



**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais**

**COMPORTAMENTO MECÂNICO**  
**DOS MATERIAIS**  
**PARTE I**

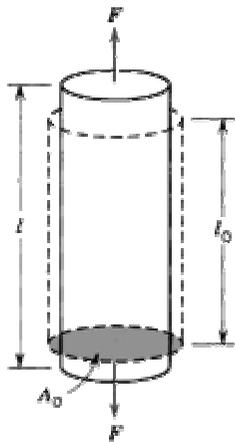
**PMT 2100 - Introdução à Ciência dos**  
**Materiais para Engenharia**  
**2º semestre de 2005**

# Roteiro da aula

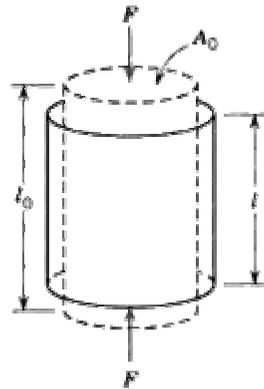
- Conceitos de tensão e de deformação
- Ensaio de tração
  - Tensão de engenharia x deformação de engenharia
  - Tensão real x deformação real
  - Propriedades de tração dos metais
  - Propriedades de tração dos materiais cerâmicos
  - Propriedades de tração dos materiais poliméricos
  - Efeito da temperatura
- Ensaio de dureza
  - Conceituação
  - Tipos de ensaios
  - Dureza de alguns materiais.

## Conceitos de Tensão e de Deformação

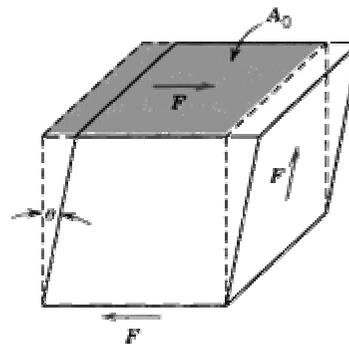
- Tensões : tração, compressão, cisalhamento e torção.
- Deformações: elásticas e plásticas.



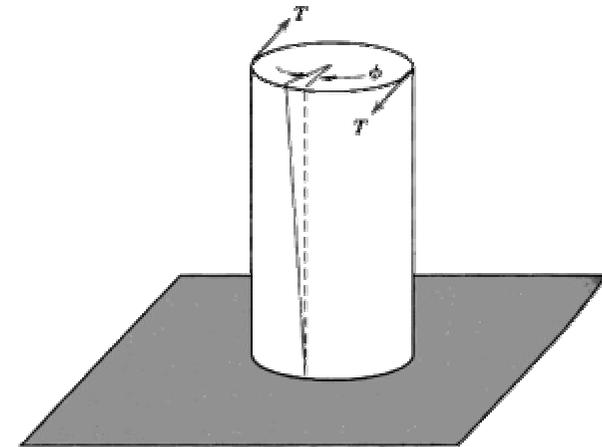
*Tração*



*Compressão*



*Cisalhamento*



*Torção*

PARA ESFORÇOS  
DE TRAÇÃO :

- Tensão de engenharia:  $\sigma = F/A_0$
- Deformação de engenharia:  $\epsilon = (l_f - l_0)/l_0 = \Delta l/l_0$

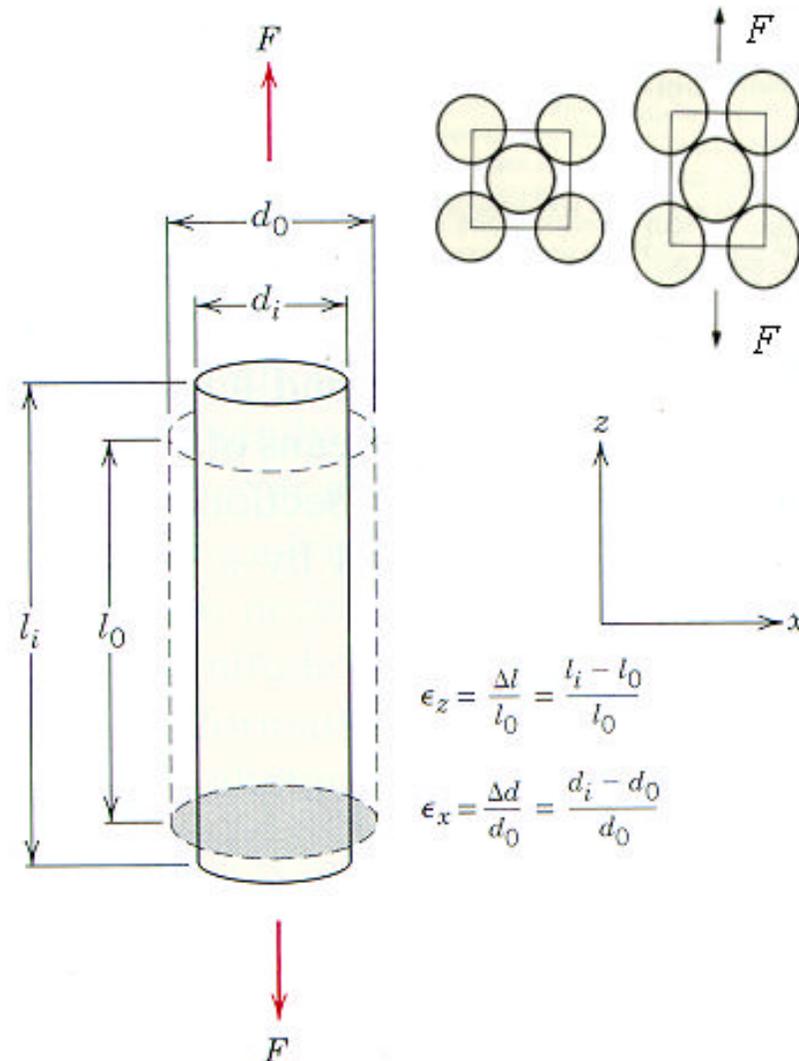
# Tensão e de Deformação : Tração Simples

4

- Tração Simples  $\Rightarrow$  Tensão *perpendicular* à superfície
- Tensão  $\sigma$  (de engenharia)  
$$\sigma = F / A_0$$
- Deformação  $\varepsilon$  (de engenharia)  
$$\varepsilon = (l_f - l_0) / l_0 = \Delta l / l_0$$
- Na deformação por tração, normalmente ocorre:
  - Alongamento ao longo do eixo de aplicação da força
  - Contração ao longo dos dois outros eixos
- Coeficiente de Poisson  $\nu$  :  
$$\nu = - ( \varepsilon_x / \varepsilon_z ) = - ( \varepsilon_x / \varepsilon_z )$$

- Módulo de Elasticidade E

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



# Tensão e de Deformação : Cisalhamento Simples

- Cisalhamento Simples  $\Rightarrow$  Tensão *paralela* às superfícies

- Tensão  $\tau$  (de engenharia)

$$\tau = F / A_0$$

- Deformação  $\gamma$

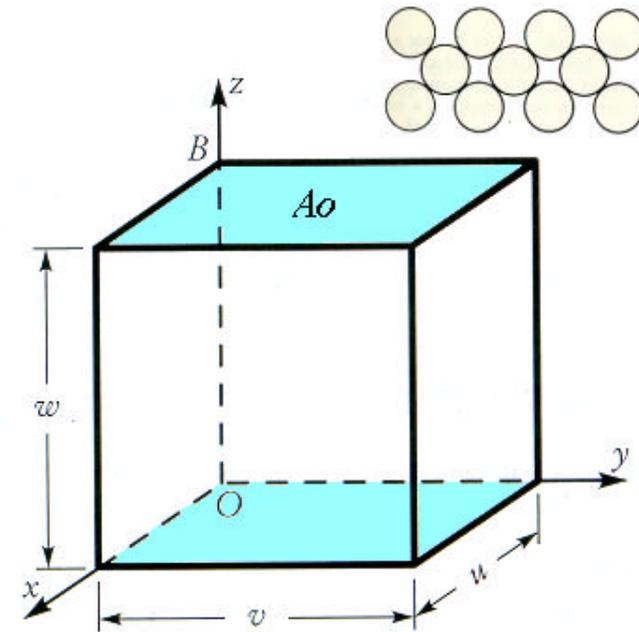
$$\gamma = \text{tg } \theta$$

- Módulo de Cisalhamento  $G$

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

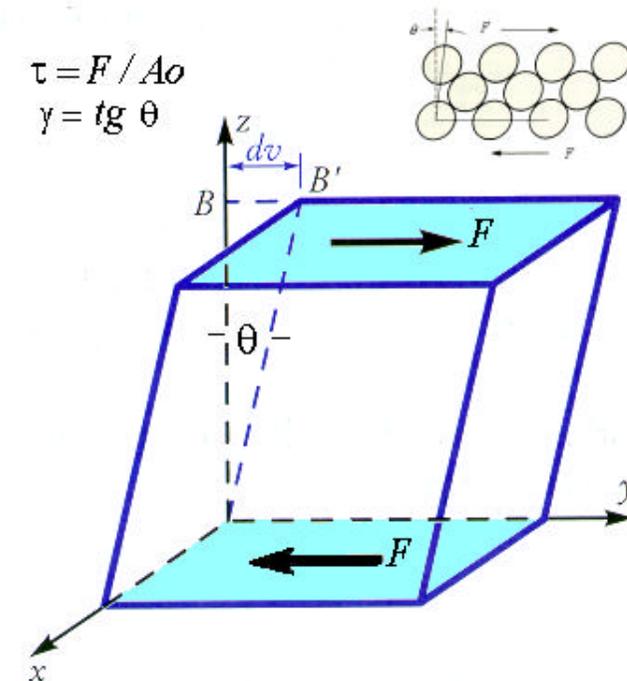
- Relação entre  $E$  e  $G$  :

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



5

Elemento do material antes do cisalhamento



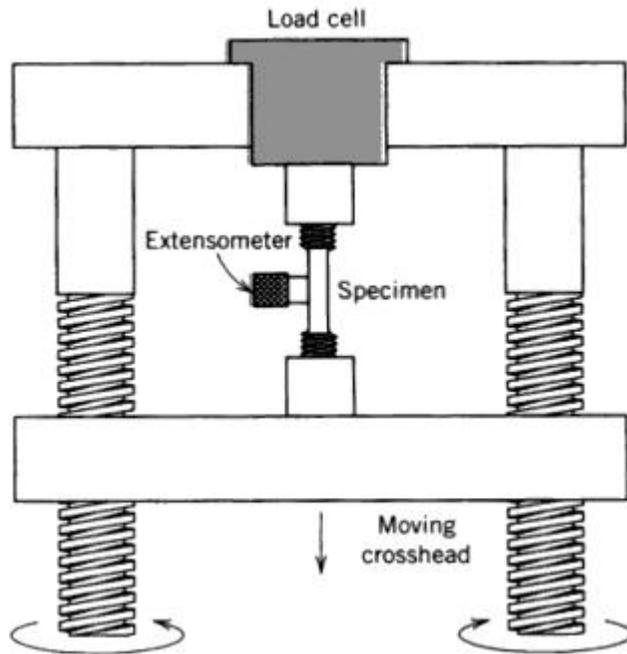
$$\tau = F / A_0$$

$$\gamma = \text{tg } \theta$$

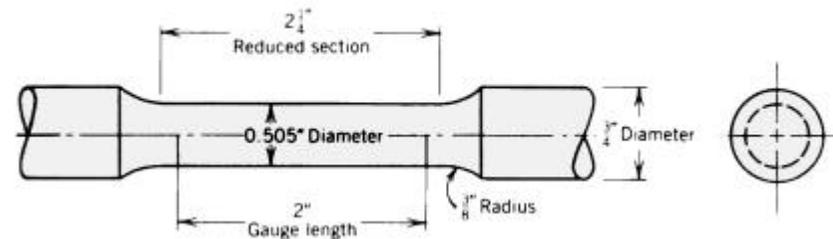
Elemento do material sob cisalhamento

# Ensaio de tração

6



*Máquina de ensaio*



*Corpo de prova*

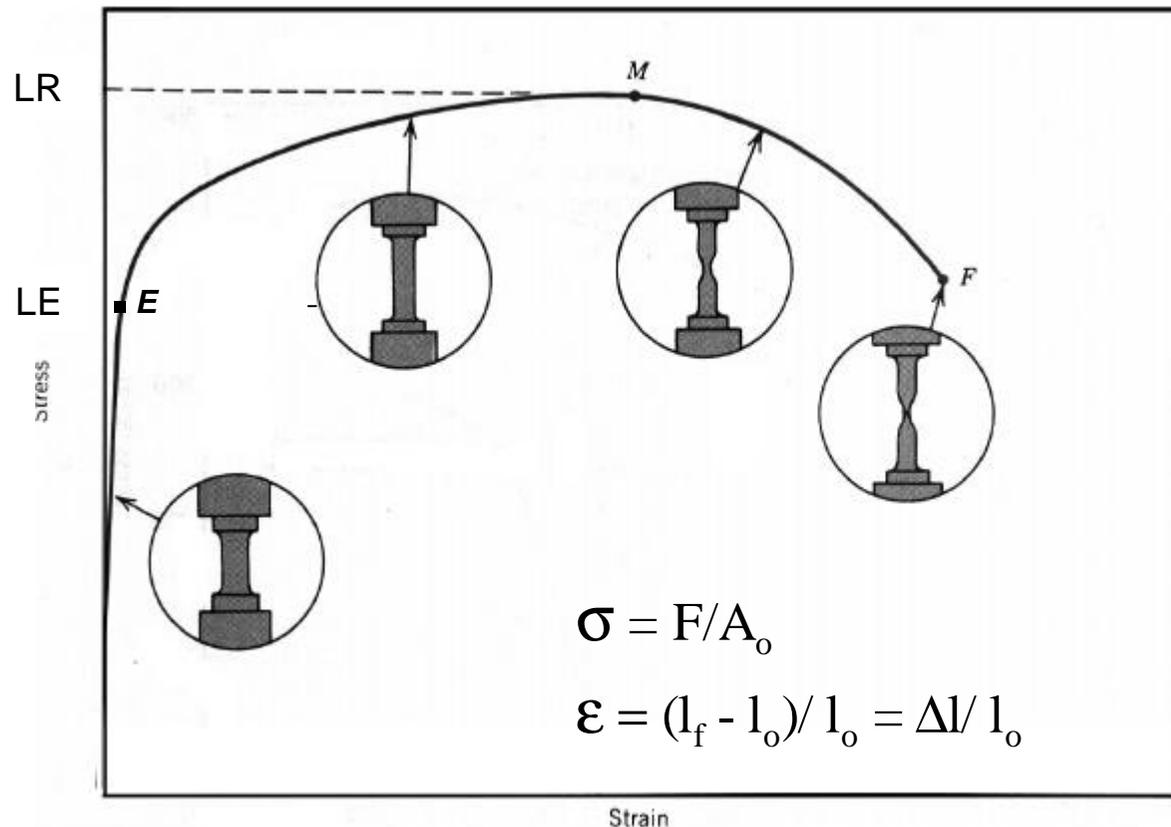
As medidas de **tensão** são feitas por meio de uma **célula de carga**

As medidas de **deformação** são feitas por meio de um **extensômetro** ou diretamente sobre o corpo de prova

Os corpos de prova usados nos ensaios de tração podem ter diferentes formas e dimensões.

# Ensaio de tração

7



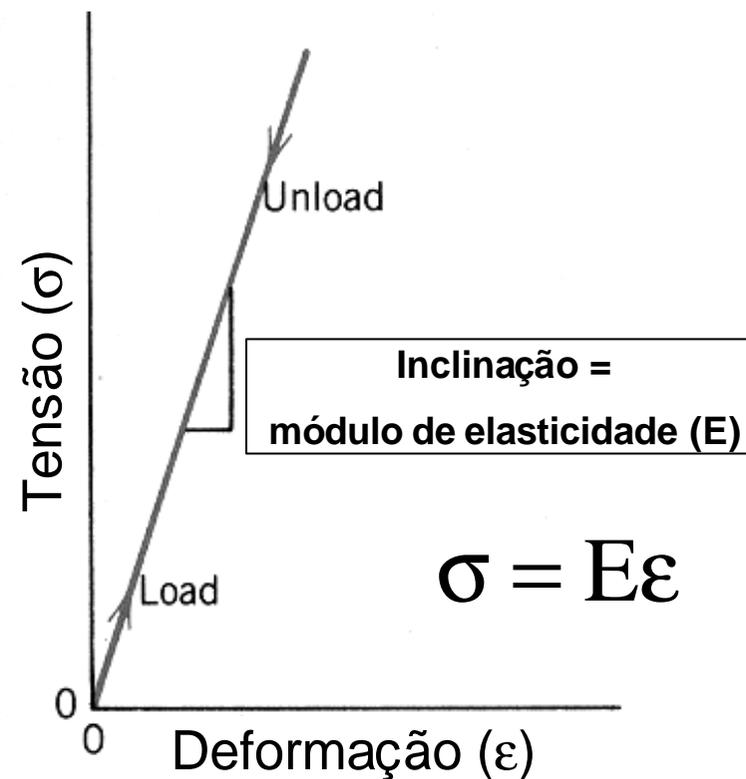
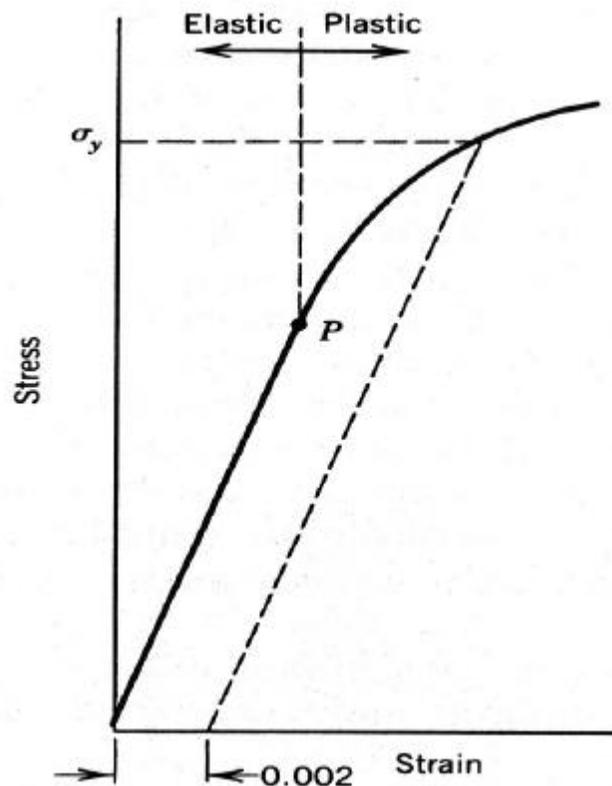
*Comportamento típico  
tensão – deformação  
de um metal durante  
ensaio de tração*

- O ponto **E** corresponde ao **limite de escoamento (LE)**; a deformação a partir do ponto E é **plástica**, e antes do ponto E é **elástica**.
- A tensão máxima **M** durante o ensaio corresponde ao **limite de resistência (LR)**.
- A deformação em **M** corresponde ao **alongamento uniforme ( $\epsilon_u$ )**.
- Deformações **maiores** que  $\epsilon_u$  ocorrem com **estricção**.
- A **fratura** ocorre no ponto **F**. A deformação na fratura é o **alongamento total ( $\epsilon_T$ )**

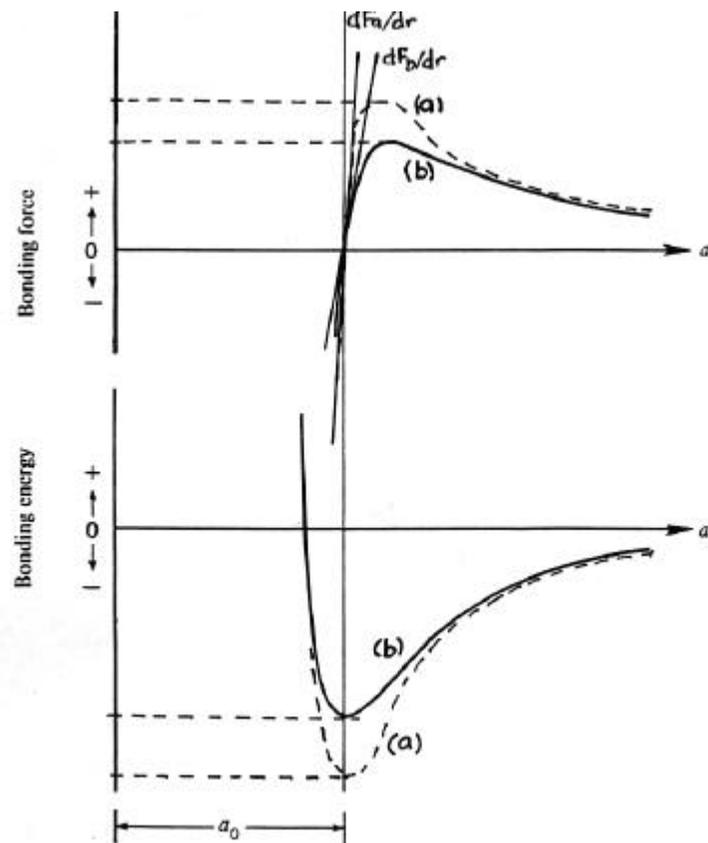
# Curva tensão-deformação

8

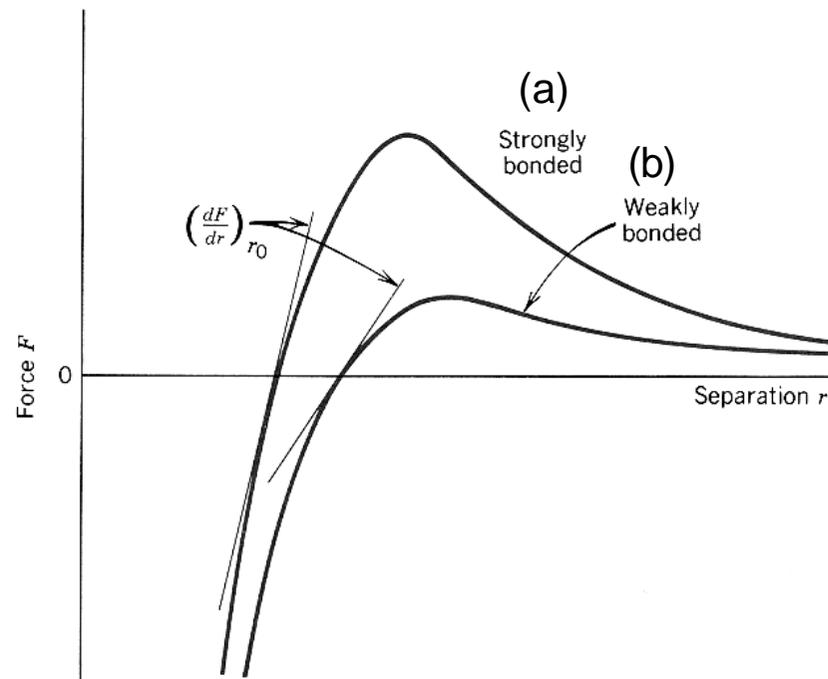
- Para a maioria dos materiais metálicos, as deformações puramente elásticas ocorrem até deformações de  $\sim 0,5\%$ .
- Quando as deformações ultrapassam esse limite, a relação entre a tensão e a deformação deixa de ser linear (lei de Hook), produzindo-se deformação permanente (não recuperável), chamada **deformação plástica**.



## Deformação elástica



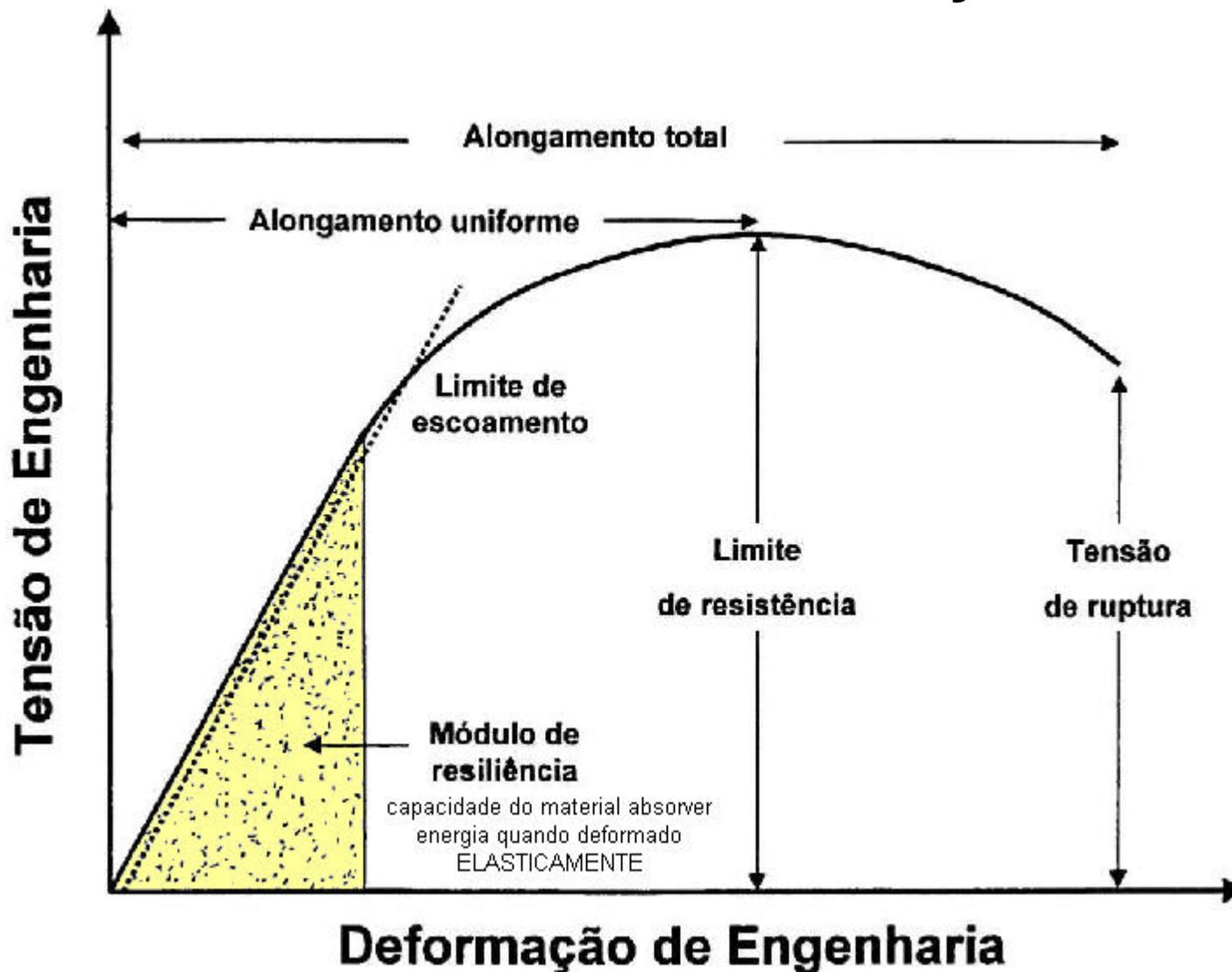
O módulo de elasticidade aumenta com a tangente da curva de força de ligação no ponto onde a força é nula,  $(dF_N/dr)$ , para  $F_N=0$



Força de ligação em função da distância interatômica para: (a) átomos fortemente ligados e (b) átomos fracamente ligados.

# Curva tensão x deformação

10



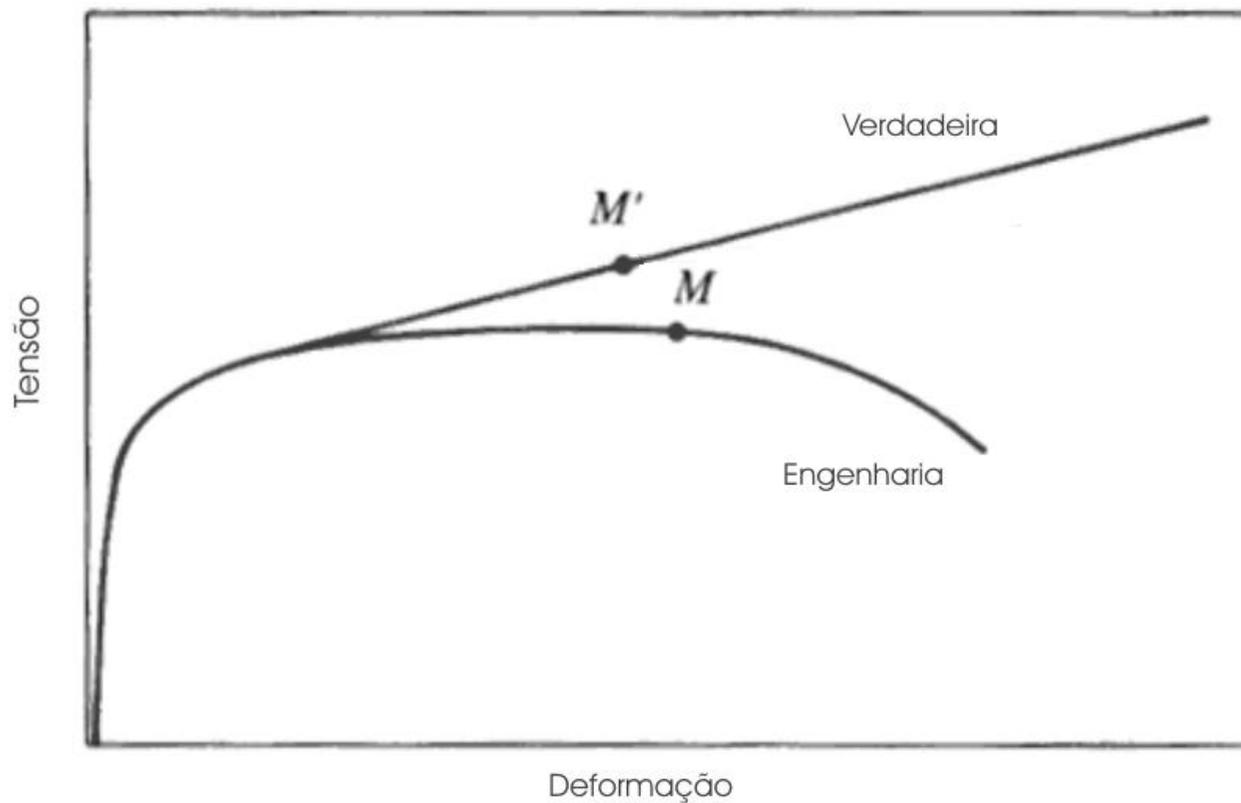
Porcentagem de Alongamento  $\% \mathbf{\epsilon}_T$

$$\% \mathbf{e}_T = \left( \frac{I_f - I_o}{I_o} \right) \times 100$$

Porcentagem de redução de área  $\% RA$

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

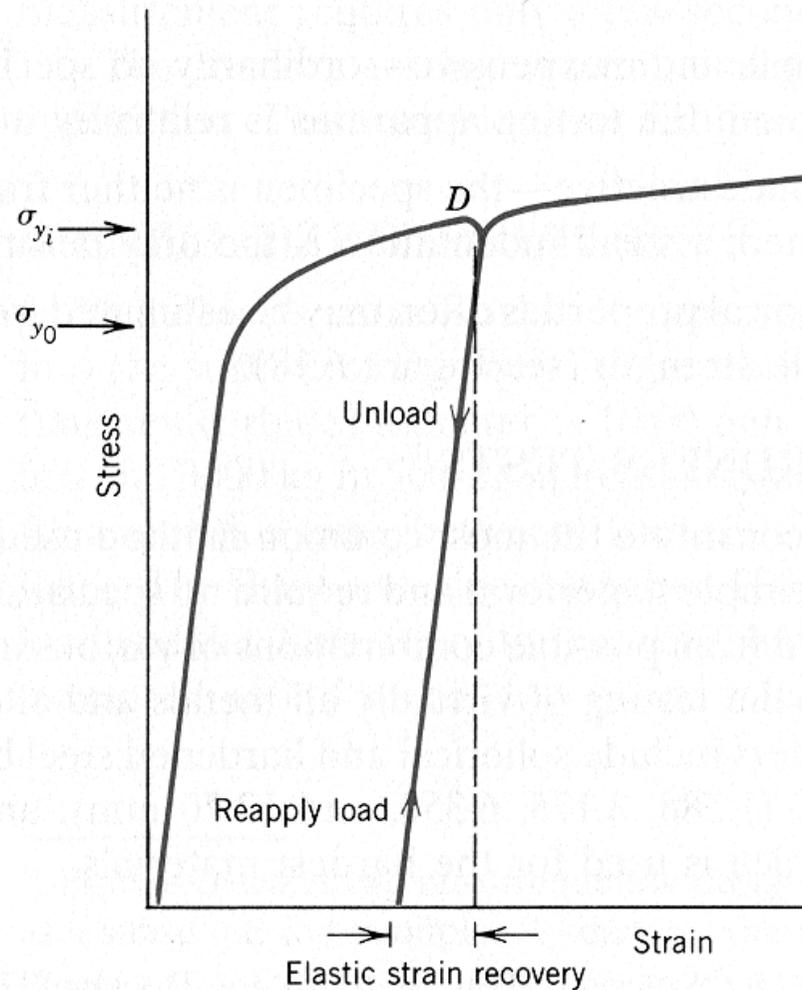
## Curva tensão real x deformação real



$$\sigma_{\text{real}} = \frac{F}{A_i} \quad \epsilon_{\text{real}} = \ln \frac{l_i}{l_0} \quad \sigma_{\text{real}} = \sigma(1 + \epsilon) \quad \epsilon_{\text{real}} = \ln(1 + \epsilon)$$

# Recuperação elástica e encruamento

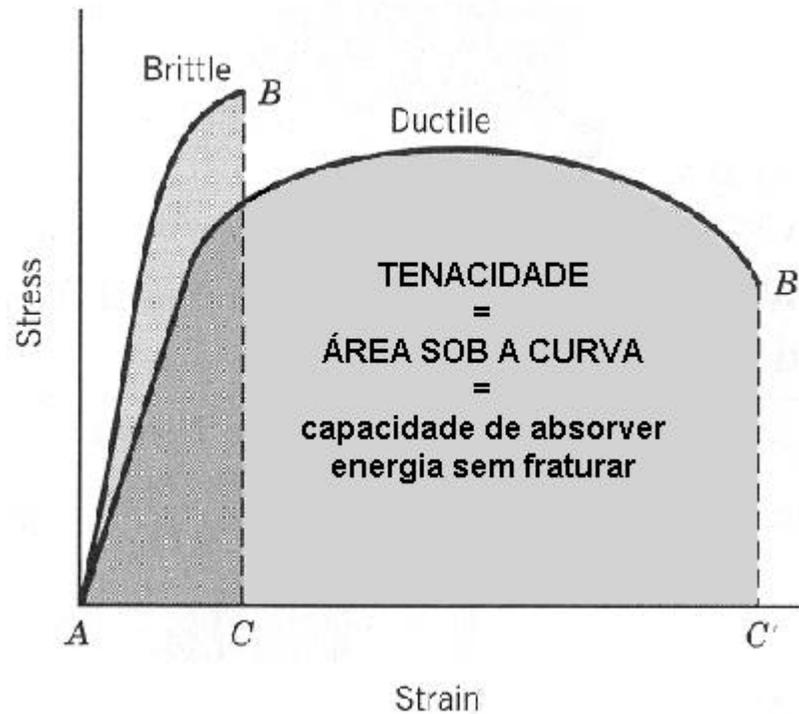
12



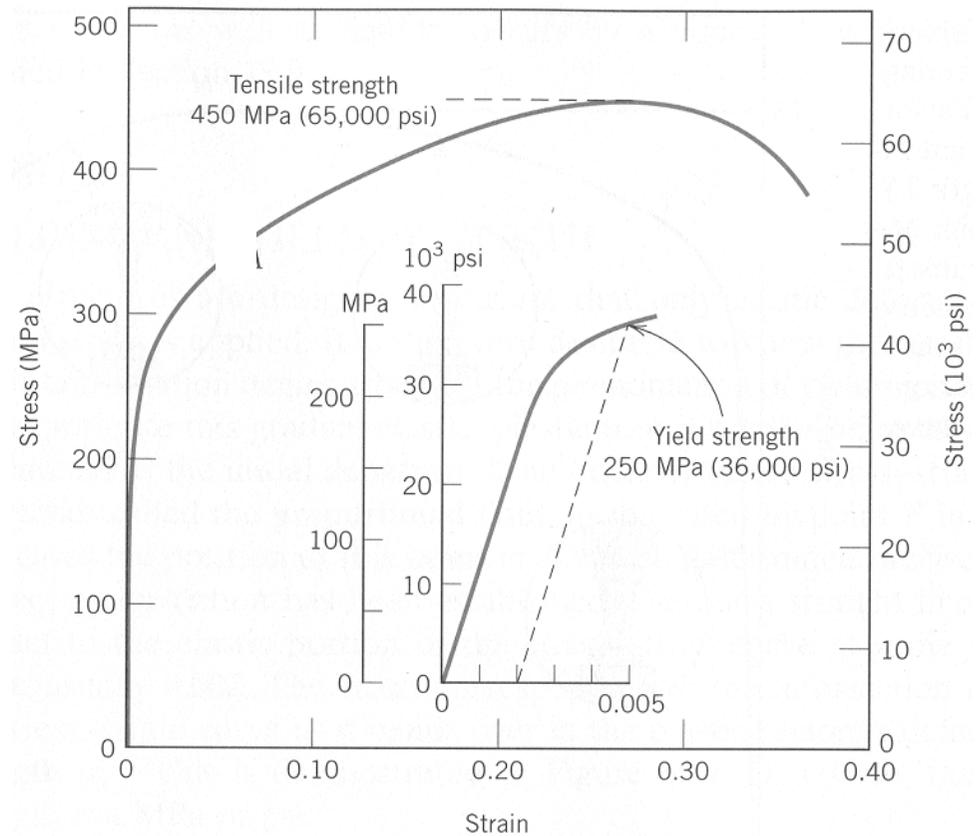
- O material com limite de escoamento  $\sigma_{y_0}$  é tracionado até D.
- Após descarregamento sofre **recuperação elástica**.
- Quando recarregado, por ter sofrido **encruamento** apresenta limite de escoamento maior  $\sigma_{y_i}$

# Materiais dúcteis e frágeis

13



*Curva tensão x deformação: AB - material frágil e AB' - material dúctil*



*Curva tensão x deformação para o latão*

## Propriedades de tração de alguns metais

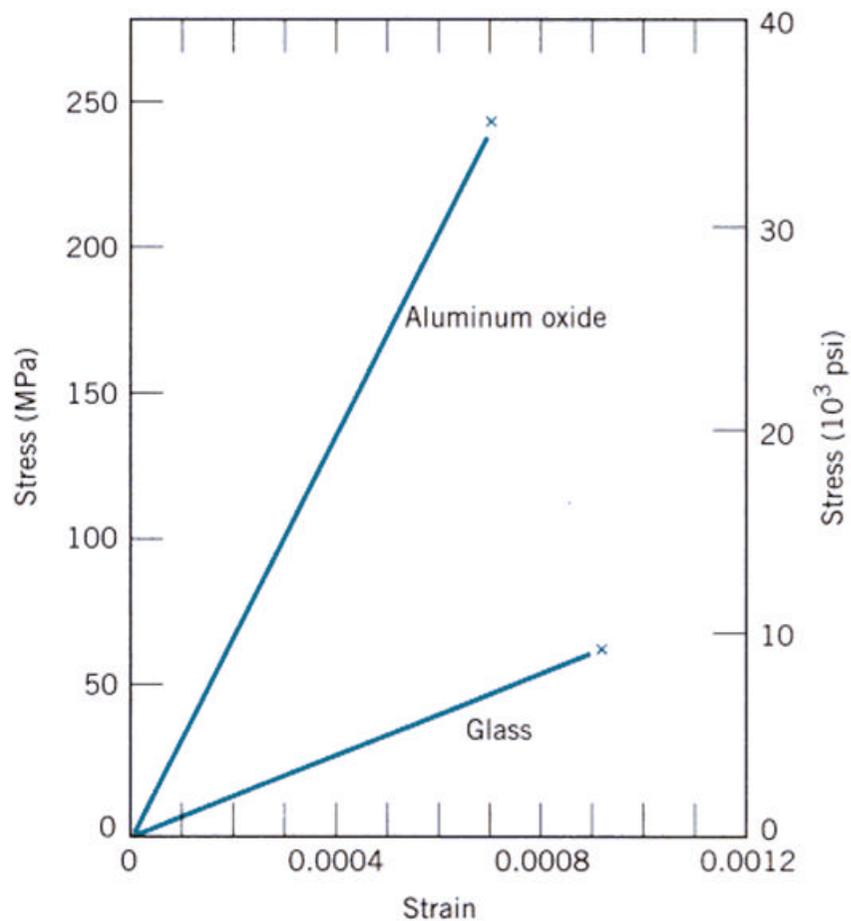
<i>Metal Alloy</i>	<i>Yield Strength MPa (ksi)</i>	<i>Tensile Strength MPa (ksi)</i>	<i>Ductility, %EL [in 50 mm (2 in.)]</i>
Aluminum	35 (5)	90 (13)	40
Copper	69 (10)	200 (29)	45
Brass (70Cu–30Zn)	75 (11)	300 (44)	68
Iron	130 (19)	262 (38)	45
Nickel	138 (20)	480 (70)	40
Steel (1020)	180 (26)	380 (55)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

***Yield strength*** : tensão (ou limite) de escoamento

***Tensile strength*** : tensão de ruptura

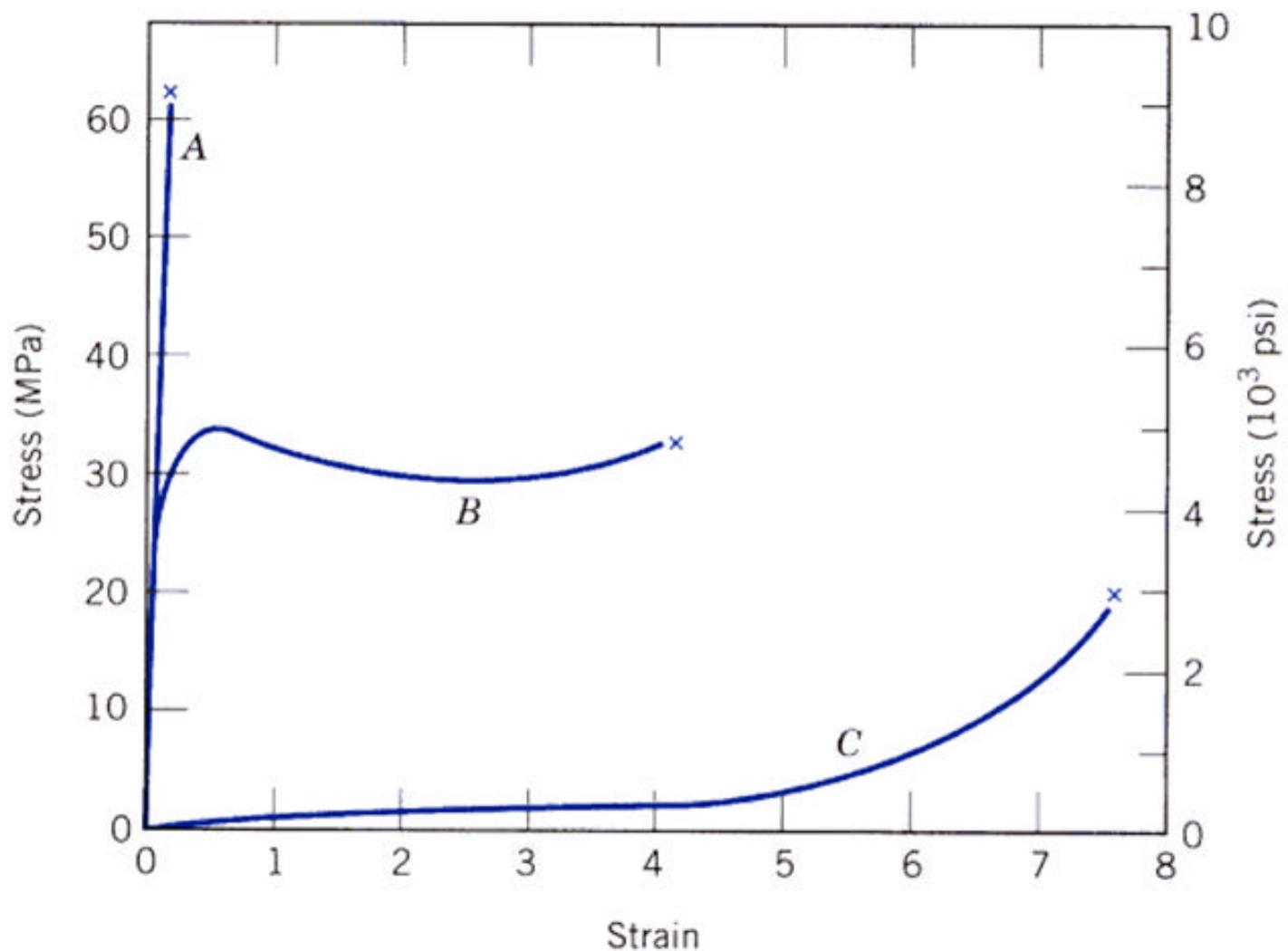
***Ductility*** : ductilidade (medida pela porcentagem de alongamento)

## Curvas de Tração de Materiais Frágeis (Materiais Cerâmicos)



*Curva tensão x deformação para a alumina e para o vidro.*

## Curvas de Tração de Materiais Poliméricos

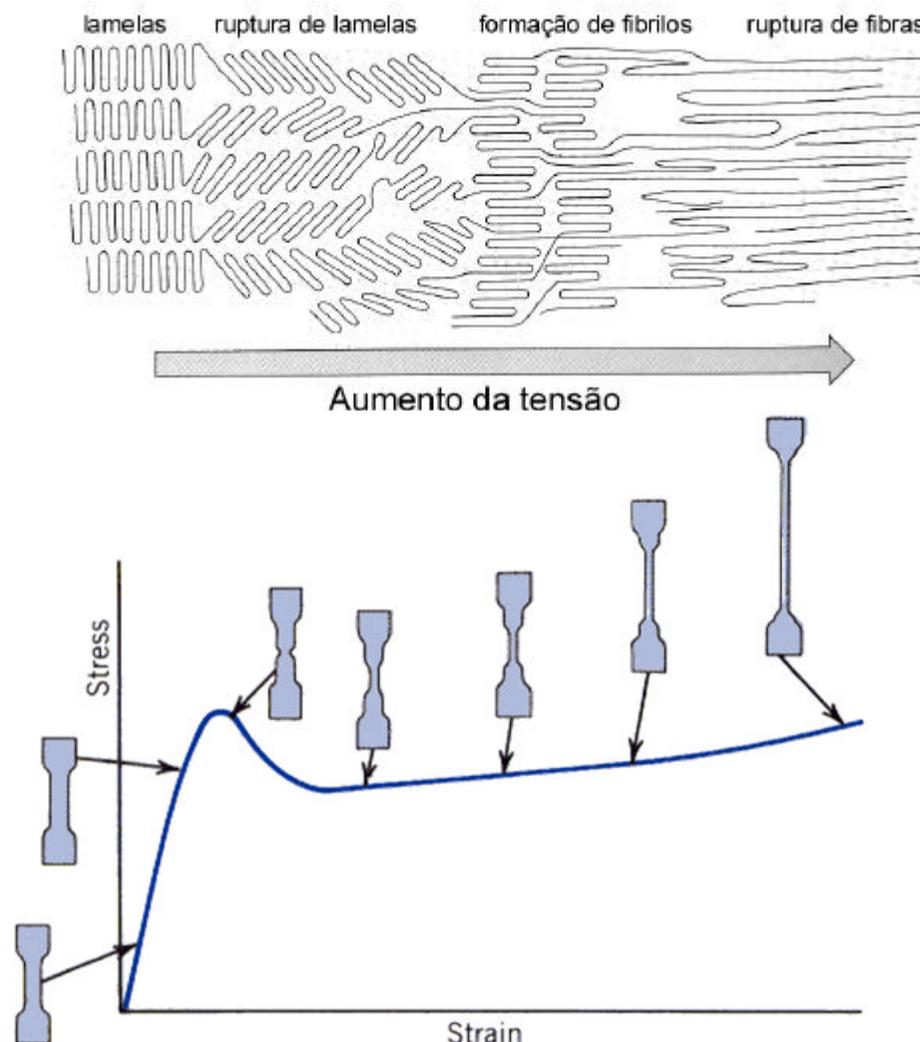


Relação entre a tensão e a deformação para:  
**A**- polímero frágil;  
**B**- polímero plástico;  
**C**- elastômero

## Curvas de tração de materiais poliméricos parcialmente cristalinos

O limite de escoamento superior corresponde ao início da formação de pescoço (estricção). A tensão cai até o limite inferior de escoamento devido à diminuição da seção resistente.

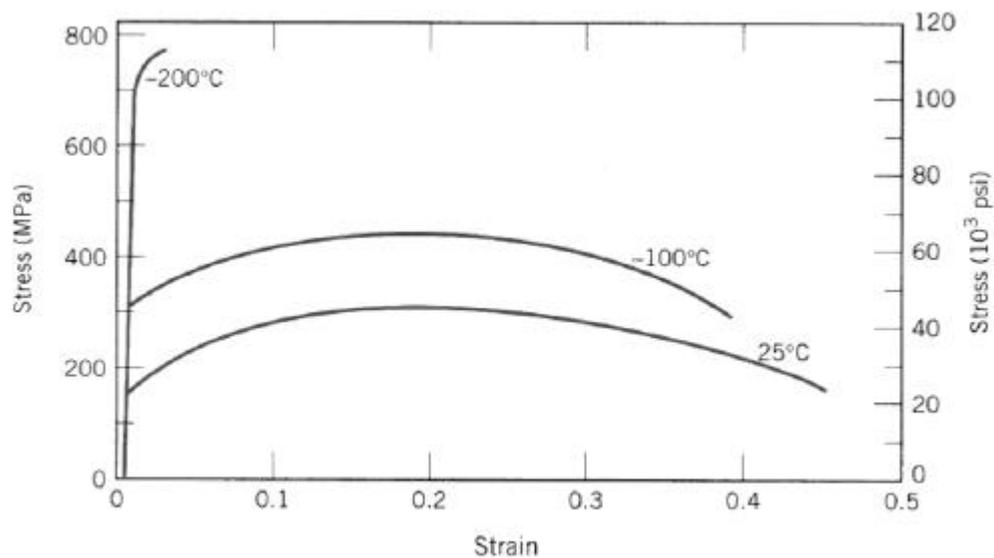
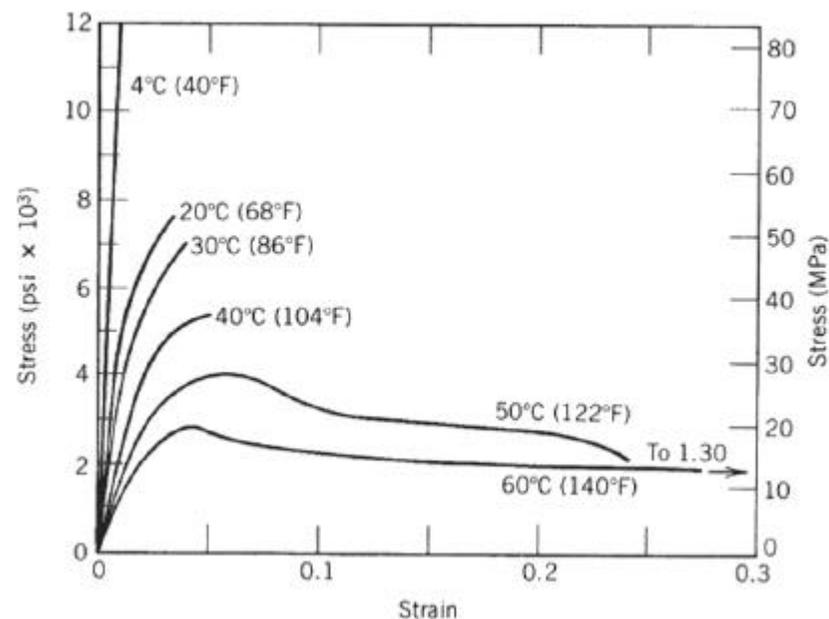
Na região do pescoço, as cadeias moleculares se orientam, o que leva a um aumento localizado de resistência. Em consequência, a deformação plástica prossegue em uma região vizinha à do pescoço (de menor resistência), resultando em um aumento do comprimento do pescoço. A tensão de escoamento aumenta devido ao aumento da resistência do polímero (alinhamento de cadeias).



Nos metais, a deformação plástica se concentra no pescoço logo após a sua formação, levando rapidamente à ruptura.

## Efeito da temperatura sobre as curvas tensão x deformação

Efeito da temperatura sobre as curvas tensão x deformação de um acrílico.



Curvas tensão x deformação de engenharia para o ferro em três temperaturas diferentes

# Dureza



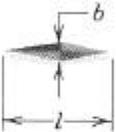
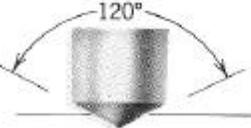
- ✓ O ensaio consiste na aplicação de uma *carga* conhecida através de um *penetrador* de geometria conhecida e na medição da *área* da impressão produzida na superfície do corpo de prova.
- ✓ Ensaio de grande importância tecnológica (controle de qualidade)
- ✓ Dureza, ao contrário do limite de escoamento e da tenacidade à fratura, não é um parâmetro característico do material (depende da máquina, da carga, do tipo de penetrador, etc...)

# Dureza

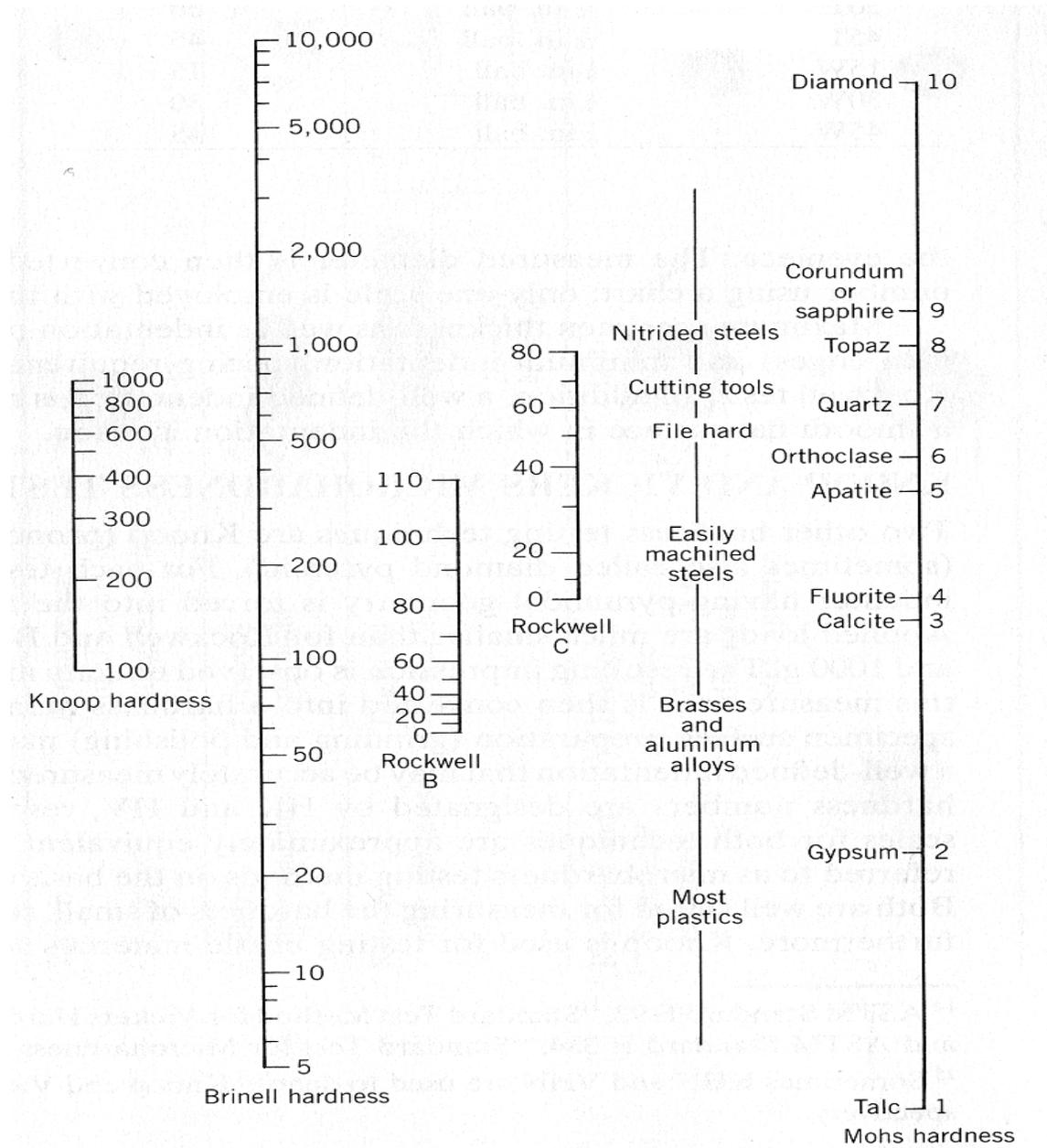
As primeiras medidas de dureza foram feitas comparando a capacidade dos diversos materiais de riscarem uns aos outros (Dureza Mohs).

Dureza: resistência de um material à deformação (plástica e elástica) localizada.

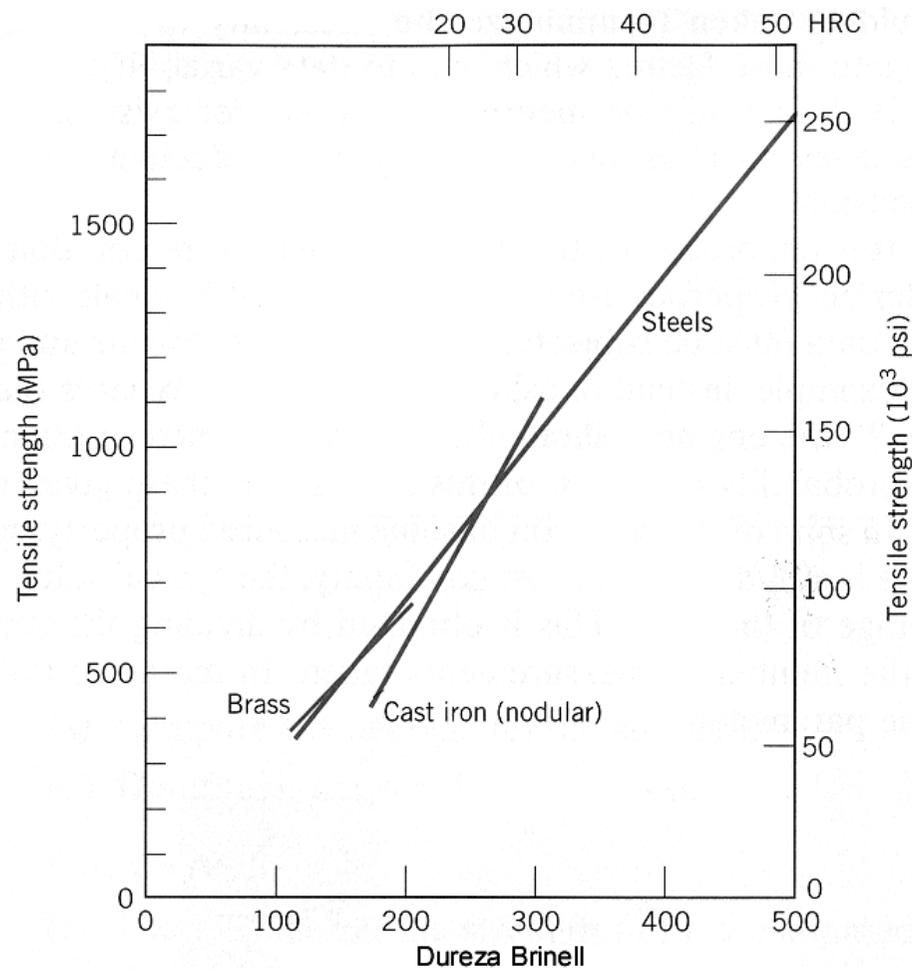
## Ensaio de Dureza

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	 $l/b = 7.11$ $b/t = 4.00$		P	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> <li>⎧ Diamond cone</li> <li>⎧ 1/8, 1/4, 1/2 in. diameter steel spheres</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>60 kg } Rockwell</li> <li>100 kg }</li> <li>150 kg }</li> <li>15 kg } Superficial Rockwell</li> <li>30 kg }</li> <li>45 kg }</li> </ul>	
					

# Comparação da dureza de alguns materiais



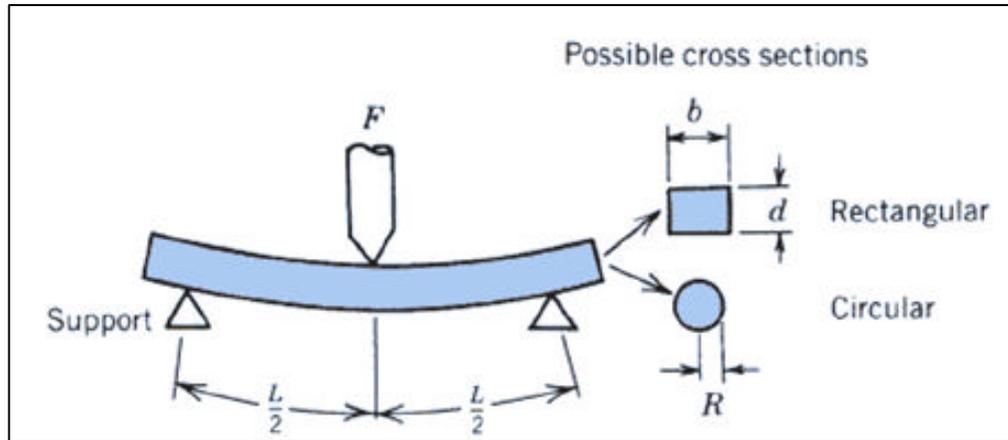
## Relação entre Dureza e Limite de Resistência



Para a maioria dos aços:

$$LR(\text{MPa}) = 3,45 \times \text{HB}$$

# O Ensaio de Flexão (Materiais Cerâmicos)



$\sigma = \text{stress} = \frac{Mc}{I}$

where  $M$  = maximum bending moment  
 $c$  = distance from center of specimen to outer fibers  
 $I$  = moment of inertia of cross section  
 $F$  = applied load

	$\frac{M}{F}$	$\frac{c}{d}$	$\frac{I}{d^3}$	$\frac{\sigma}{F}$
Rectangular	$\frac{FL}{4}$	$\frac{d}{2}$	$\frac{bd^3}{12}$	$\frac{3FL}{2bd^2}$
Circular	$\frac{FL}{4}$	$R$	$\frac{\pi R^4}{4}$	$\frac{FL}{\pi R^3}$

**Table 13.5** Tabulation of Flexural Strength (Modulus of Rupture) and Modulus of Elasticity for Ten Common Ceramic Materials

Material	Flexural Strength		Modulus of Elasticity	
	MPa	ksi	GPa	10 <sup>6</sup> psi
Silicon nitride (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )	700–1000	100–145	304	44
Zirconia <sup>a</sup> (ZrO <sub>2</sub> )	634	92	200	29
Silicon carbide (SiC)	552–862	80–125	430	62
Aluminum oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	275–550	40–80	393	57
Glass-ceramic (Pyroceram)	241	35	120	17
Mullite (3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub> )	185	27	145	21
Spinel (MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	110–245	16–35.5	260	38
Fused silica (SiO <sub>2</sub> )	110	16	73	11
Magnesium oxide (MgO)	105 <sup>b</sup>	15 <sup>b</sup>	225	33
Soda-lime glass	69	10	69	10

<sup>a</sup> Partially stabilized with 3 wt% MgO.

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

- **Capítulos do Callister tratados nesta aula**
  - Capítulo 6 : completo
  
- Outras referências importantes:
  - Van Vlack , L. - Princípios de Ciência dos Materiais, 3ª ed.
    - os temas tratados nesta aula estão dispersos pelo livro do Van Vlack; os itens que tratam mais objetivamente são os seguintes:
      - Itens 1-2 e 6-4