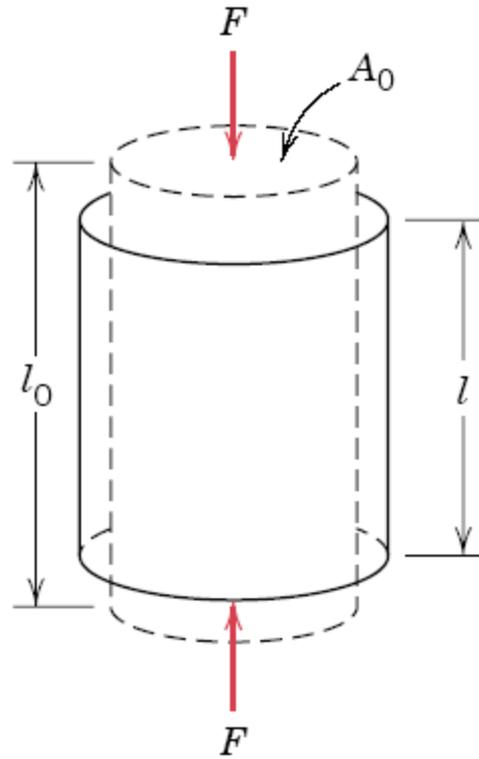
- Carga estática ou se altera de maneira lenta
- Aplicada uniformemente sobre uma seção reta ou superfície de uma peça
  - Tração
  - Compressão
  - Cisalhamento
  - Torção

# Tração



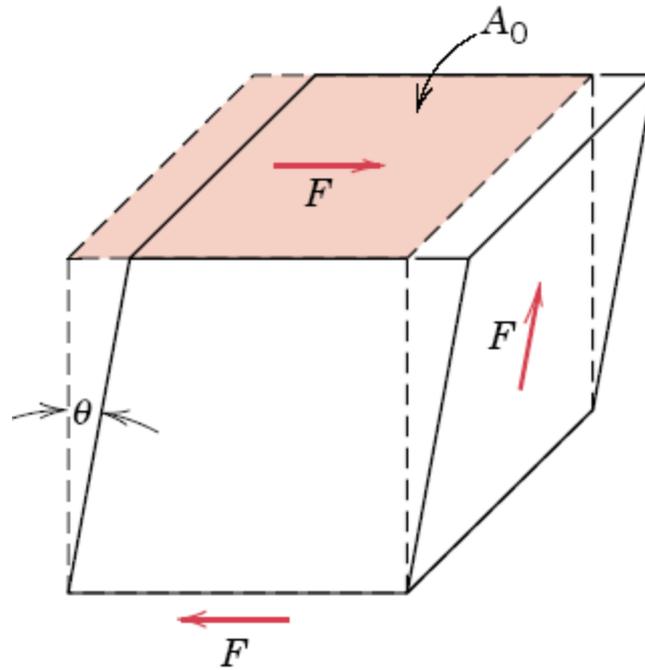
(a)

# Compressão



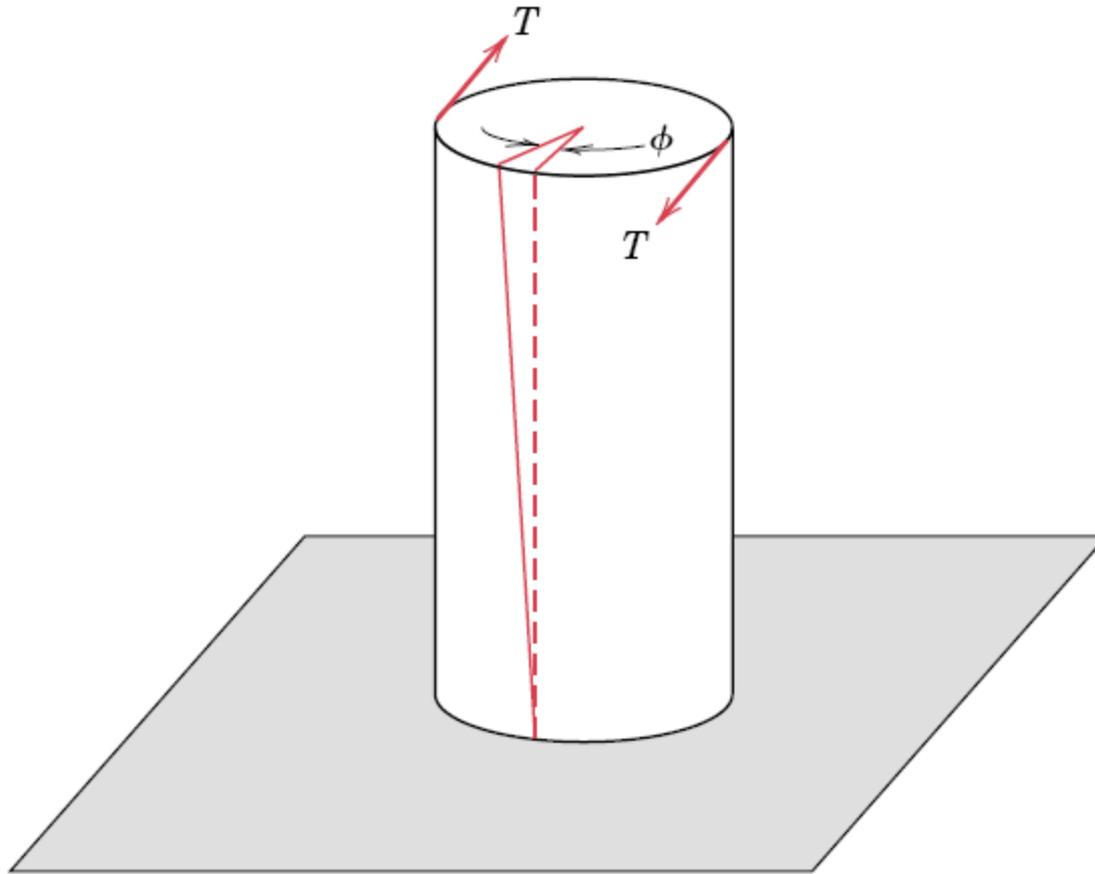
(b)

# Cisalhamento



(c)

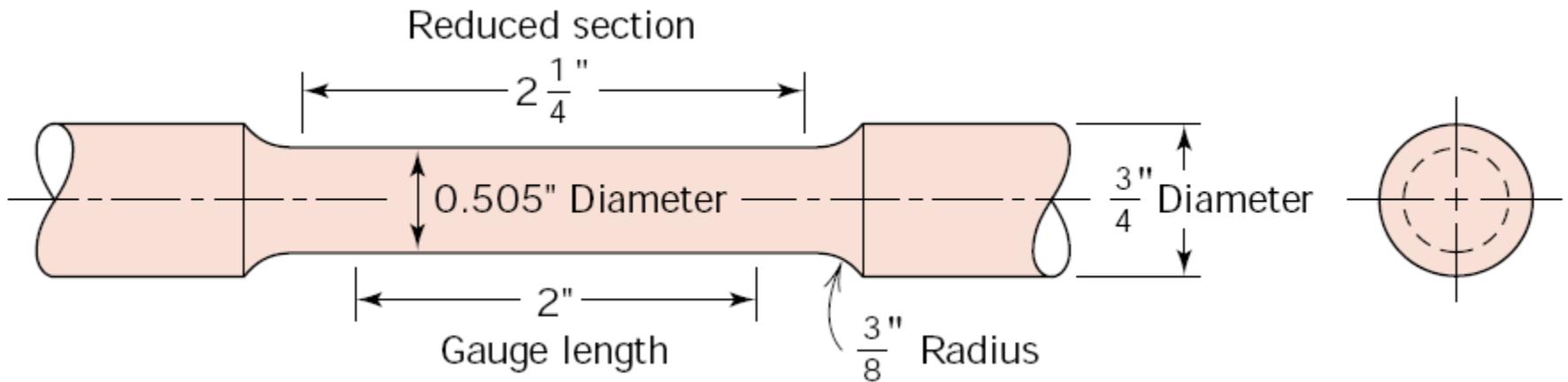
# Torção



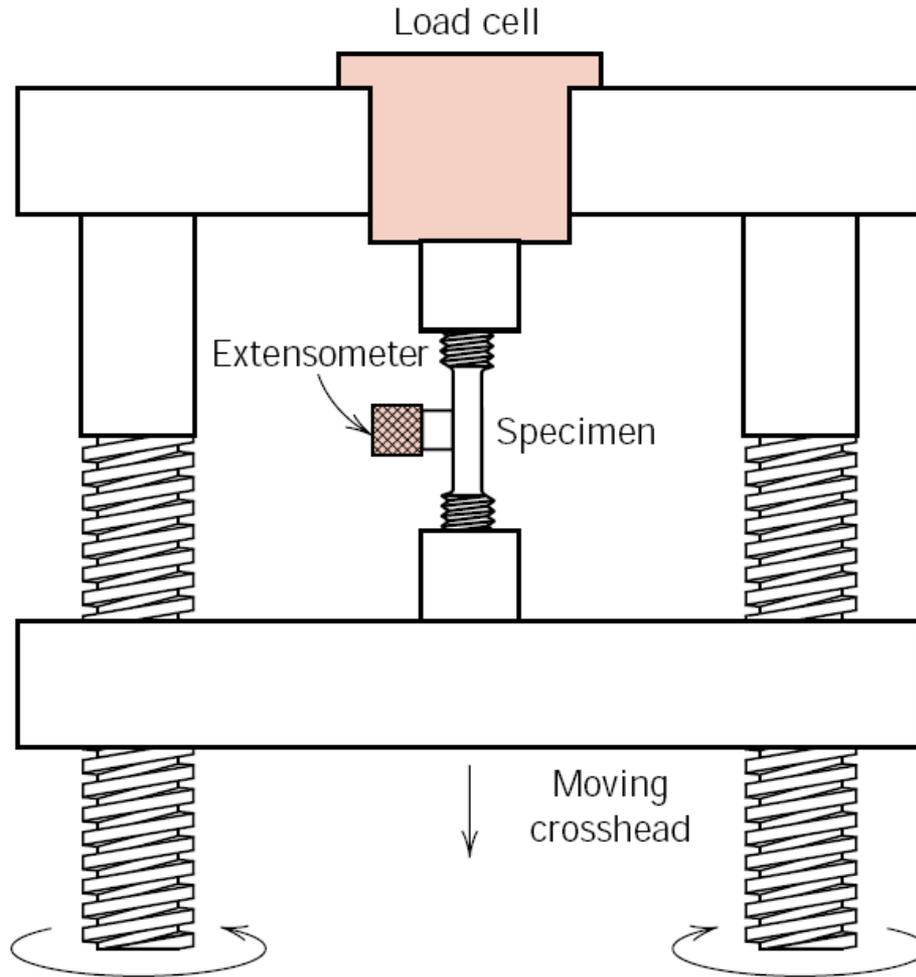
(d)

# O ensaio de tração

– corpo de prova padronizado



# O ensaio de tração



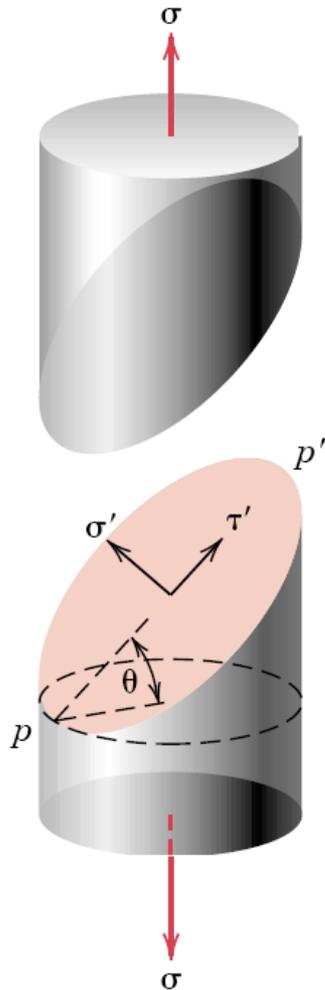
Tensão de engenharia

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

Deformação de engenharia

$$\epsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

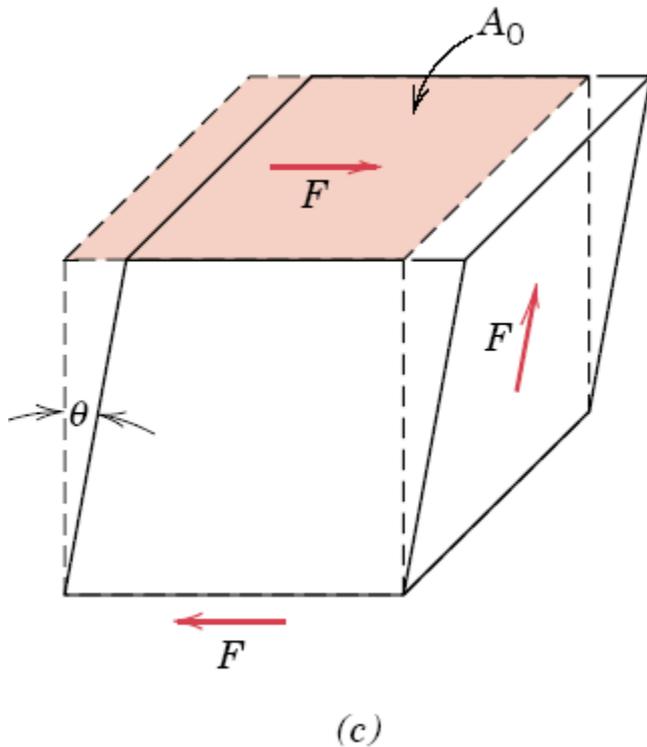
# O estado de tensão local depende do plano considerado



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

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

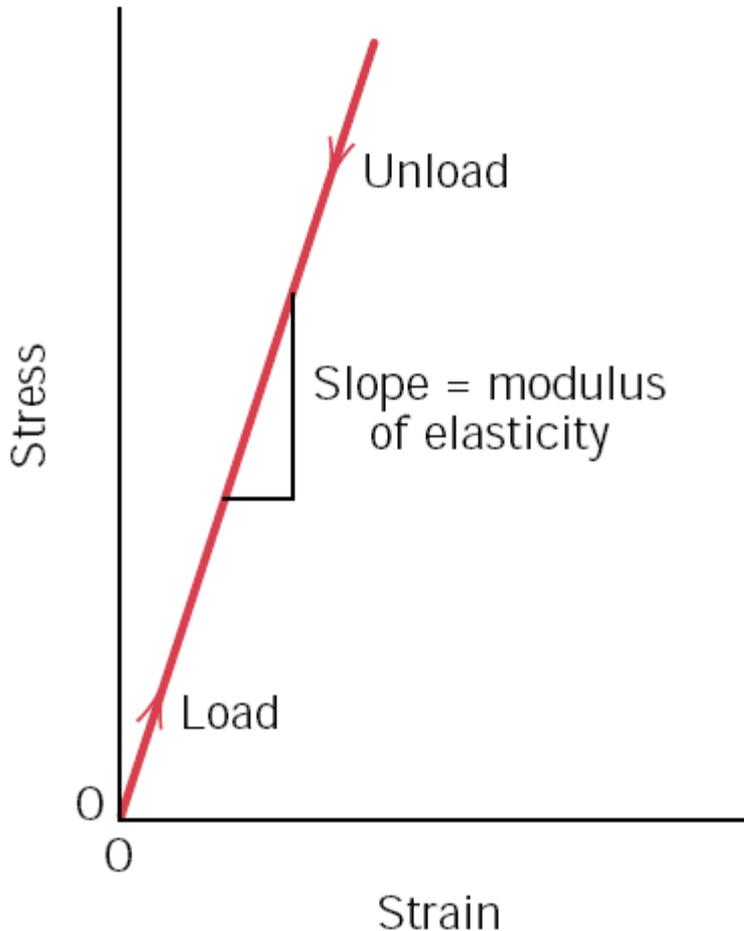
# Ensaio de cisalhamento



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

A deformação de cisalhamento  $\gamma$  é definida como sendo a tangente ao ângulo de deformação  $\theta$ .

# Comportamento de tensão deformação no regime elástico



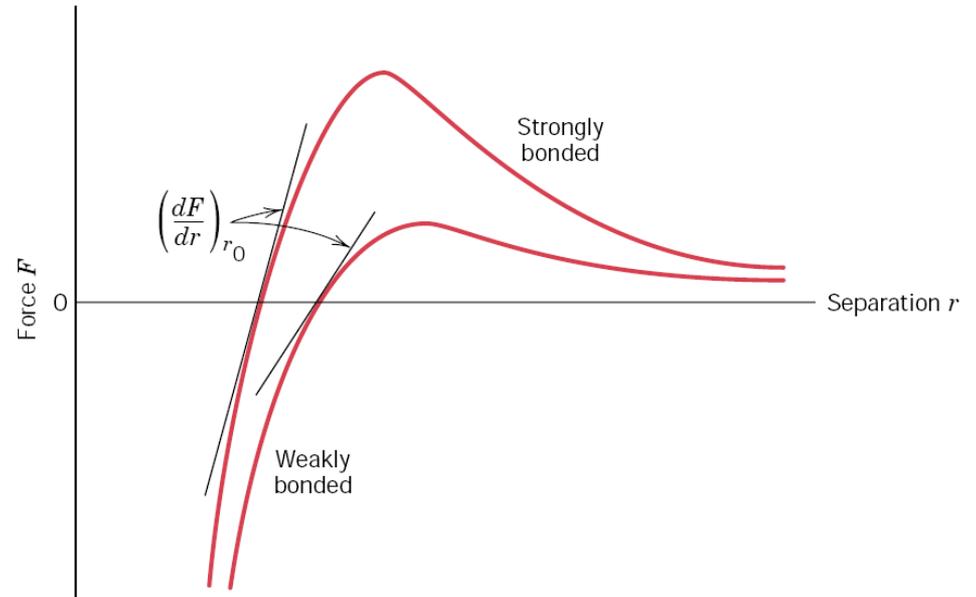
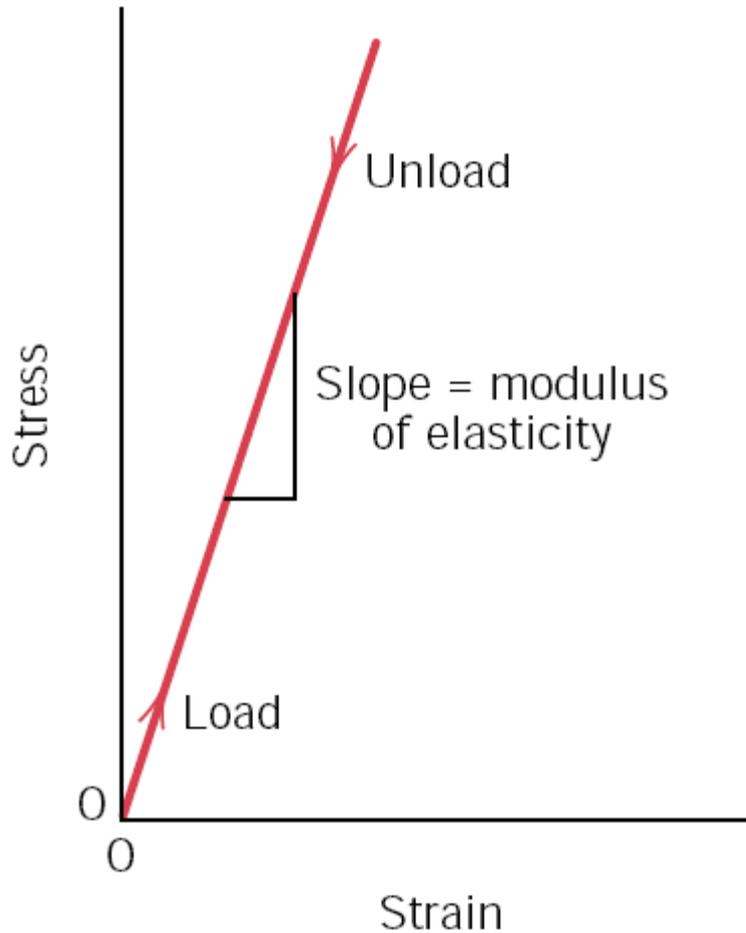
$$\sigma = E\epsilon$$

$E$  = módulo de elasticidade ou módulo de Young

$$\tau = G\gamma$$

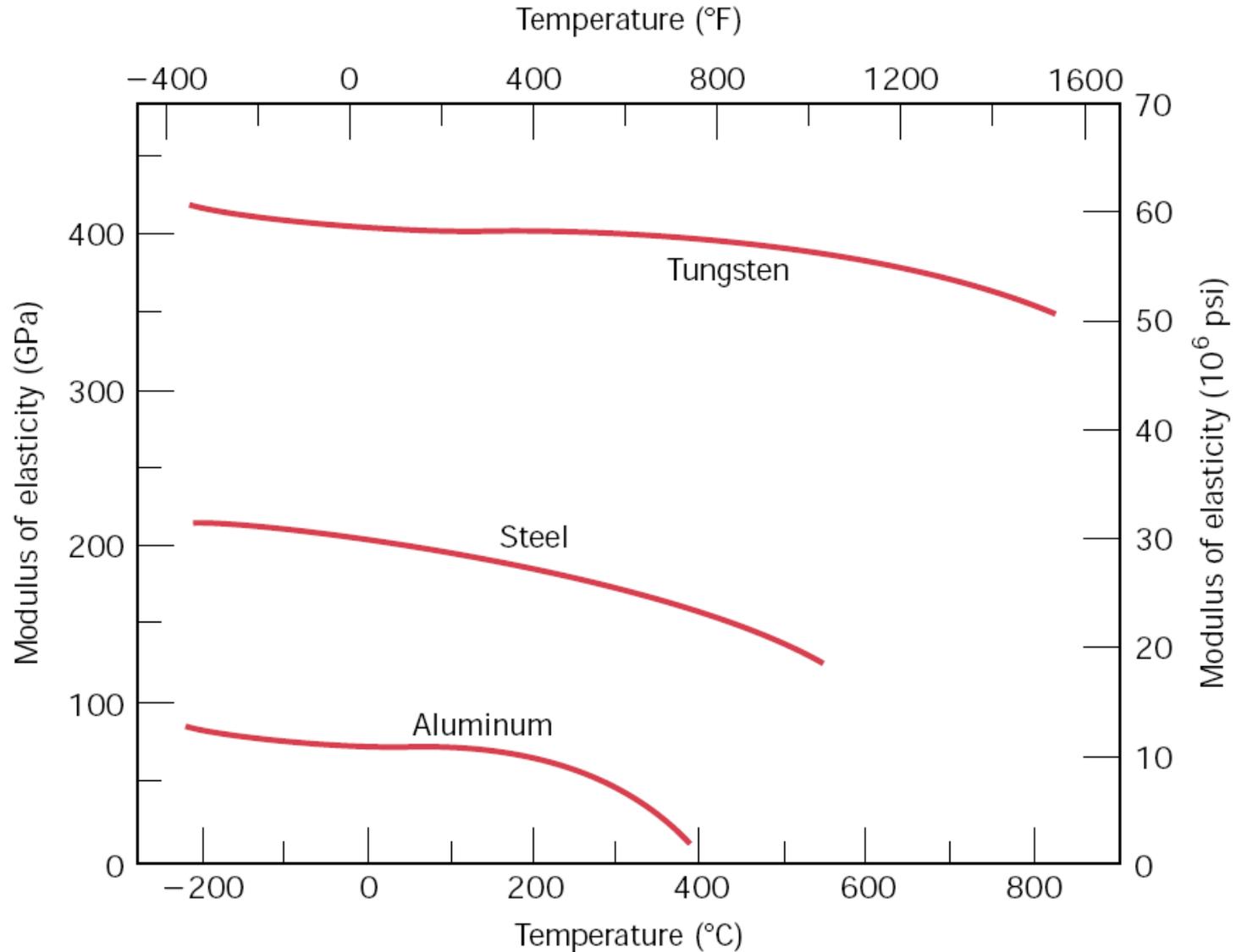
$G$  = módulo de cisalhamento ou módulo transversal

# Comportamento de tensão deformação no regime elástico

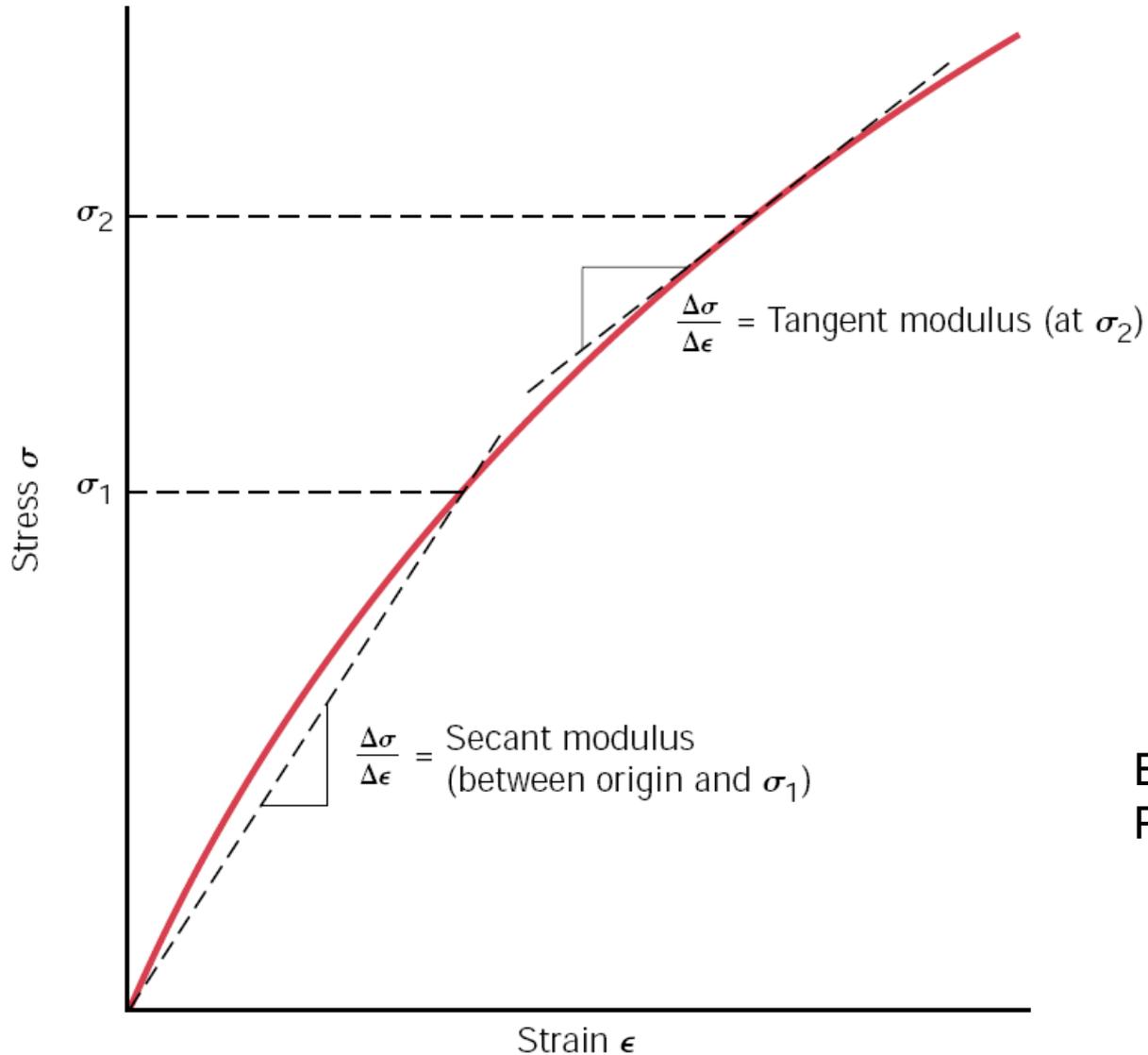


$$E \propto \left(\frac{dF}{dr}\right)_{r_0}$$

# Módulo elástico varia com a T

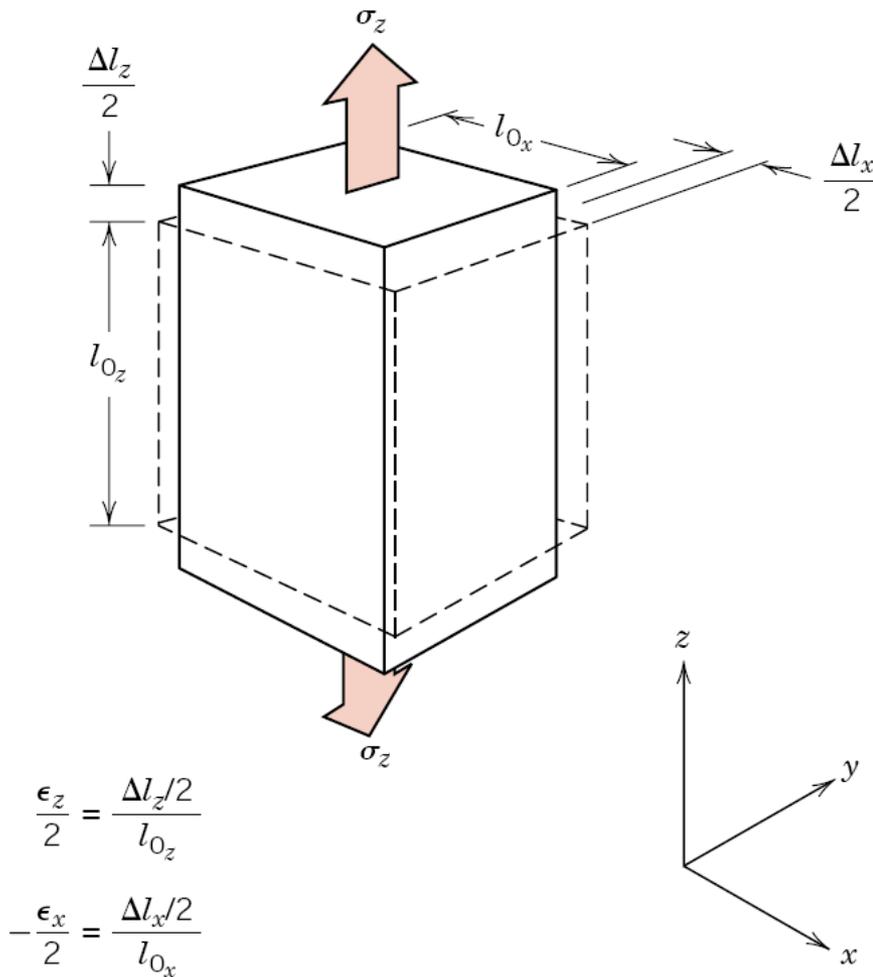


# Anelasticidade



Exemplo:  
Plásticos (polímeros)

# Propriedades elásticas dos materiais



Coeficiente de Poisson

$$\nu = - \frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = - \frac{\epsilon_y}{\epsilon_z}$$

Relação entre módulos elásticos:

$$E = 2G(1 + \nu)$$

# Valores para comparação

<i>Material</i>	<i>Modulus of Elasticity</i>		<i>Shear Modulus</i>		<i>Poisson's Ratio</i>
	<i>GPa</i>	<i>10<sup>6</sup> psi</i>	<i>GPa</i>	<i>10<sup>6</sup> psi</i>	
<b>Metal Alloys</b>					
Tungsten	407	59	160	23.2	0.28
Steel	207	30	83	12.0	0.30
Nickel	207	30	76	11.0	0.31
Titanium	107	15.5	45	6.5	0.34
Copper	110	16	46	6.7	0.34
Brass	97	14	37	5.4	0.34
Aluminum	69	10	25	3.6	0.33
Magnesium	45	6.5	17	2.5	0.35

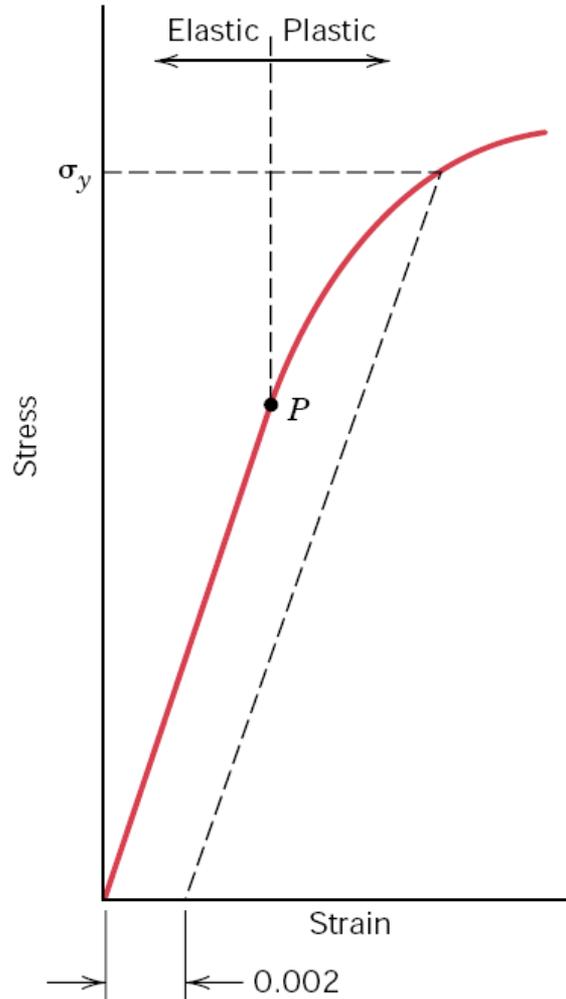
# Valores para comparação

<i>Material</i>	<i>Modulus of Elasticity</i>		<i>Shear Modulus</i>		<i>Poisson's Ratio</i>
	<i>GPa</i>	<i>10<sup>6</sup> psi</i>	<i>GPa</i>	<i>10<sup>6</sup> psi</i>	
<b>Ceramic Materials</b>					
Aluminum oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	393	57	—	—	0.22
Silicon carbide (SiC)	345	50	—	—	0.17
Silicon nitride (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )	304	44	—	—	0.30
Spinel (MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	260	38	—	—	—
Magnesium oxide (MgO)	225	33	—	—	0.18
Zirconia <sup>a</sup>	205	30	—	—	0.31
Mullite (3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -2SiO <sub>2</sub> )	145	21	—	—	0.24
Glass-ceramic (Pyroceram)	120	17	—	—	0.25
Fused silica (SiO <sub>2</sub> )	73	11	—	—	0.17
Soda-lime glass	69	10	—	—	0.23

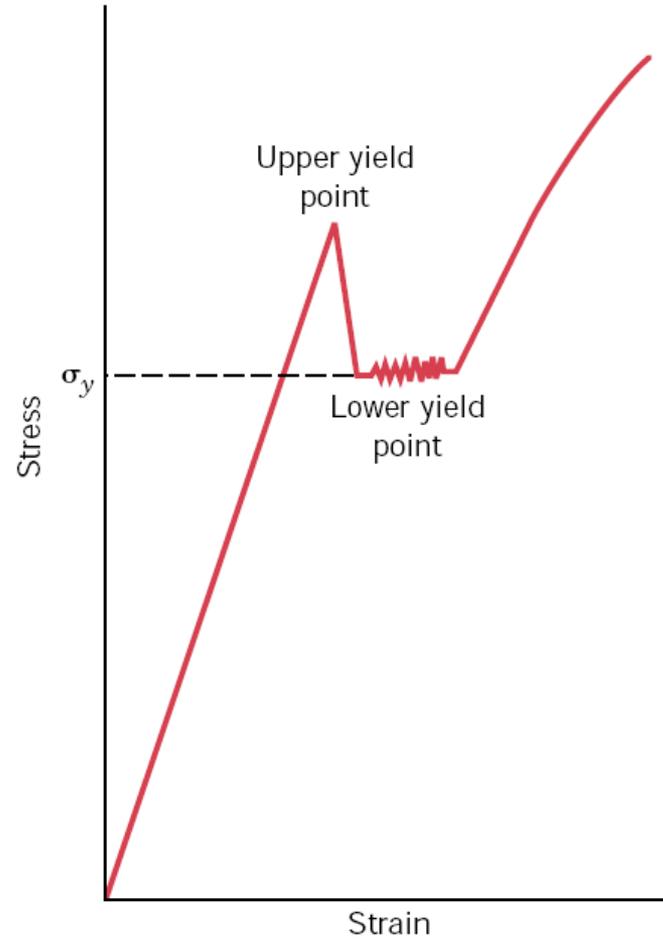
# Valores para comparação

<i>Material</i>	<i>Modulus of Elasticity</i>		<i>Shear Modulus</i>		<i>Poisson's Ratio</i>
	<i>GPa</i>	<i>10<sup>6</sup> psi</i>	<i>GPa</i>	<i>10<sup>6</sup> psi</i>	
<b>Polymers<sup>b</sup></b>					
Phenol-formaldehyde	2.76–4.83	0.40–0.70	—	—	—
Polyvinyl chloride (PVC)	2.41–4.14	0.35–0.60	—	—	0.38
Polyester (PET)	2.76–4.14	0.40–0.60	—	—	—
Polystyrene (PS)	2.28–3.28	0.33–0.48	—	—	0.33
Polymethyl methacrylate (PMMA)	2.24–3.24	0.33–0.47	—	—	—
Polycarbonate (PC)	2.38	0.35	—	—	0.36
Nylon 6,6	1.58–3.80	0.23–0.55	—	—	0.39
Polypropylene (PP)	1.14–1.55	0.17–0.23	—	—	—
Polyethylene—high density (HDPE)	1.08	0.16	—	—	—
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	0.40–0.55	0.058–0.080	—	—	0.46
Polyethylene—low density (LDPE)	0.17–0.28	0.025–0.041	—	—	—

# Deformação plástica

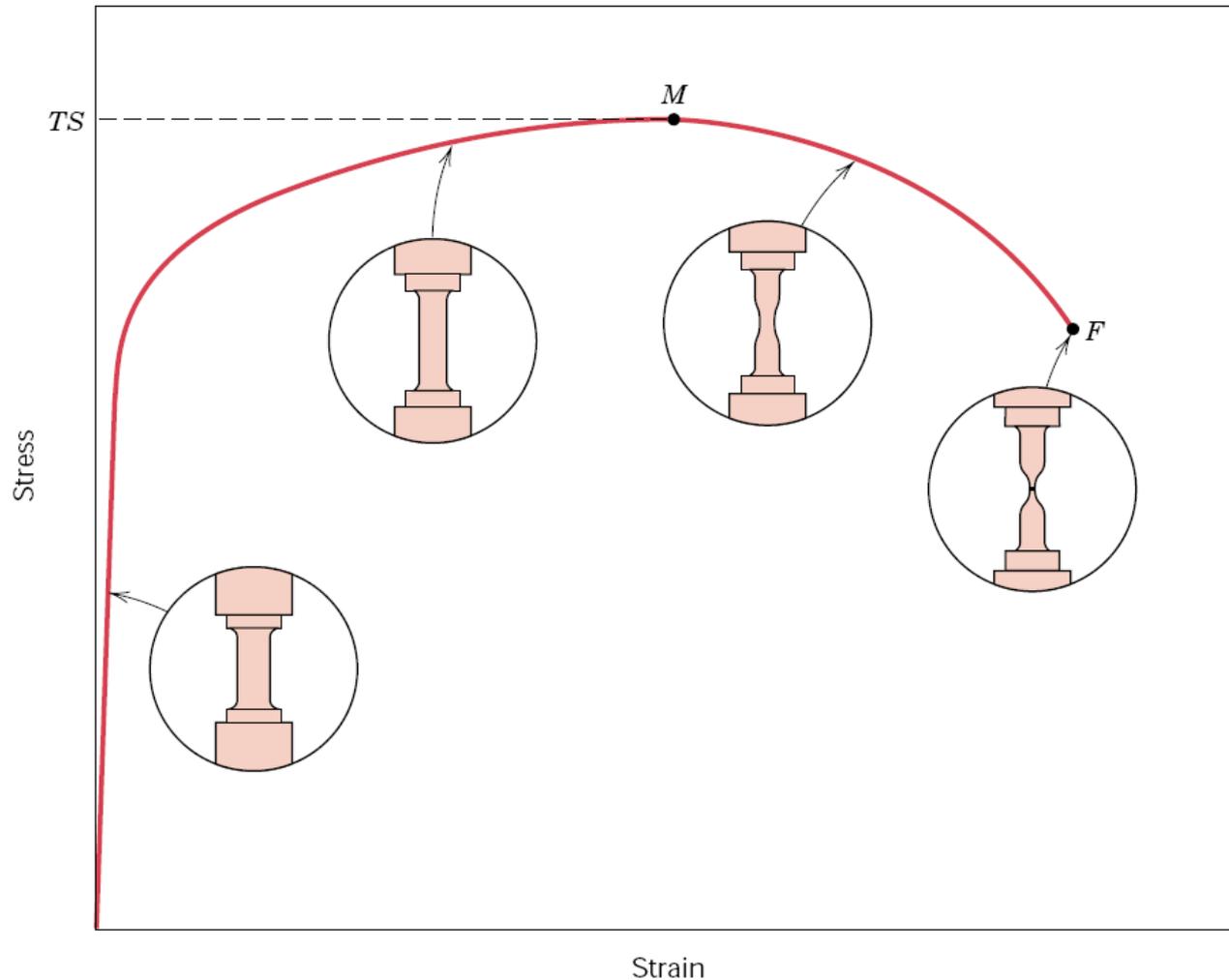


(a)

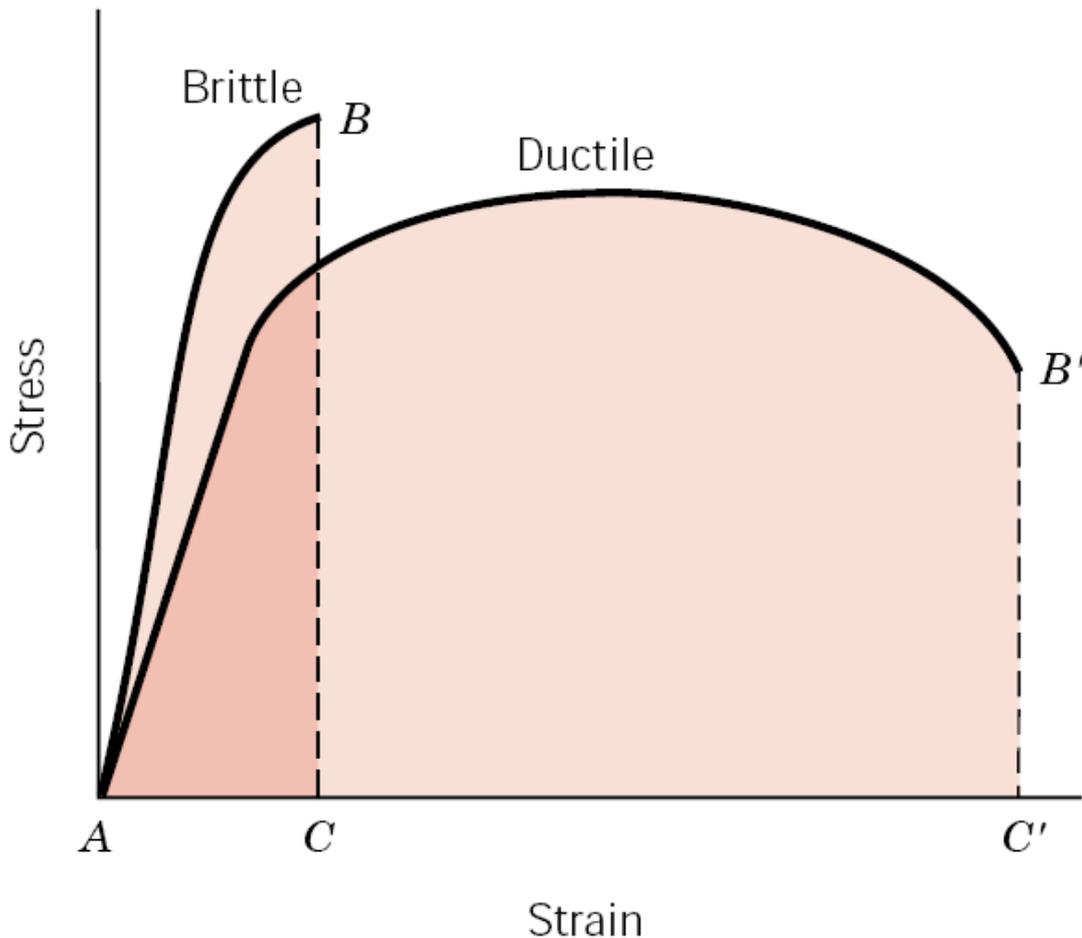


(b)

# Limite de Resistência à Tração (ponto $M$ )



# Ductilidade



Medida da quantidade de deformação plástica até a fratura do material.

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

ou

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

# Valores para comparação

<i>Material</i>	<i>Yield Strength</i>		<i>Tensile Strength</i>		<i>Ductility, %EL [in 50 mm (2 in.)]<sup>a</sup></i>
	<i>MPa</i>	<i>ksi</i>	<i>MPa</i>	<i>ksi</i>	
<b>Metal Alloys<sup>b</sup></b>					
Molybdenum	565	82	655	95	35
Titanium	450	65	520	75	25
Steel (1020)	180	26	380	55	25
Nickel	138	20	480	70	40
Iron	130	19	262	38	45
Brass (70 Cu-30 Zn)	75	11	300	44	68
Copper	69	10	200	29	45
Aluminum	35	5	90	13	40

# Valores para comparação

<i>Material</i>	<i>Yield Strength</i>		<i>Tensile Strength</i>		<i>Ductility, %EL [in 50 mm (2 in.)]<sup>a</sup></i>
	<i>MPa</i>	<i>ksi</i>	<i>MPa</i>	<i>ksi</i>	
<b>Ceramic Materials<sup>c</sup></b>					
Zirconia (ZrO <sub>2</sub> ) <sup>d</sup>	—	—	800–1500	115–215	—
Silicon nitride (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )	—	—	250–1000	35–145	—
Aluminum oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	—	—	275–700	40–100	—
Silicon carbide (SiC)	—	—	100–820	15–120	—
Glass–ceramic (Pyroceram)	—	—	247	36	—
Mullite (3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub> )	—	—	185	27	—
Spinel (MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	—	—	110–245	16–36	—
Fused silica (SiO <sub>2</sub> )	—	—	110	16	—
Magnesium oxide (MgO) <sup>e</sup>	—	—	105	15	—
Soda–lime glass	—	—	69	10	—

# Valores para comparação

<i>Material</i>	<i>Yield Strength</i>		<i>Tensile Strength</i>		<i>Ductility, %EL [in 50 mm (2 in.)]<sup>a</sup></i>
	<i>MPa</i>	<i>ksi</i>	<i>MPa</i>	<i>ksi</i>	
	<b>Polymers</b>				
Nylon 6,6	44.8–82.8	6.5–12	75.9–94.5	11.0–13.7	15–300
Polycarbonate (PC)	62.1	9.0	62.8–72.4	9.1–10.5	110–150
Polyester (PET)	59.3	8.6	48.3–72.4	7.0–10.5	30–300
Polymethyl methacrylate (PMMA)	53.8–73.1	7.8–10.6	48.3–72.4	7.0–10.5	2.0–5.5
Polyvinyl chloride (PVC)	40.7–44.8	5.9–6.5	40.7–51.7	5.9–7.5	40–80
Phenol-formaldehyde	—	—	34.5–62.1	5.0–9.0	1.5–2.0
Polystyrene (PS)	—	—	35.9–51.7	5.2–7.5	1.2–2.5
Polypropylene (PP)	31.0–37.2	4.5–5.4	31.0–41.4	4.5–6.0	100–600
Polyethylene—high density (HDPE)	26.2–33.1	3.8–4.8	22.1–31.0	3.2–4.5	10–1200
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	—	—	20.7–34.5	3.0–5.0	200–400
Polyethylene—low density (LDPE)	9.0–14.5	1.3–2.1	8.3–31.4	1.2–4.55	100–650

<sup>a</sup> For polymers, percent elongation at break.

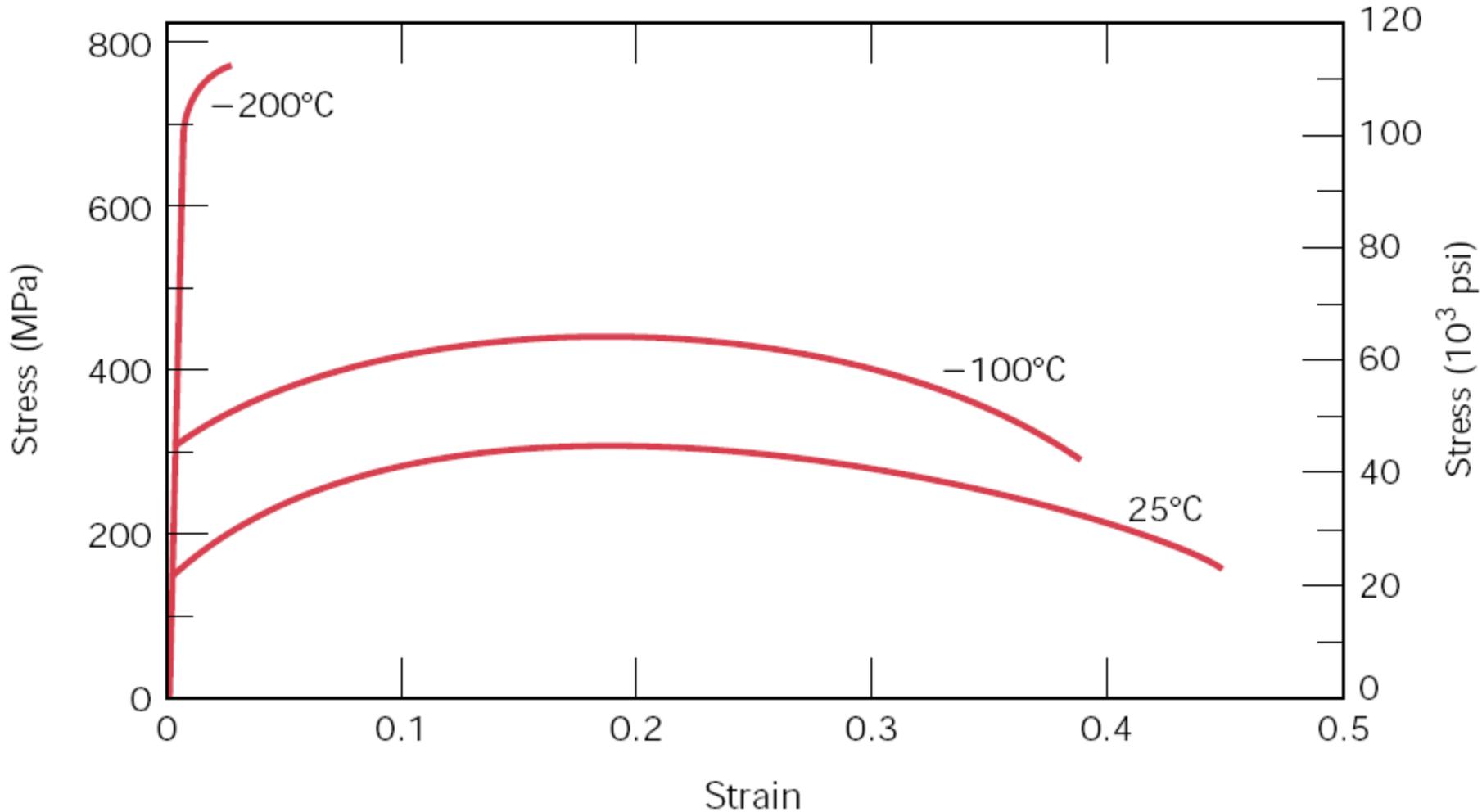
<sup>b</sup> Property values are for metal alloys in an annealed state.

<sup>c</sup> The tensile strength of ceramic materials is taken as flexural strength (Section 7.10).

<sup>d</sup> Partially stabilized with 3 mol% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

<sup>e</sup> Sintered and containing approximately 5% porosity.

# Tensão-deformação vs. T

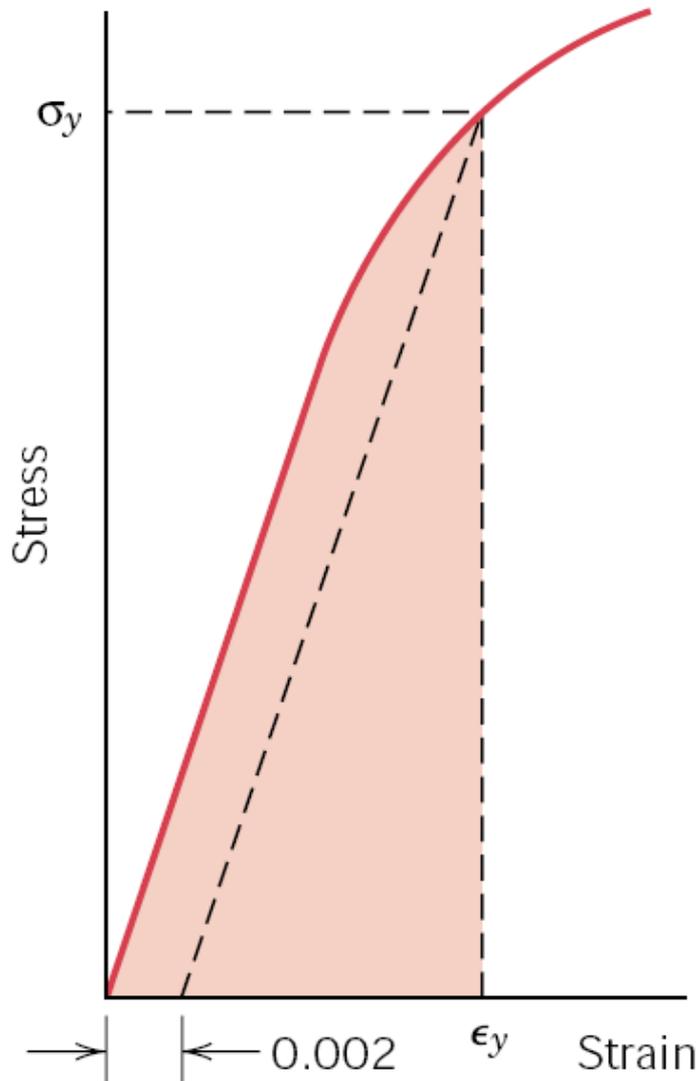




Tanker S.S. Schenectady fractured a day after its launch in January 1941<sup>3</sup>.

# Resiliência

Capacidade de um material absorver energia quando deformado na região elástica e, depois, com o descarregamento, ter essa energia recuperada.



Módulo de resiliência  
[J/m<sup>3</sup>]:

$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma d\epsilon$$

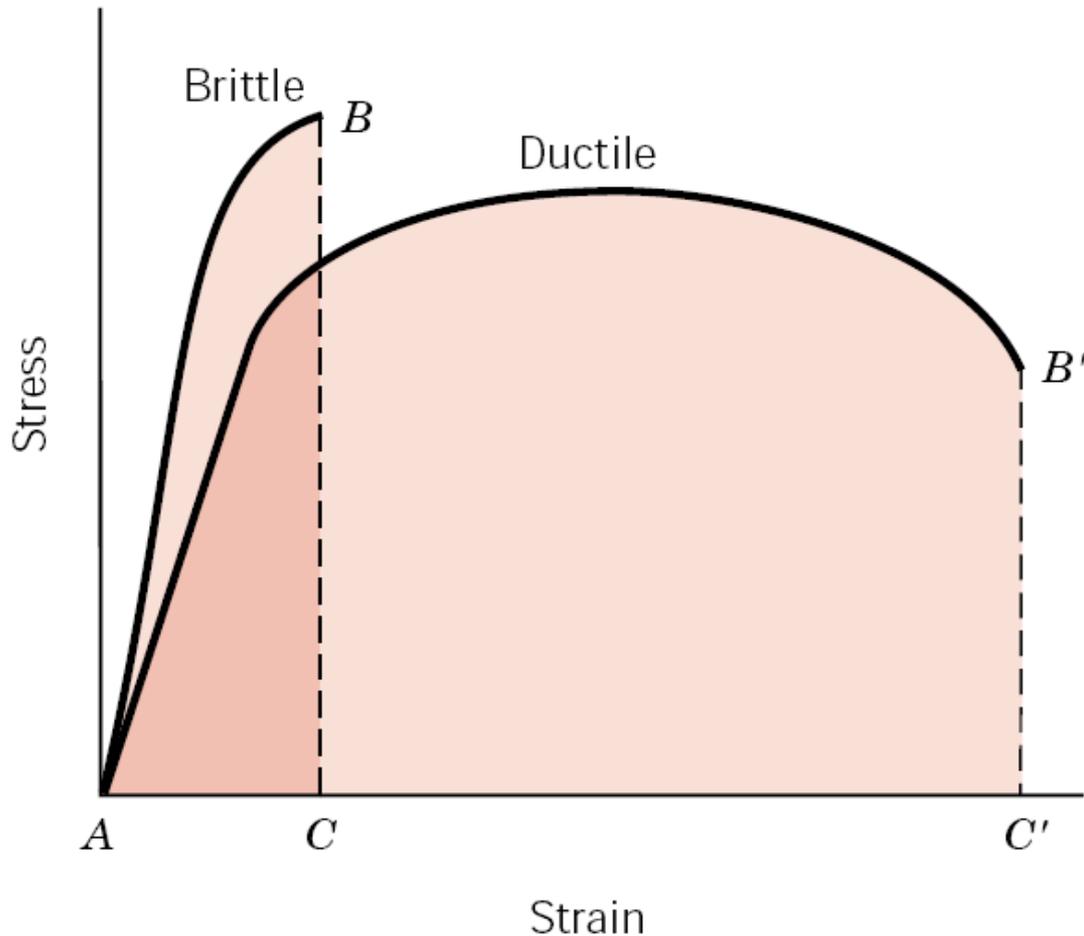
Supondo a região elástica linear:

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y$$

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y = \frac{1}{2} \sigma_y \left( \frac{\sigma_y}{E} \right) = \frac{\sigma_y^2}{2E}$$

Materiais com grande resiliência: molas

# Tenacidade

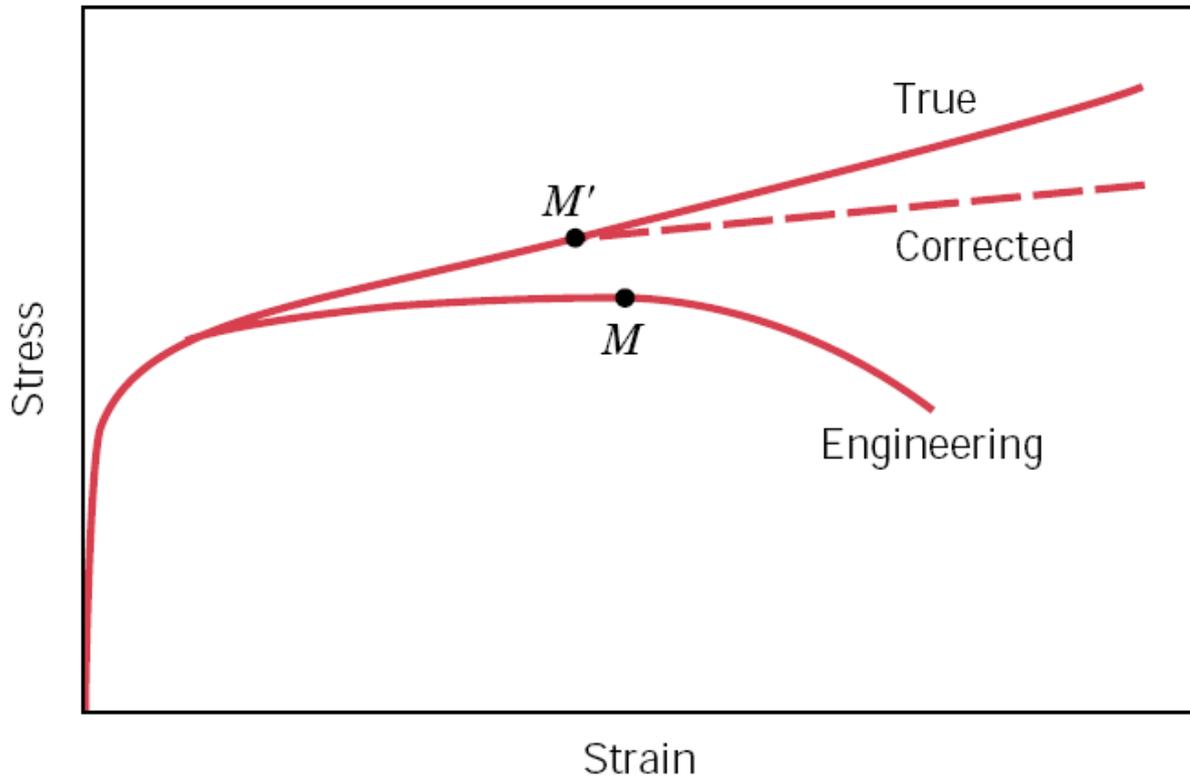


Medida da capacidade de um material de absorver energia até a fratura [quanto de energia deve ser fornecida para fraturar um material].

Tenacidade ao entalhe.

Tenacidade à fratura (trinca).

# Tensão verdadeira



$$\sigma_T = K\epsilon_T^n$$

Na região plástica até a estriçãoção (M).

$$\sigma_T = \frac{F}{A_I}$$

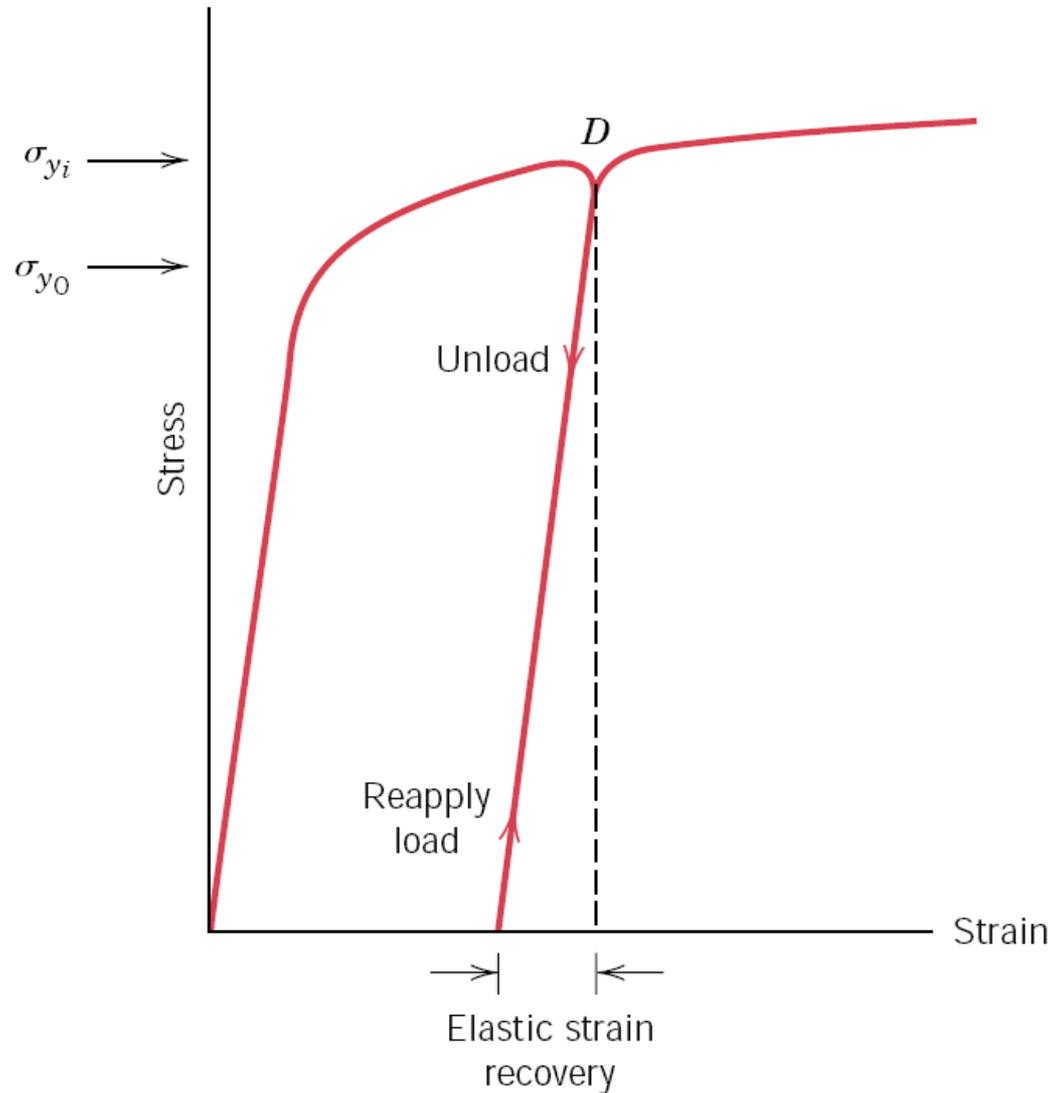
$$\epsilon_T = \ln \frac{l_I}{l_0}$$

$$A_I l_I = A_0 l_0$$

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

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

# Recuperação elástica



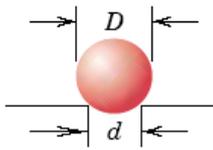
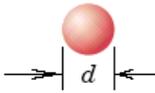
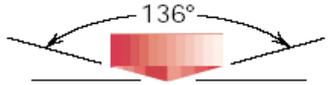
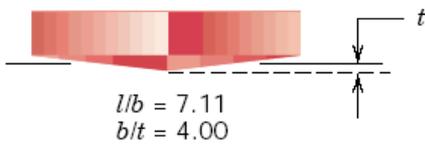
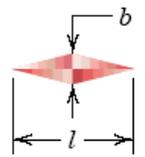
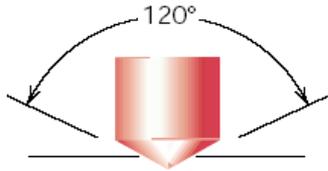
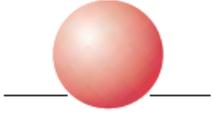
# Dureza

- Medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada (por exemplo, uma pequena impressão ou risco).
- Simples e barato;
- Não-destrutivo;
- Estimativa de outras propriedades mecânicas importantes (limite de resistência à tração e tenacidade).

# Dureza

- As medidas são relativas;
- Dependem:
  - do equipamento utilizado,
  - do método de indentação ou risco,
  - da carga,
  - taxa de indentação.

**Table 7.4** Hardness Testing Techniques

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number <sup>a</sup>
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			$P$	$HB = \frac{2P}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			$P$	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			$P$	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> <li>{ Diamond cone</li> <li>{ <math>\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}</math> in. diameter steel spheres</li> </ul>	  	  	<ul style="list-style-type: none"> <li>60 kg</li> <li>100 kg</li> <li>150 kg</li> </ul> } Rockwell  <ul style="list-style-type: none"> <li>15 kg</li> <li>30 kg</li> <li>45 kg</li> </ul> } Superficial Rockwell	

<sup>a</sup> For the hardness formulas given,  $P$  (the applied load) is in kg, while  $D$ ,  $d$ ,  $d_1$ , and  $l$  are all in mm.

**Source:** Adapted from H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*. Copyright © 1965 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.

# Dureza Rockwell

- Mede-se a diferença de profundidade de penetração resultantes de uma carga inicial e uma principal maior.
- Tem várias escalas.

**Table 7.5a** Rockwell Hardness Scales

<i>Scale Symbol</i>	<i>Indenter</i>	<i>Major Load (kg)</i>
A	Diamond	60
B	$\frac{1}{16}$ in. ball	100
C	Diamond	150
D	Diamond	100
E	$\frac{1}{8}$ in. ball	100
F	$\frac{1}{16}$ in. ball	60
G	$\frac{1}{16}$ in. ball	150
H	$\frac{1}{8}$ in. ball	60
K	$\frac{1}{8}$ in. ball	150

**Table 7.5b** Superficial Rockwell Hardness Scales

<i>Scale Symbol</i>	<i>Indenter</i>	<i>Major Load (kg)</i>
15N	Diamond	15
30N	Diamond	30
45N	Diamond	45
15T	$\frac{1}{16}$ in. ball	15
30T	$\frac{1}{16}$ in. ball	30
45T	$\frac{1}{16}$ in. ball	45
15W	$\frac{1}{8}$ in. ball	15
30W	$\frac{1}{8}$ in. ball	30
45W	$\frac{1}{8}$ in. ball	45

**Utilizado para corpos de prova mais finos.**

# Cuidados no ensaio

- Corpos de prova de espessura pelo menos 10x maior que a profundidade da penetração;
- Distância da aresta e de outras indentações de pelo menos 3x o diâmetro da indentação;
- Não empilhar corpos de prova;
- Acabamento superficial;
- Medidas automatizadas.

# Dureza Brinell

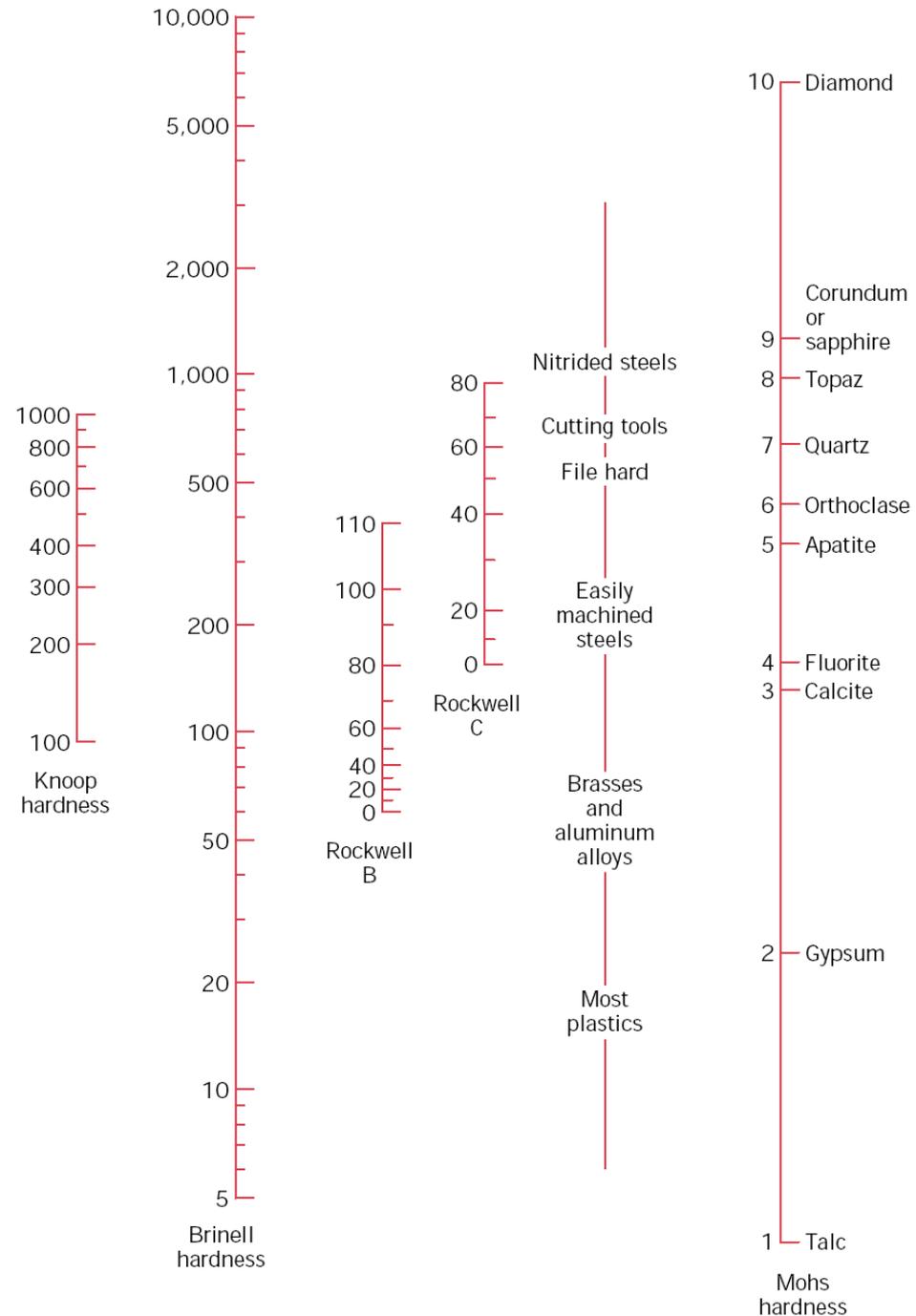
- Mede-se o diâmetro da indentação;
- Indentador de 10 mm;
- Apenas uma escala;
- Depende da carga, entre 500 kg e 3000 kg!
- Há necessidade de um microscópio.

# Dureza Vickers e Knoop

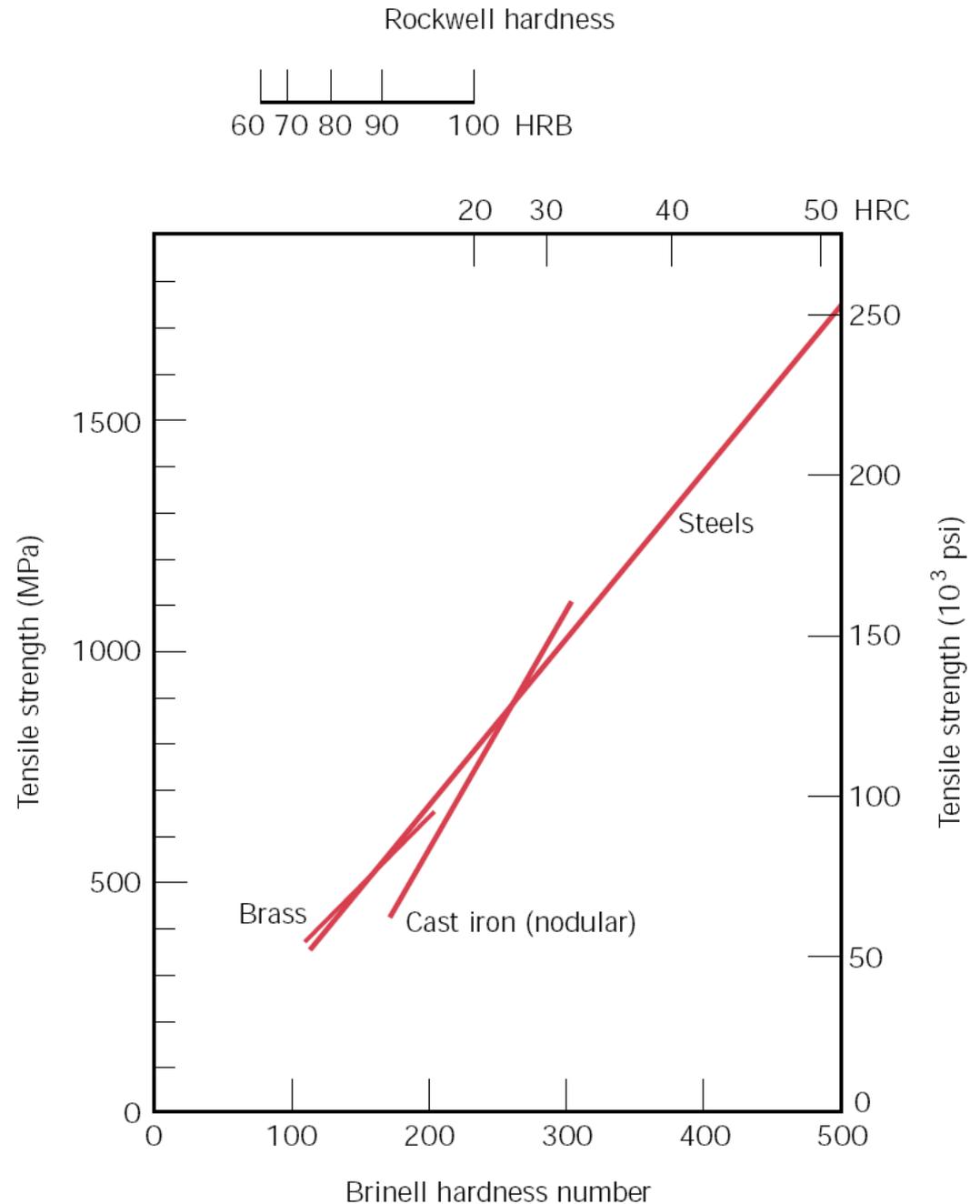
- Indentador piramidal;
- Cargas muito menores (1 a 1000 g);
- Necessitam acabamento superficial.

# Conversão de durezas

- Depende do material!!!
- É empírica.
- Para aços funciona bem.



# Correlação entre Limite de Resistência à Tração e Dureza



# Comparação entre materiais

**Table 7.6** Approximate Knoop Hardness (100 g load) for Seven Ceramic Materials

<i>Material</i>	<i>Approximate Knoop Hardness</i>
Diamond (carbon)	7000
Boron carbide ( $B_4C$ )	2800
Silicon carbide (SiC)	2500
Tungsten carbide (WC)	2100
Aluminum oxide ( $Al_2O_3$ )	2100
Quartz ( $SiO_2$ )	800
Glass	550

# Variabilidade nas Propriedades dos Materiais

- Método de ensaio;
- Procedimento de fabricação dos corpos de prova;
- Influência do operador;
- Calibração do equipamento;
- Homogeneidade do material;
- Variações durante a fabricação...

# Valor típico: média

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

# Grau de dispersão ou espalhamento

$$s = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1} \right]^{1/2}$$

# Fatores de projeto/segurança

$$\sigma_w = \frac{\sigma_y}{N}$$