



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

# Comportamento Mecânico dos Materiais

## Parte I

**PMT 3110 - Introdução à Ciência dos Materiais para Engenharia**

## Roteiro da Aula

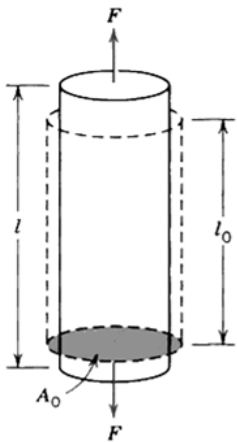
- ✓ Conceitos de tensão e de deformação
- ✓ Ensaio de tração
  - Tensão de engenharia x deformação de engenharia
  - Tensão real x deformação real
  - Propriedades de tração dos metais
  - Propriedades de tração dos materiais cerâmicos
  - Propriedades de tração dos materiais poliméricos
  - Efeito da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

# Conceitos de Tensão e Deformação

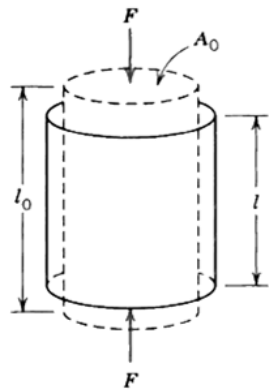
- O comportamento mecânico de um material reflete a sua resposta (ou **DEFORMAÇÃO**) a uma carga (ou **TENSÃO**) que esteja sendo aplicada sobre um corpo fabricado deste material.
- Algumas propriedades mecânicas importantes são a *resistência*, a *dureza*, a *ductilidade* e a *rigidez*.
- As *deformações* podem ser **ELÁSTICAS** ou **PLÁSTICAS**.
- As **DEFORMAÇÕES ELÁSTICAS** não são permanentes, isto é, são deformações que desaparecem quando a tensão aplicada é retirada. Dito de outra forma, as deformações elásticas são *reversíveis*, sendo resultado da ação de forças conservativas.
- As **DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS** são permanentes, isto é, permanecem após a tensão aplicada ser retirada. Deformações plásticas são *irreversíveis*, sendo acompanhadas por deslocamentos atômicos permanentes.

# Conceitos de Tensão e Deformação

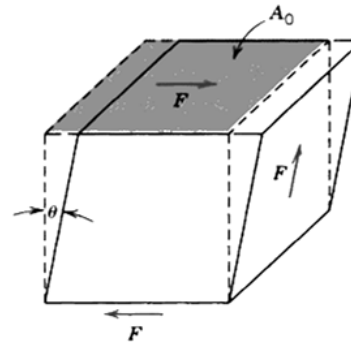
- As **TENSÕES** podem ser de **TRAÇÃO**, **COMPRESSÃO**, **CISALHAMENTO** ou **TORÇÃO**, **FLEXÃO** entre outras.



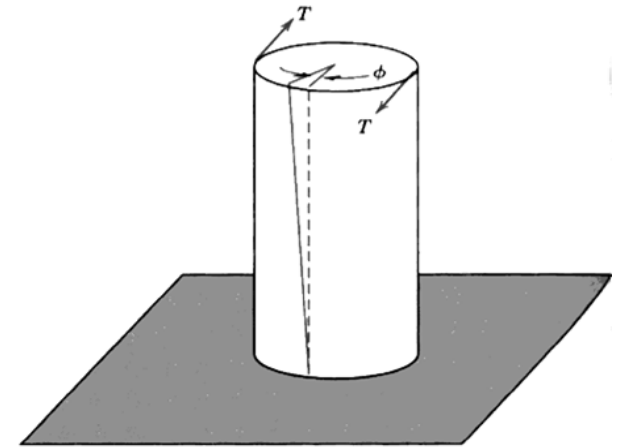
TRAÇÃO



COMPRESSÃO



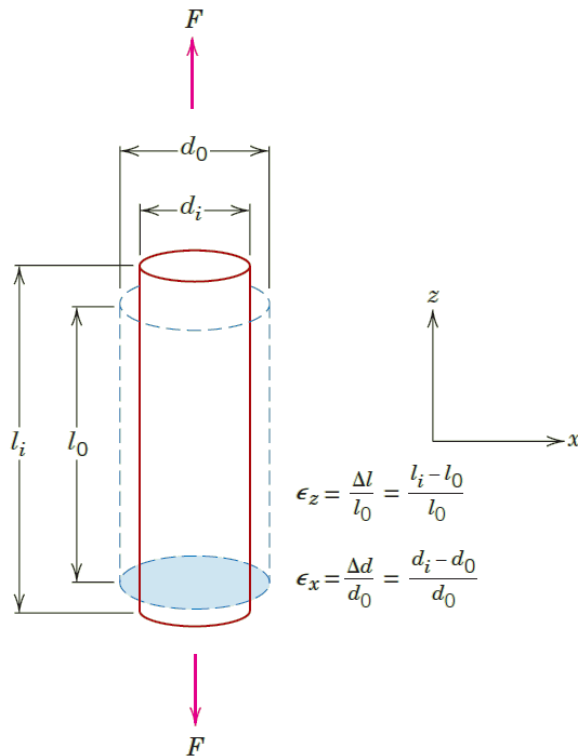
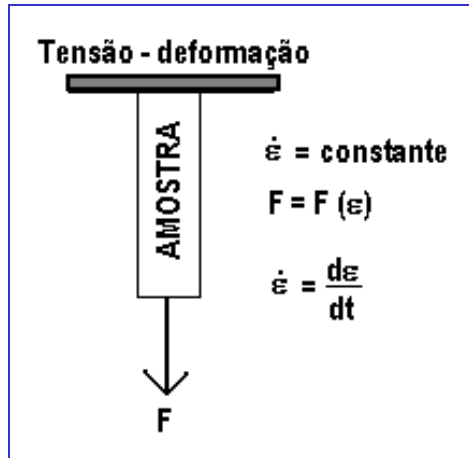
CISALHAMENTO



TORÇÃO

- Note que a tensão e a pressão são grandezas fisicamente análogas, ambas tendo unidades de força dividida por área (no Sistema Internacional: Newton/metro<sup>2</sup>).

# Tensão - Deformação: TRAÇÃO SIMPLES



- **TRAÇÃO SIMPLES (TENSÃO UNIAXIAL)**: força aplicada sobre o corpo é *perpendicular* às suas superfícies.
- Assumiremos que a reação à força de tração se distribui homogeneamente no sólido.

- **TENSÃO DE ENGENHARIA  $\sigma$**

$$\sigma = F / A_0$$

- **DEFORMAÇÃO DE ENGENHARIA  $\epsilon$**

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

- Na deformação por tração, normalmente ocorre:
  - ✓ *alongamento* ao longo do eixo de aplicação da força;
  - ✓ *contração* ao longo dos dois outros eixos.

Para Deformações Elásticas de Materiais Isotrópicos:

- **COEFICIENTE DE POISSON  $\nu$ :**

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

- **MÓDULO DE ELASTICIDADE (MÓDULO DE YOUNG ou MÓDULO DE RIGIDEZ)**

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

$E_{\text{polímeros}} \sim 1 \text{ GPa}$  e  $E_{\text{metais e cerâmicas}} \sim 50 - 600 \text{ GPa}$

# Tensão - Deformação: CISALHAMENTO SIMPLES

- CISALHAMENTO SIMPLES: força aplicada sobre o corpo é *paralela* a suas superfícies.

- TENSÃO DE ENGENHARIA  $\tau$

$$\tau = F / A_0$$

- DEFORMAÇÃO  $\gamma$

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

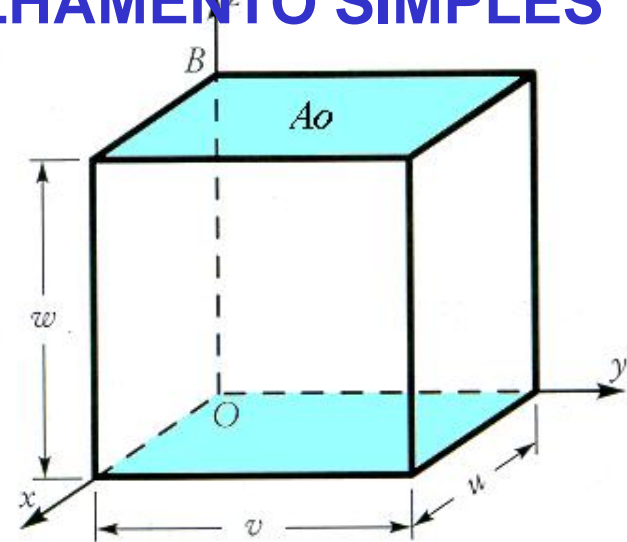
- MÓDULO DE CISALHAMENTO  $G$

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

- Para materiais isotrópicos, no regime elástico, vale a relação:

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

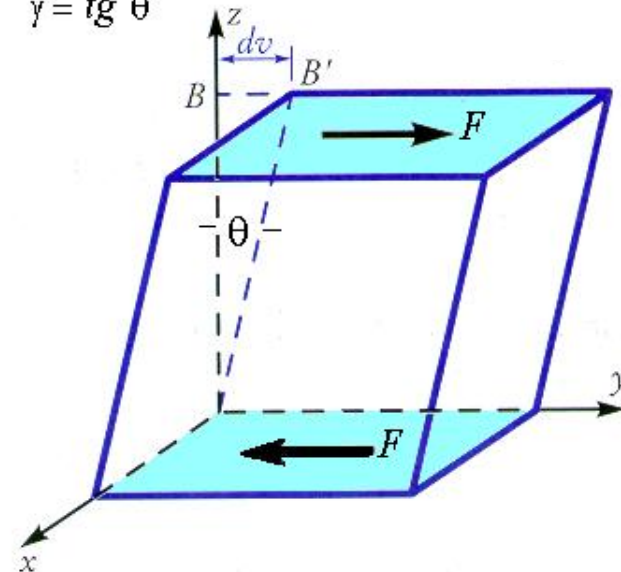
Para muitos metais:  $G \sim 0,4 E$



Elemento do material antes do cisalhamento

$$\tau = F / A_0$$

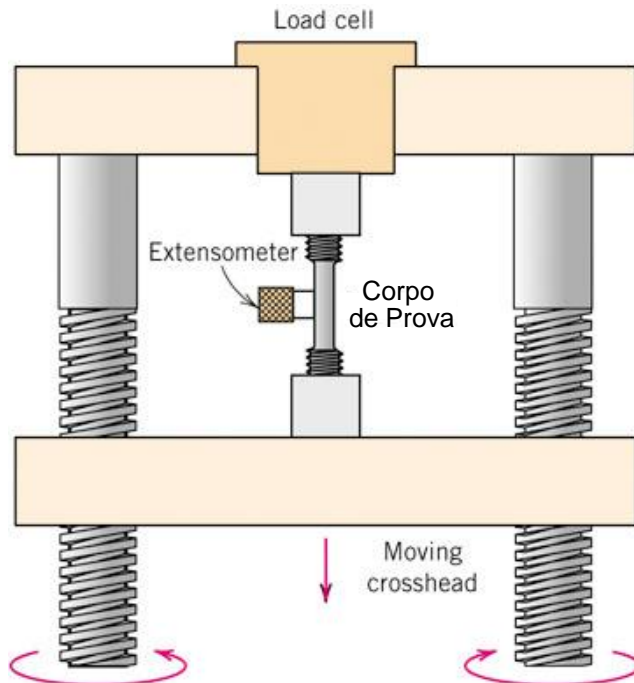
$$\gamma = \text{tg } \theta$$



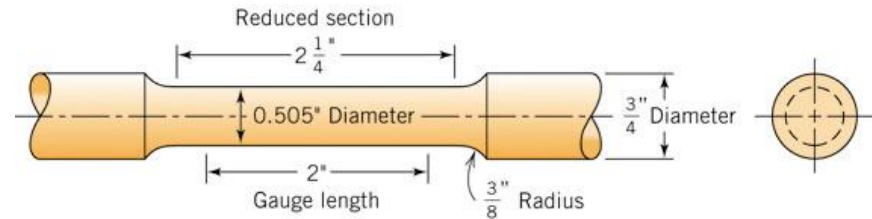
Elemento do material sob cisalhamento

# Ensaio de Tração

- Os **CORPOS DE PROVA** utilizados nos ensaios de tração podem ter diferentes formas e dimensões.
- As medidas de **FORÇA** são feitas com uma **CÉLULA DE CARGA**.
- As medidas de **DEFORMAÇÃO** são feitas com um **EXTENSÔMETRO** ou diretamente sobre o corpo de prova.

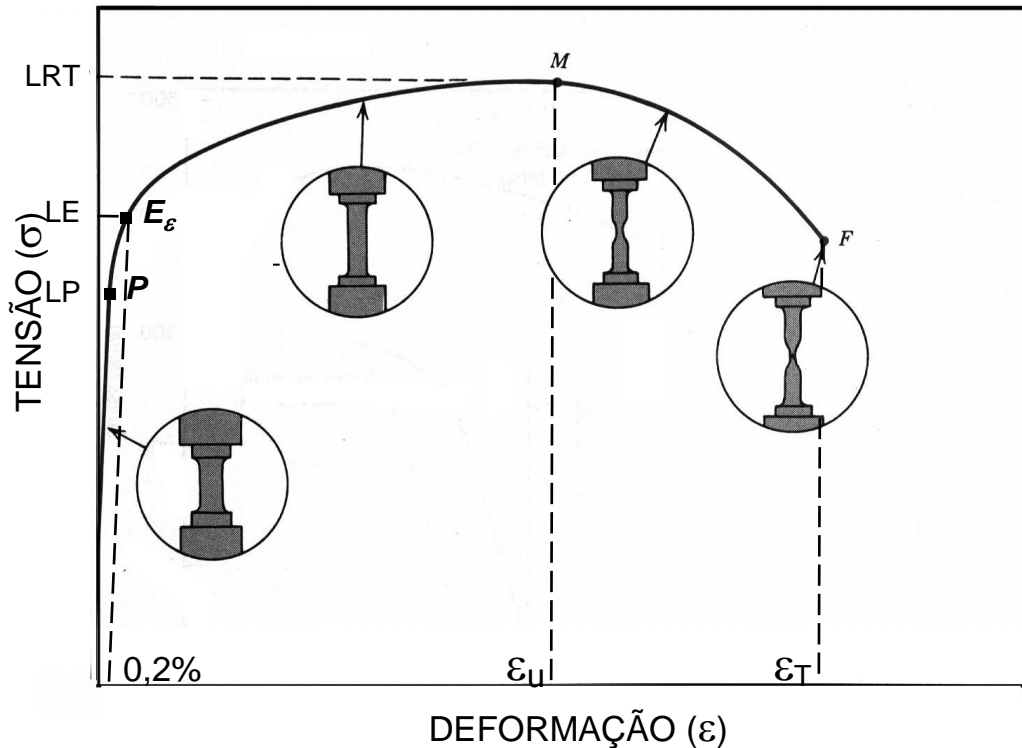


MÁQUINA DE ENSAIO



CORPO DE PROVA

# Curva Tensão-Deformação



Comportamento representativo da curva **TENSÃO DE ENGENHARIA** em função da **DEFORMAÇÃO DE ENGENHARIA** obtida num **ENSAIO DE TRAÇÃO** de um *corpo metálico*.

$$\sigma = F / A_0$$

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

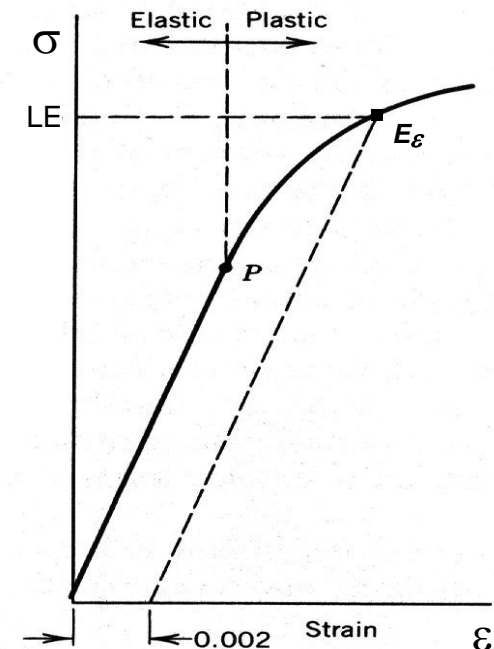
- O ponto **P** corresponde ao **LIMITE DE PROPORCIONALIDADE (LP)**; a deformação a partir do ponto **P** é *plástica*, e antes do ponto **P** é *elástica*.

- O ponto  $E_\varepsilon$  corresponde ao **LIMITE DE LIMITE DE ESCOAMENTO (LE)**, que será discutido mais adiante.
- O ponto **M** corresponde ao **LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (LRT)**, que é a tensão máxima atingida durante o ensaio.
- A deformação ( $\varepsilon_u$ ) no ponto **M** corresponde ao máximo valor de  $\varepsilon$  com *alongamento uniforme*. Deformações maiores que  $\varepsilon_u$  ocorrem com *estricção (empescoçamento)*.
- A *fratura* ocorre no ponto **F**. A deformação ( $\varepsilon_T$ ) na fratura corresponde ao *alongamento total*.



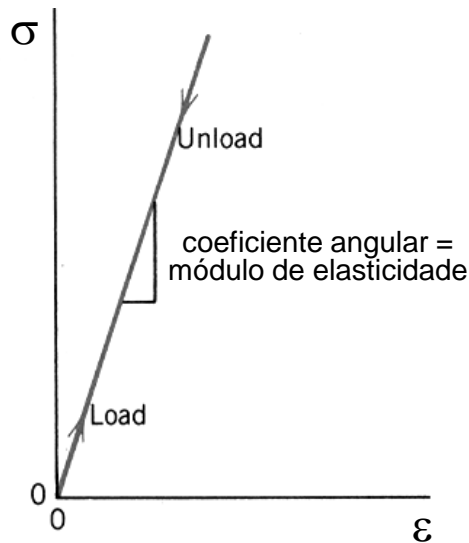
# Curva Tensão-Deformação

- Em uma escala atômica, a **DEFORMAÇÃO ELÁSTICA** macroscópica é manifestada como pequenas alterações no espaçamento interatômico e na extensão de ligações interatômicas.
- Para a maioria dos materiais metálicos, as deformações elásticas ocorrem até deformações de  $\sim 0,5\%$ .
- Quando as deformações ultrapassam o limite de proporcionalidade, a relação entre a tensão e a deformação deixa de ser linear (lei de Hooke), 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** (LE) como sendo a tensão necessária para se produzir uma pequena quantidade de deformação plástica. Para os **metais**, o ponto  $E_\epsilon$  corresponde a uma deformação de engenharia  $\epsilon = 0,002 = 0,2\%$ .



# Deformação Elástica

## Curva Tensão vs. Deformação

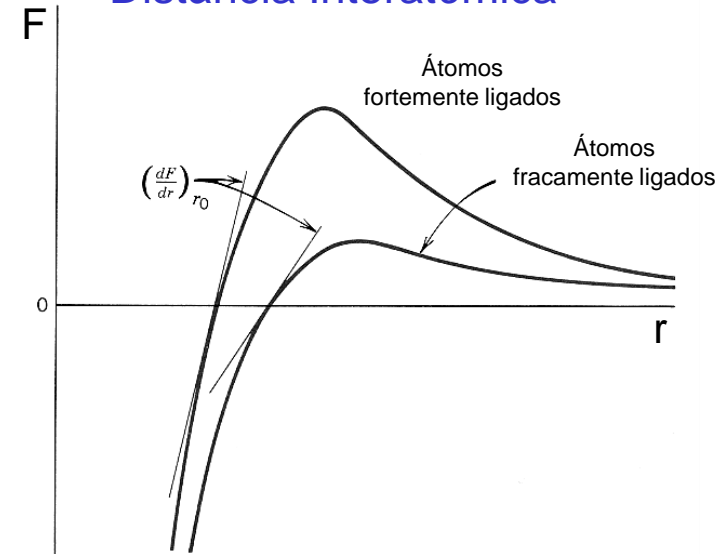


- Define-se o **MÓDULO DE ELASTICIDADE** como sendo o coeficiente angular da curva  $\sigma$  vs.  $\varepsilon$ , na região linear da curva. Como a curva tem origem no ponto (0,0),

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

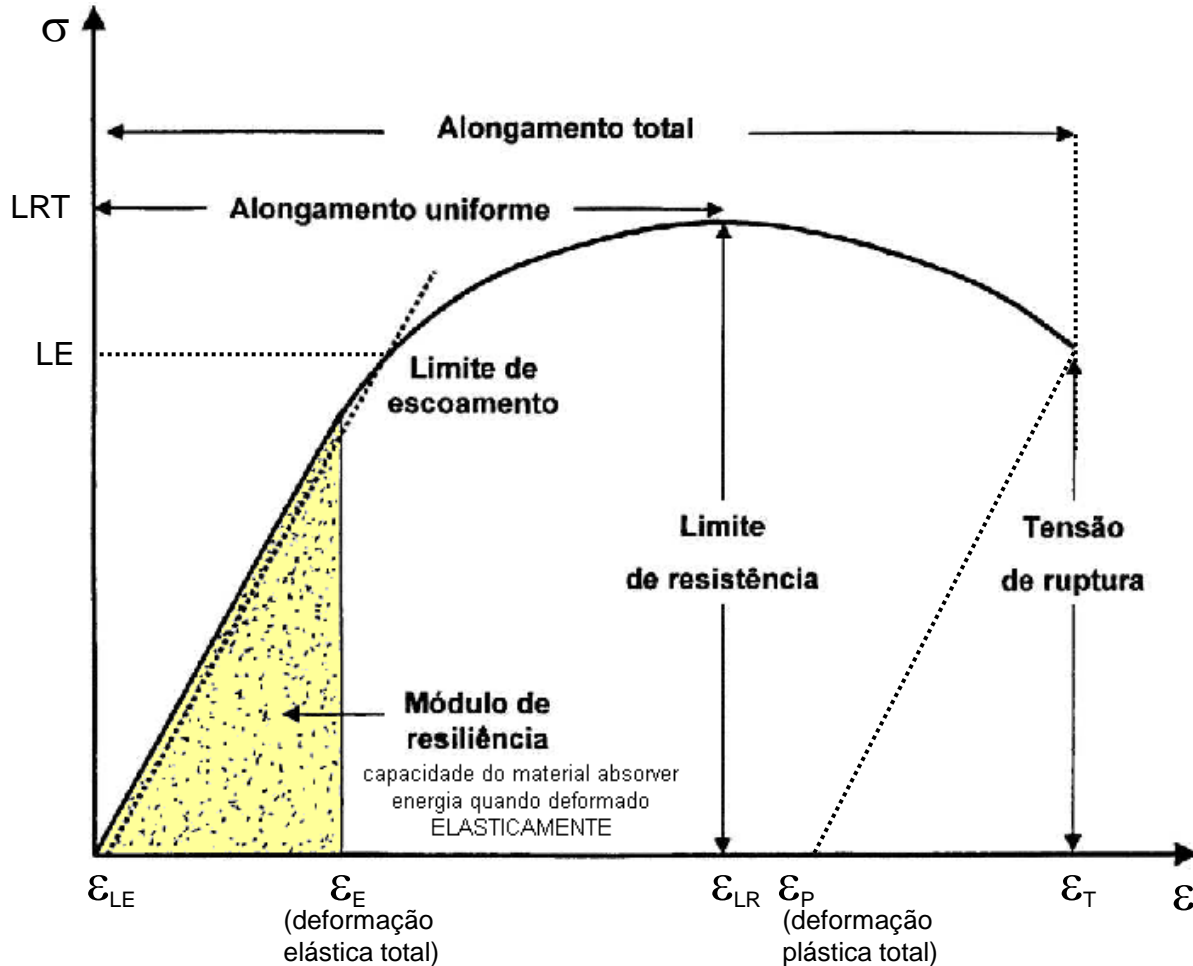
(Lei de Hooke)

## Força de Ligação vs. Distância Interatômica



- O módulo de elasticidade é proporcional ao valor da derivada  $dF/dr$  no ponto  $r = r_0$ .
- O módulo de elasticidade representa uma medida da intensidade das forças de ligação interatômicas.

# Curva Tensão-Deformação



Porcentagem de alongamento  $\% \epsilon_T$

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

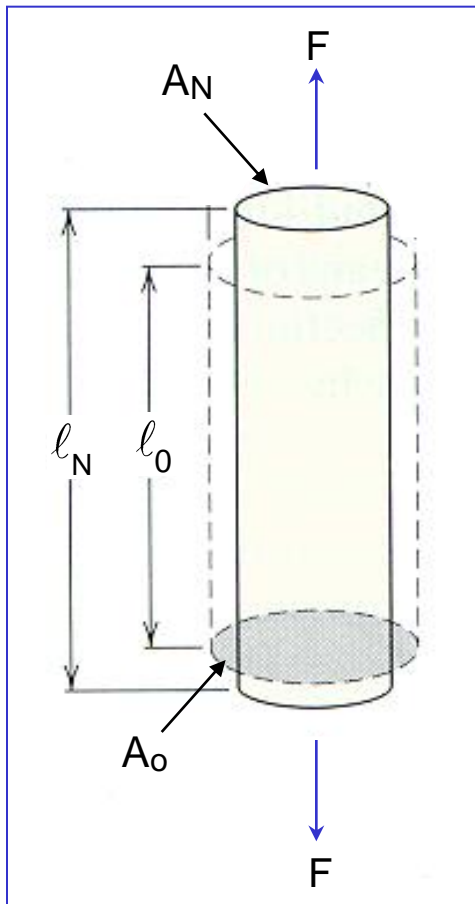
Porcentagem de redução de área  $\% RA$

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

- LE, LRT e E representam habilidades do material de suportar cargas em diferentes condições.
- $\epsilon_{LE}$ ,  $\epsilon_E$ ,  $\epsilon_{LR}$ ,  $\epsilon_P$ , a resiliência e a tenacidade quantificam a habilidade do material em se deformar

# Deformação de Engenharia e Deformação Real

- Consideremos uma amostra cilíndrica homogênea sujeita a uma tensão uniaxial ao longo do eixo do cilindro. A área inicial da seção transversal da amostra é  $A_0$  e seu comprimento é  $l_0$ . Devido à aplicação da tensão, o comprimento da amostra varia de  $l_0$  a  $l_N$  e a área de  $A_0$  a  $A_N$ .



- A **DEFORMAÇÃO DE ENGENHARIA**  $\varepsilon$  vale

$$\varepsilon = \frac{l_N - l_0}{l_0}.$$

- Suponha agora, que a variação do comprimento da amostra é feita em  $N$  passos de tal forma que:

$$\varepsilon_R = \frac{l_1 - l_0}{l_0} + \frac{l_2 - l_1}{l_1} + \dots + \frac{l_N - l_{N-1}}{l_{N-1}} = \sum_{i=1}^N \frac{l_i - l_{i-1}}{l_{i-1}}$$

Para  $N$  grande, podemos substituir a somatória por uma integral e

$$\varepsilon_R = \int_{l_0}^{l_N} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_N}{l_0} = \ln(\varepsilon + 1).$$

$\varepsilon_R$  é a denominada **DEFORMAÇÃO REAL** e a sua correlação com  $\varepsilon$  é apresentada na equação acima.

# Deformação de Engenharia e Deformação Real

- Seja  $l_0 = 1,0\text{ m}$  e consideremos dois valores para o comprimento final,  $l_{N1} = 2$  e  $l_{N2} = l_0 / 2 = 0,5\text{ m}$ .

Para a deformação de engenharia obtemos

$$l_{N1} = 2,0\text{ m} \Rightarrow \varepsilon_1 = \frac{2,0 - 1,0}{1,0} = 1,0$$

(Os resultados não apresentam a simetria física esperada.)

$$l_{N2} = 0,5\text{ m} \Rightarrow \varepsilon_2 = \frac{0,5 - 1,0}{1,0} = -0,5$$

Para a deformação real obtemos

$$l_{N1} = 2,0\text{ m} \Rightarrow \varepsilon_{R1} = \ln 2$$

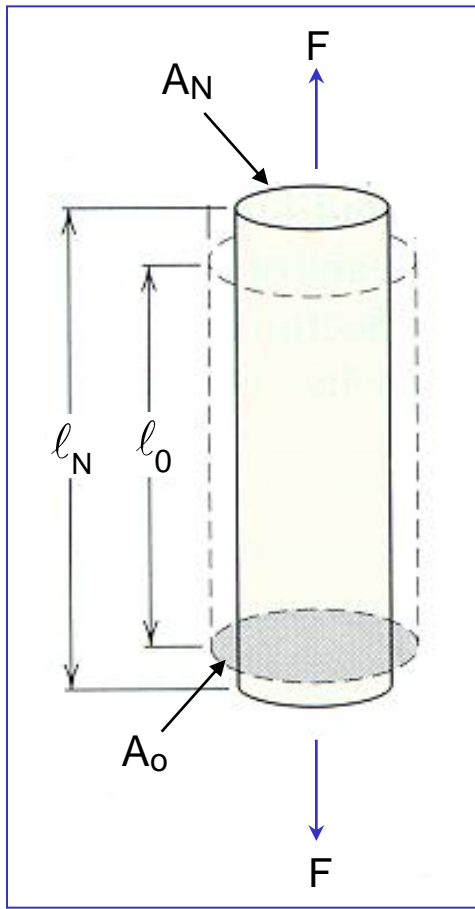
(Os resultados apresentam a simetria física esperada.)

$$l_{N2} = 0,5\text{ m} \Rightarrow \varepsilon_{R2} = \ln 0,5 = -\ln 2$$

- A deformação de engenharia coincide com a deformação real apenas para deformações suficientemente pequenas.

# Tensão de Engenharia e Tensão Real

- Para cada instante de tempo  $t$ , a **TENSÃO REAL**  $\sigma_R$  é definida como a força aplicada ( $F$ ) dividida pela área da seção transversal [ $A=A(t)$ ] sobre a qual atua.



$$\sigma_R = \frac{F}{A}$$

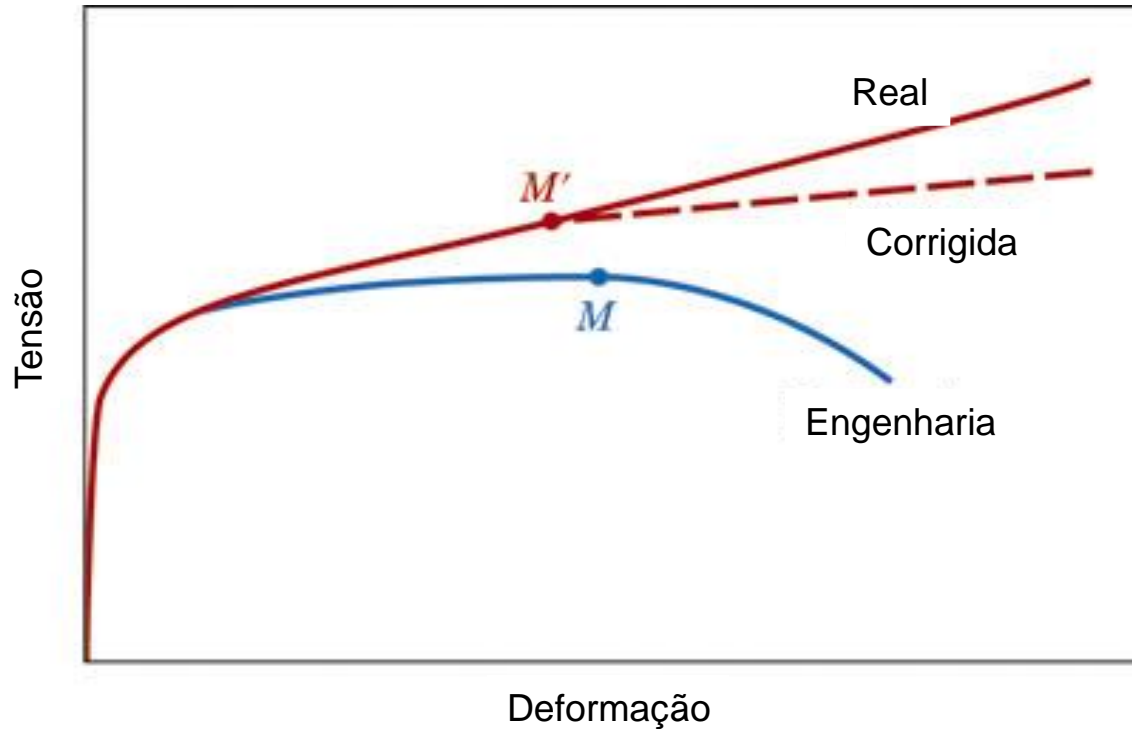
- A **TENSÃO DE ENGENHARIA**  $\sigma$  é dada por

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

$$\therefore \sigma_R = \frac{F}{A_0} \frac{A_0}{A} = \sigma \frac{A_0}{A} .$$

- Materiais sólidos são basicamente incompressíveis, portanto, seu volume é praticamente constante durante um ensaio de tração. Assim, se  $l$  é o comprimento da amostra no instante de tempo  $t$ :

$$A_0 l_0 = A l \Rightarrow \frac{A_0}{A} = \frac{l}{l_0} = \varepsilon + 1 \Rightarrow \sigma_R = \sigma (\varepsilon + 1)$$



- Equações válidas até o início do empescoçamento (pontos M e M'):

$$\sigma_R = \frac{F}{A} = \sigma(\varepsilon + 1) \quad \varepsilon_R = \ln \frac{l_N}{l_0} = \ln(\varepsilon + 1)$$

- A curva Tensão Real - Deformação Real “Corrigida” leva em consideração a existência de um estado tensão-deformação diferenciado na região de empescoçamento.

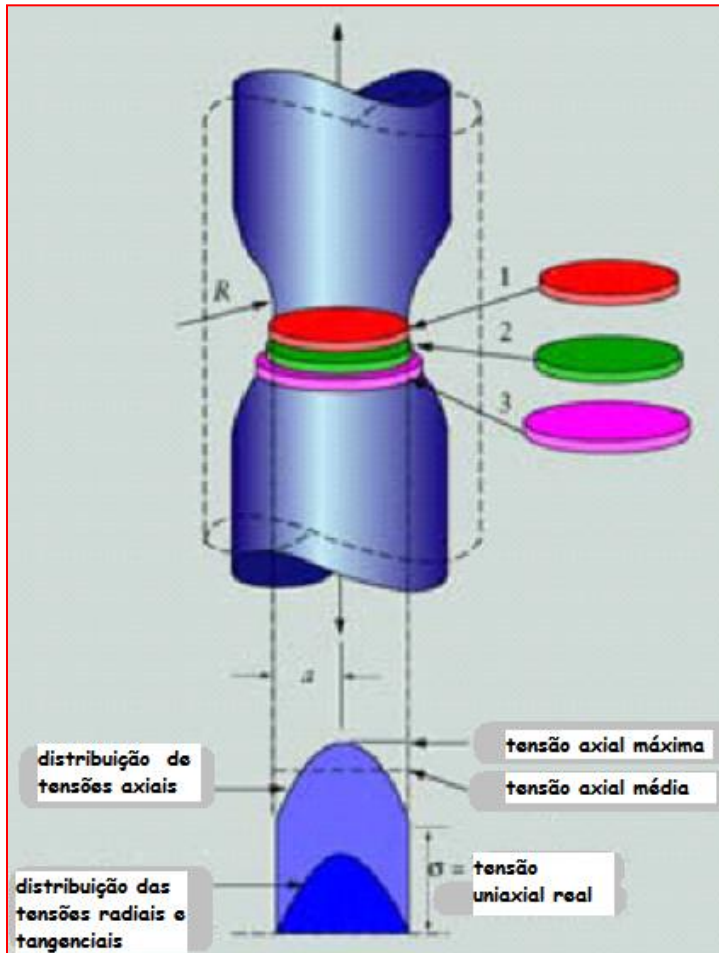
Após a formação do pescoço ou início da estricção, a deformação não é mais uniforme e o estado de tensões nesta região não é uniaxial, mas triaxial. Existem várias abordagens para calcular a tensão, depois deste ponto. Uma delas (para corpos de prova cilíndricos) é a de **Bridgman**, que faz algumas hipóteses simplificadoras:

- o contorno do pescoço é circular e permanece circular durante a deformação;
- as deformações permanecem constantes ao longo de cada secção;
- o critério de escoamento de **von Mises** (você o estudará em Resistência dos Materiais) é válido na região de pescoço.

A tensão corrigida ( $\sigma_{\text{Corr}}$ ) é apresentada abaixo (mais como uma curiosidade), em função da tensão uniaxial medida ( $\sigma_{\text{Med}}$ ; carga ou força aplicada/área mínima da secção):

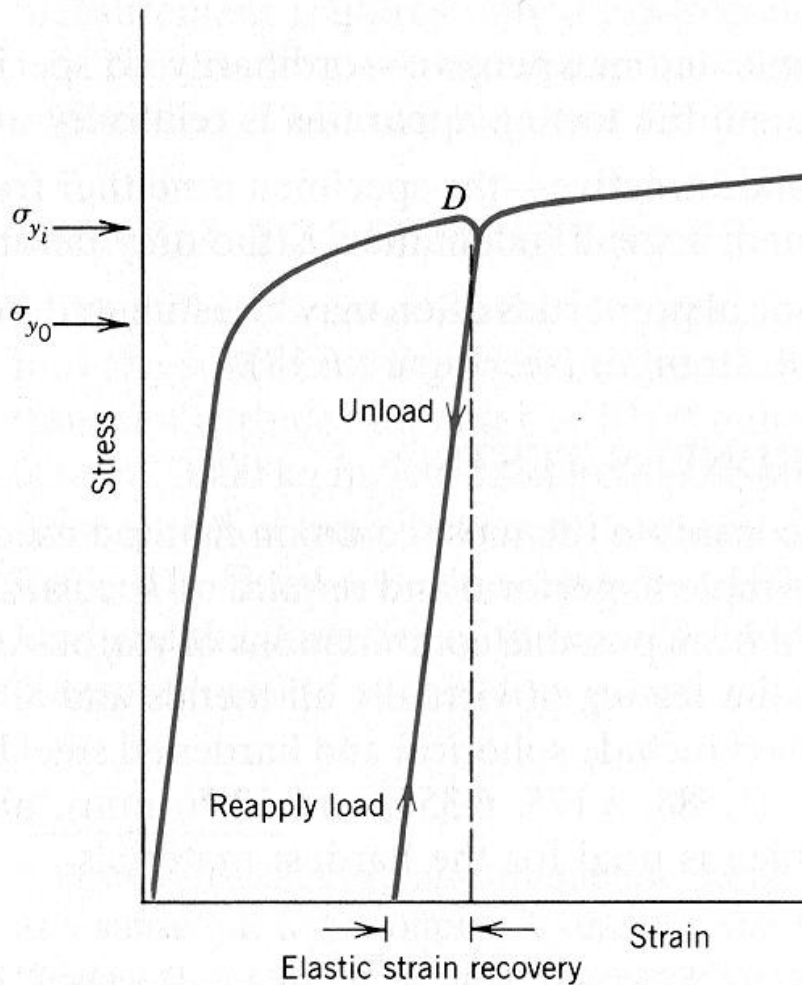
$$\sigma_{\text{Corr}} = \sigma_{\text{Med}} \div [(1+2R/a) \cdot \ln(1+a/2R)]$$

Para corpos de prova com secções retangulares, o problema é ainda mais complexo!





# Recuperação Elástica e Encruamento

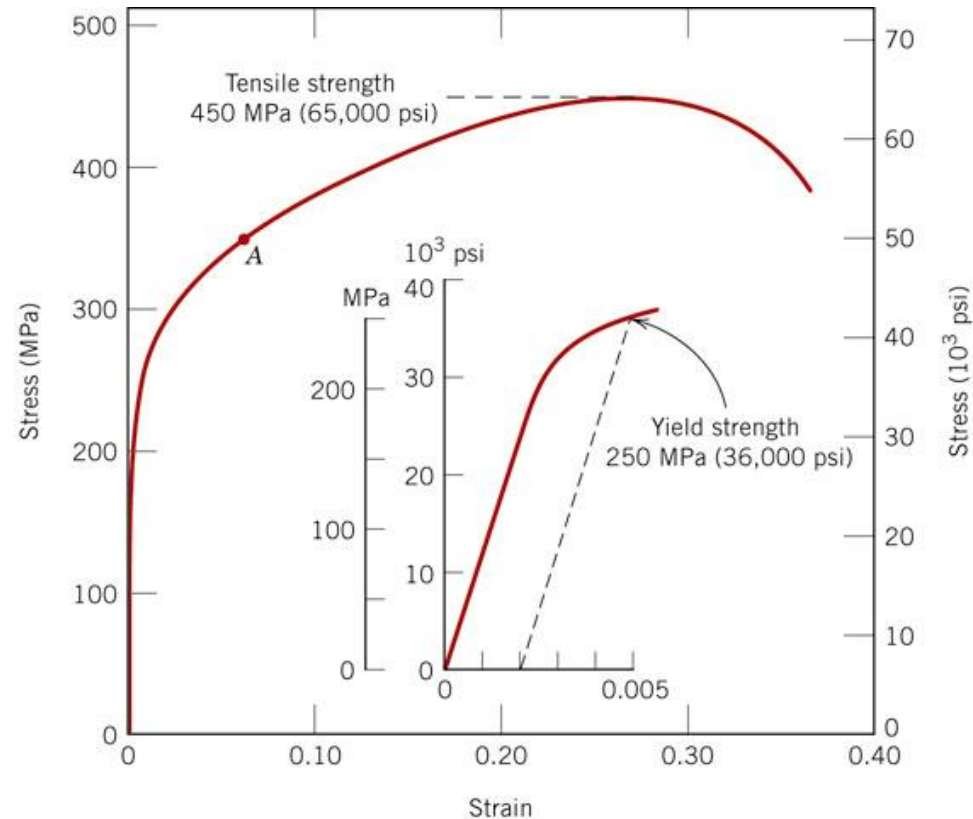
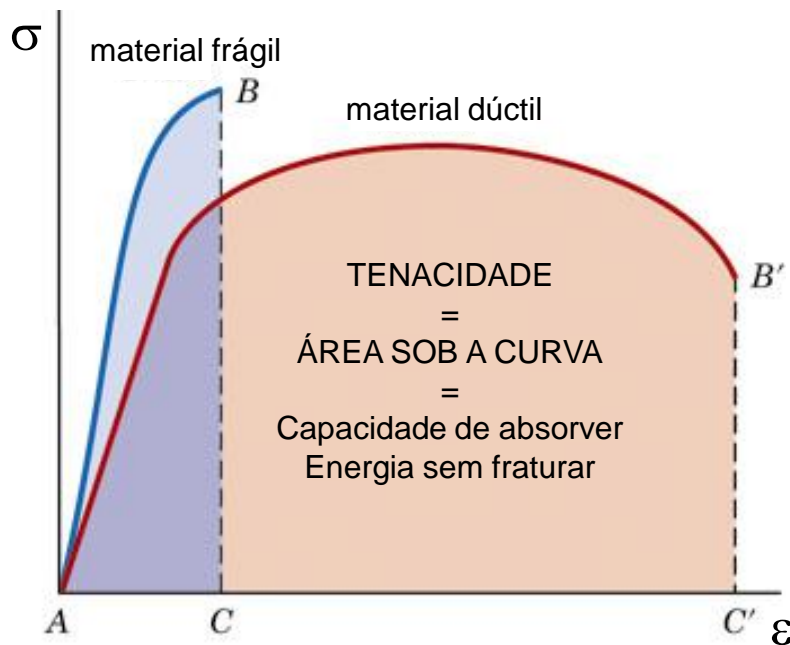


- O material com limite de escoamento  $\sigma_{y0}$  é tracionado até D.
- Após descarregamento sofre **RECUPERAÇÃO ELÁSTICA**.
- Quando recarregado, por ter sofrido **ENCRUAMENTO** apresenta limite de escoamento maior  $\sigma_{yi}$

Encruamento é o aumento na dureza e na resistência mecânica de um metal dúctil à medida em que ele passa por uma deformação plástica em temperatura abaixo de sua temperatura de recristalização.

# Materiais Dúcteis e Frágeis

## Curva Tensão - Deformação



Tenacidade: medida da quantidade de energia absorvida até a fratura e é indicada pela área total sob a curva tensão-deformação em tração.

## Propriedades de Tração de Alguns Metais

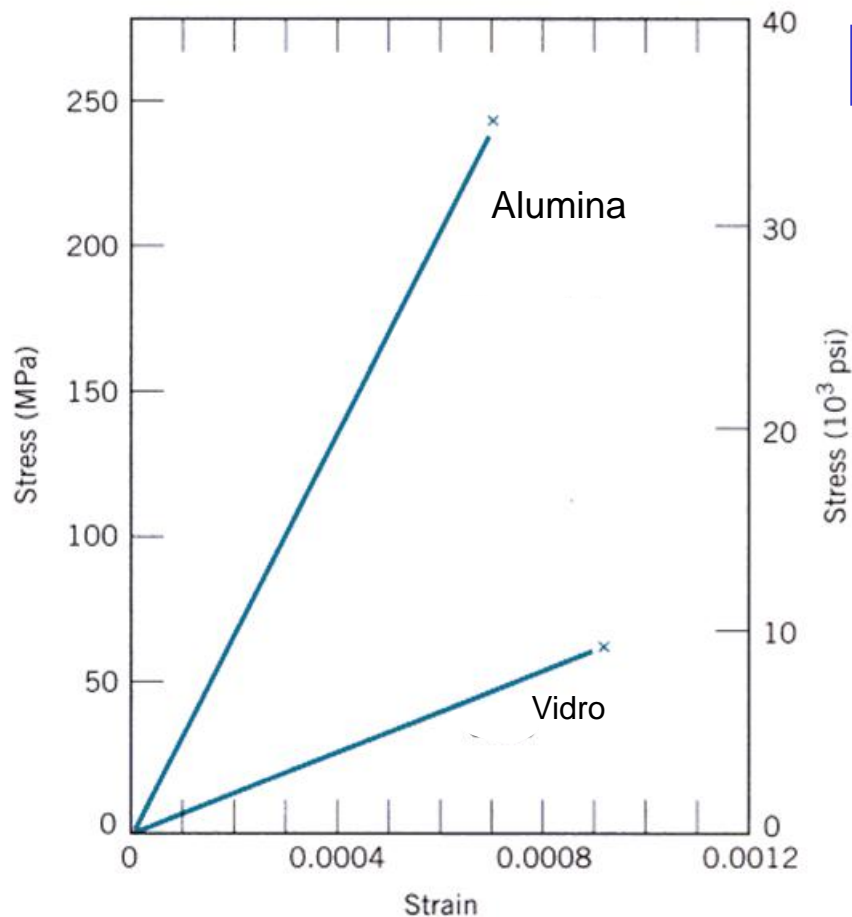
<i>Metal Alloy</i>	<i>Yield Strength MPa (ksi)</i>	<i>Tensile Strength MPa (ksi)</i>	<i>Ductility, %EL [in 50 mm (2 in.)]</i>
Aluminum	35 (5)	90 (13)	40
Copper	69 (10)	200 (29)	45
Brass (70Cu–30Zn)	75 (11)	300 (44)	68
Iron	130 (19)	262 (38)	45
Nickel	138 (20)	480 (70)	40
Steel (1020)	180 (26)	380 (55)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

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

***Tensile strength*** : limite de resistência a tração

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

# Curvas de Tração de Materiais Frágeis (Materiais Cerâmicos)



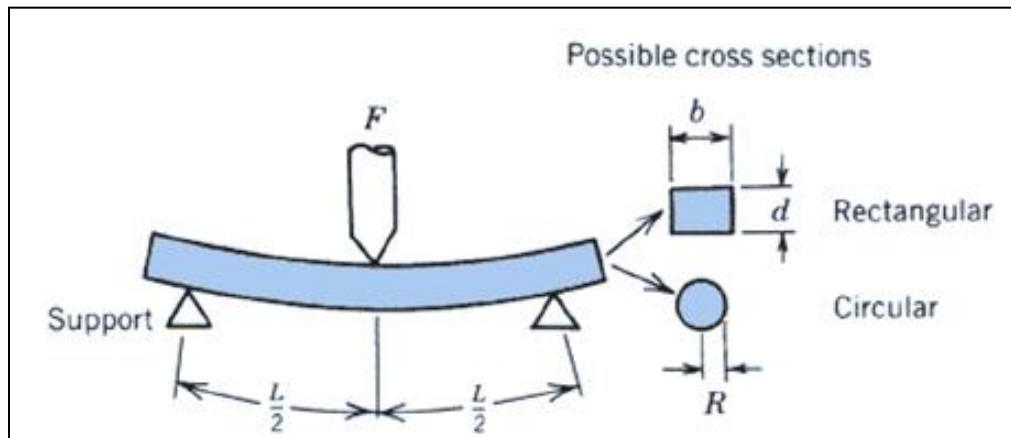
## Curva Tensão - Deformação

**Porém, ensaio de difícil execução em materiais cerâmicos devido à:**

- **Característica fratura frágil;**
- **Elevada resistência mecânica.**

**(fica muito difícil fixar a amostra na máquina de testes sem introduzir-se trincas que mascarem o resultado real do ensaio. Além disso, é difícil alinhar-se os suportes do equipamento de modo a ter-se exclusivamente esforços de tração na amostra).**

# Ensaio de Flexão



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

where  $M$  = maximum bending moment

$c$  = distance from center of specimen to outer fibers

$I$  = moment of inertia of cross section

$F$  = applied load

	$\frac{M}{4}$	$\frac{c}{2}$	$\frac{I}{12}$	$\frac{\sigma}{2bd^2}$
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

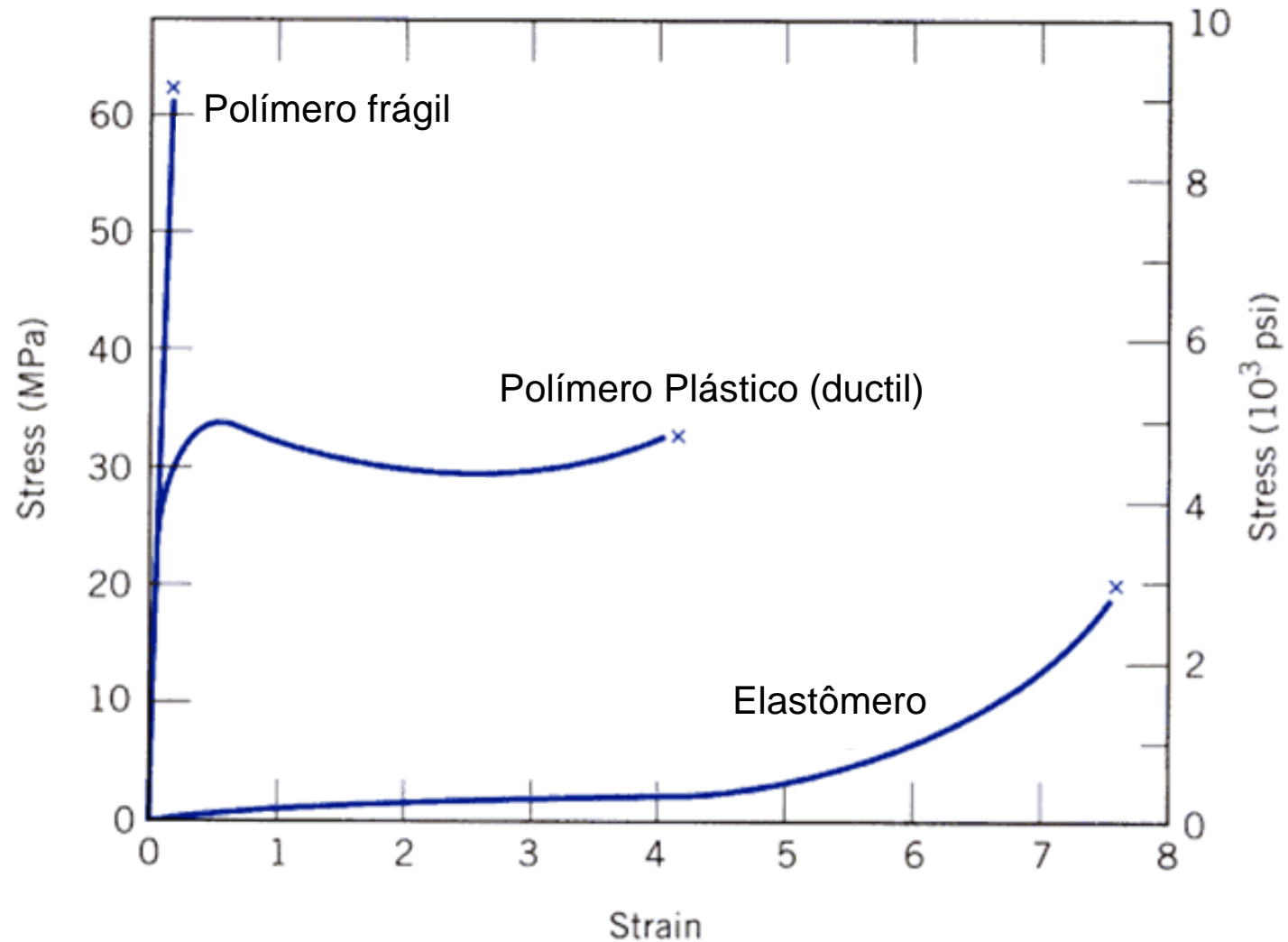
Material	Flexural Strength		Modulus of Elasticity	
	MPa	ksi	GPa	$10^6$ psi
Silicon nitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )	700–1000	100–145	304	44
Zirconia <sup>a</sup> ( $\text{ZrO}_2$ )	634	92	200	29
Silicon carbide ( $\text{SiC}$ )	552–862	80–125	430	62
Aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	275–550	40–80	393	57
Glass-ceramic (Pyroceram)	241	35	120	17
Mullite ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ )	185	27	145	21
Spinel ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ )	110–245	16–35.5	260	38
Fused silica ( $\text{SiO}_2$ )	110	16	73	11
Magnesium oxide ( $\text{MgO}$ )	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.

# Curvas de Tração de Materiais Poliméricos

Curva Tensão - Deformação

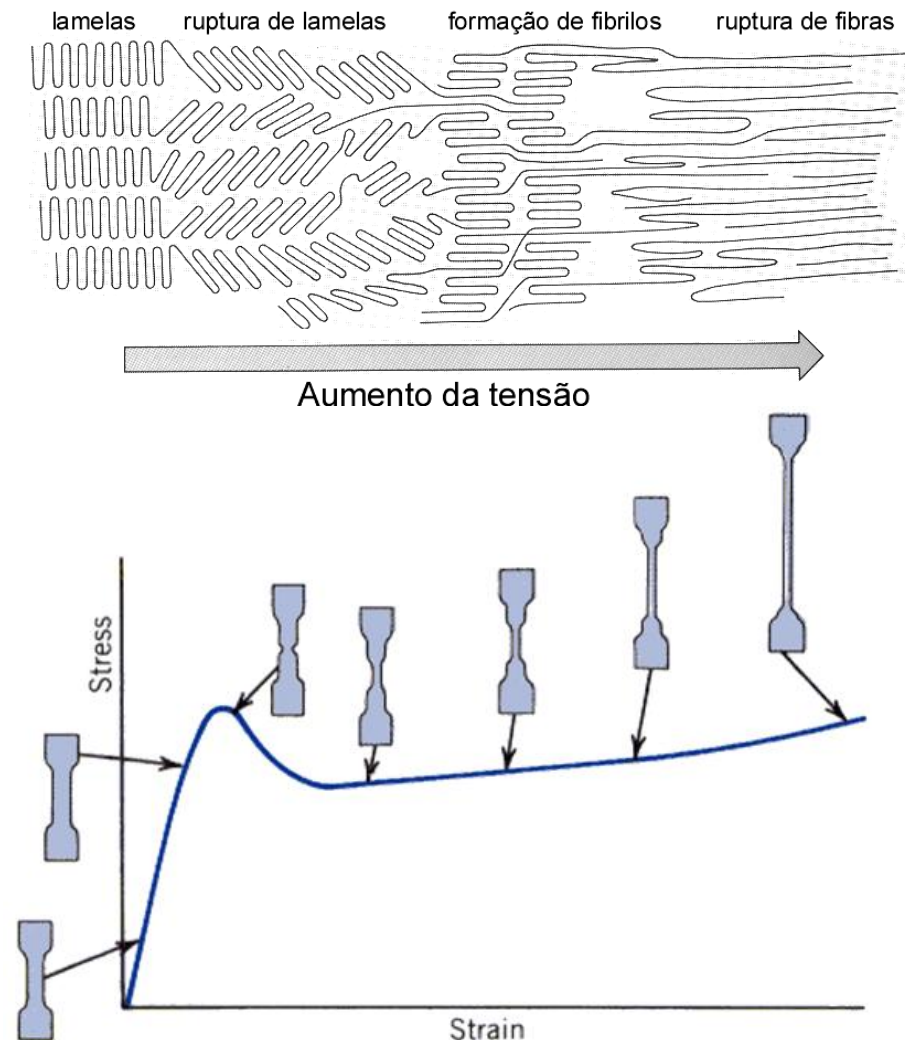


# Curvas de Tração de Materiais Poliméricos Parcialmente Cristalinos

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.

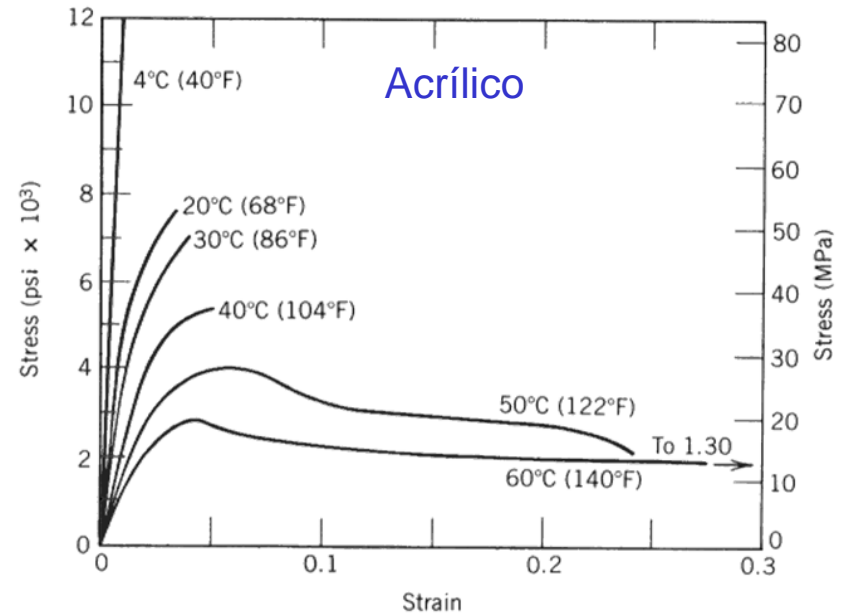
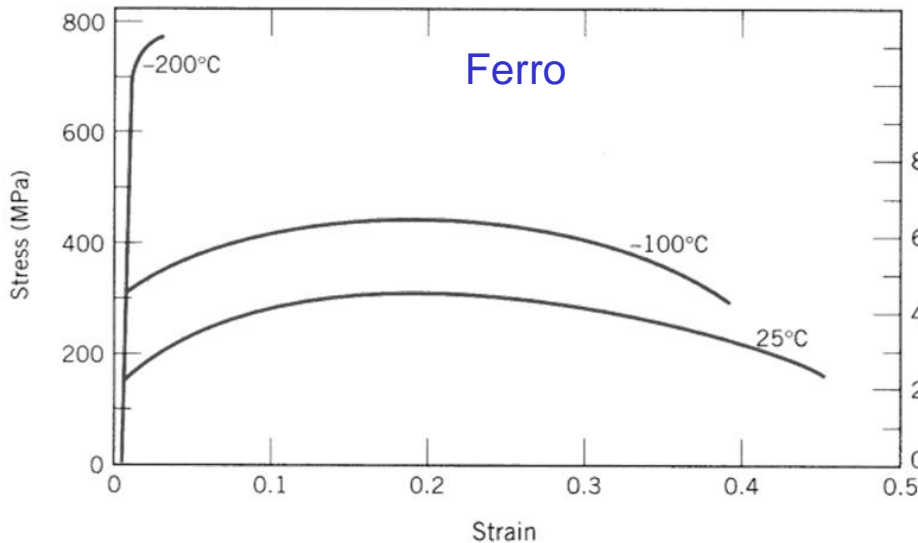
Na região do pescoço, as cadeias moleculares se orientam, o que leva a um aumento localizado de resistência. Em consequência, a deformação plástica prossegue em uma região vizinha à do pescoço (de menor resistência), resultando em um aumento do comprimento do pescoço. A tensão de escoamento aumenta devido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

Curvas Tensão - Deformação obtidas com o corpo de prova mantido a diferentes temperaturas.





# Efeito da Temperatura sobre a Deformação Plástica

- $T \uparrow \Rightarrow$  aumento da amplitude de vibração (dos átomos ou das macromoléculas), rotação (macro-moléculas)  $\Rightarrow$  maior facilidade de movimentação das discordâncias / deslizamento no caso das macromoléculas.

- Portanto:

$$T \uparrow \Rightarrow \downarrow \sigma_e$$

e

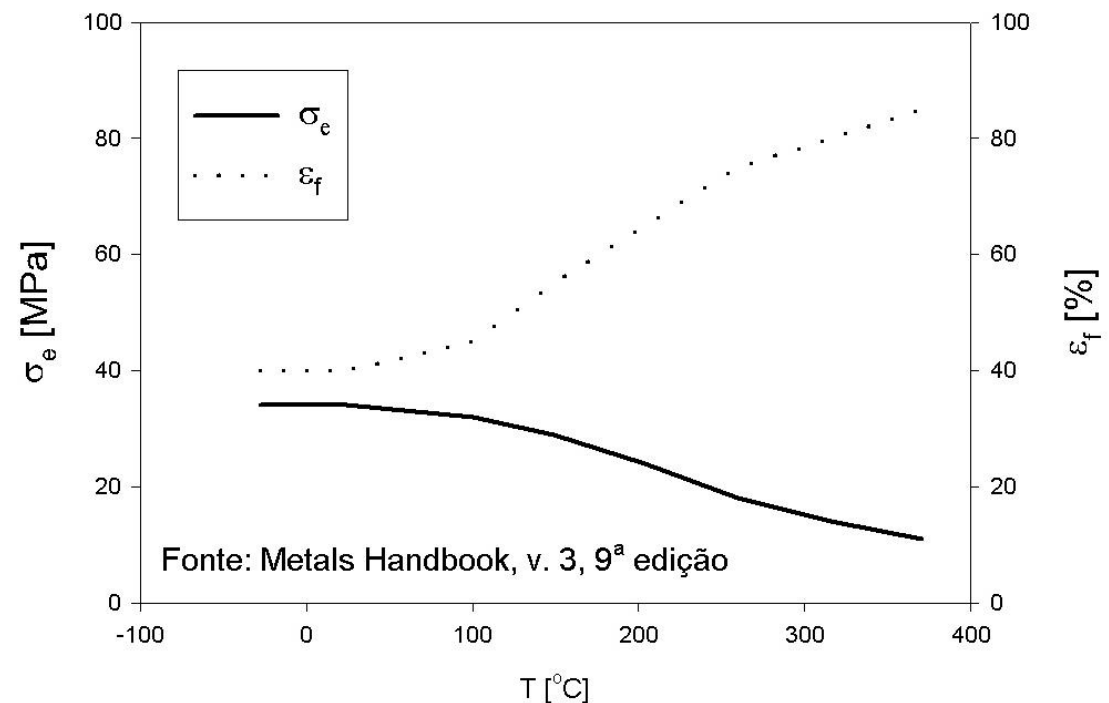
$\uparrow$  alongamento

- *Aplicações*: conformação mecânica de materiais metálicos, poliméricos e cerâmicos (vidros).

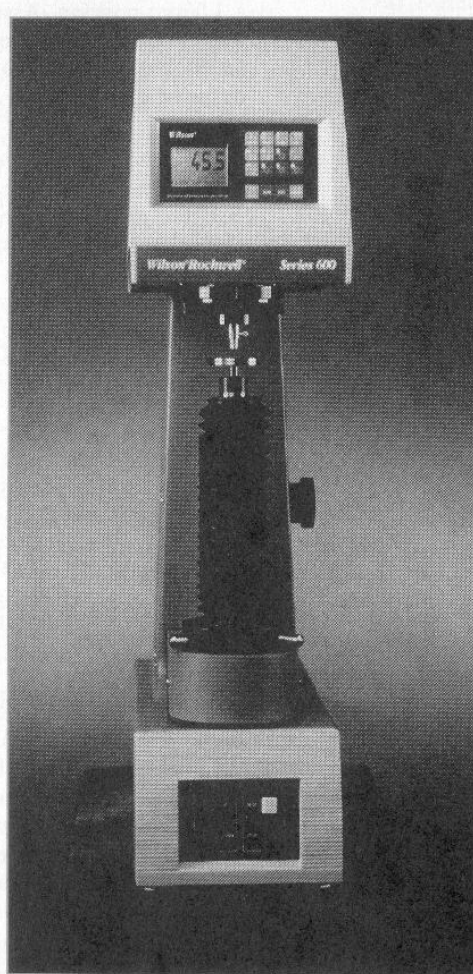
## Exemplo

Variação do limite de escoamento ( $\sigma_e$ ) e do alongamento para fratura ( $\epsilon_f$ ) com a temperatura para alumínio AA1100.

Alumínio AA1100 (min. 99% Al, 0,12% Cu)



# Dureza



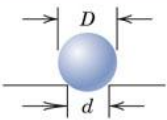
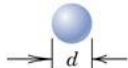
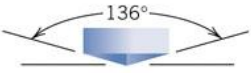


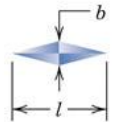
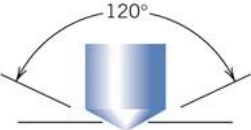



- O ensaio consiste na aplicação de uma carga conhecida através de um penetrador de geometria conhecida e na medição da área da impressão produzida na superfície do corpo de prova.
- Ensaio de grande importância tecnológica (controle de qualidade)
- Dureza, ao contrário do limite de escoamento e da tenacidade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

# Dureza

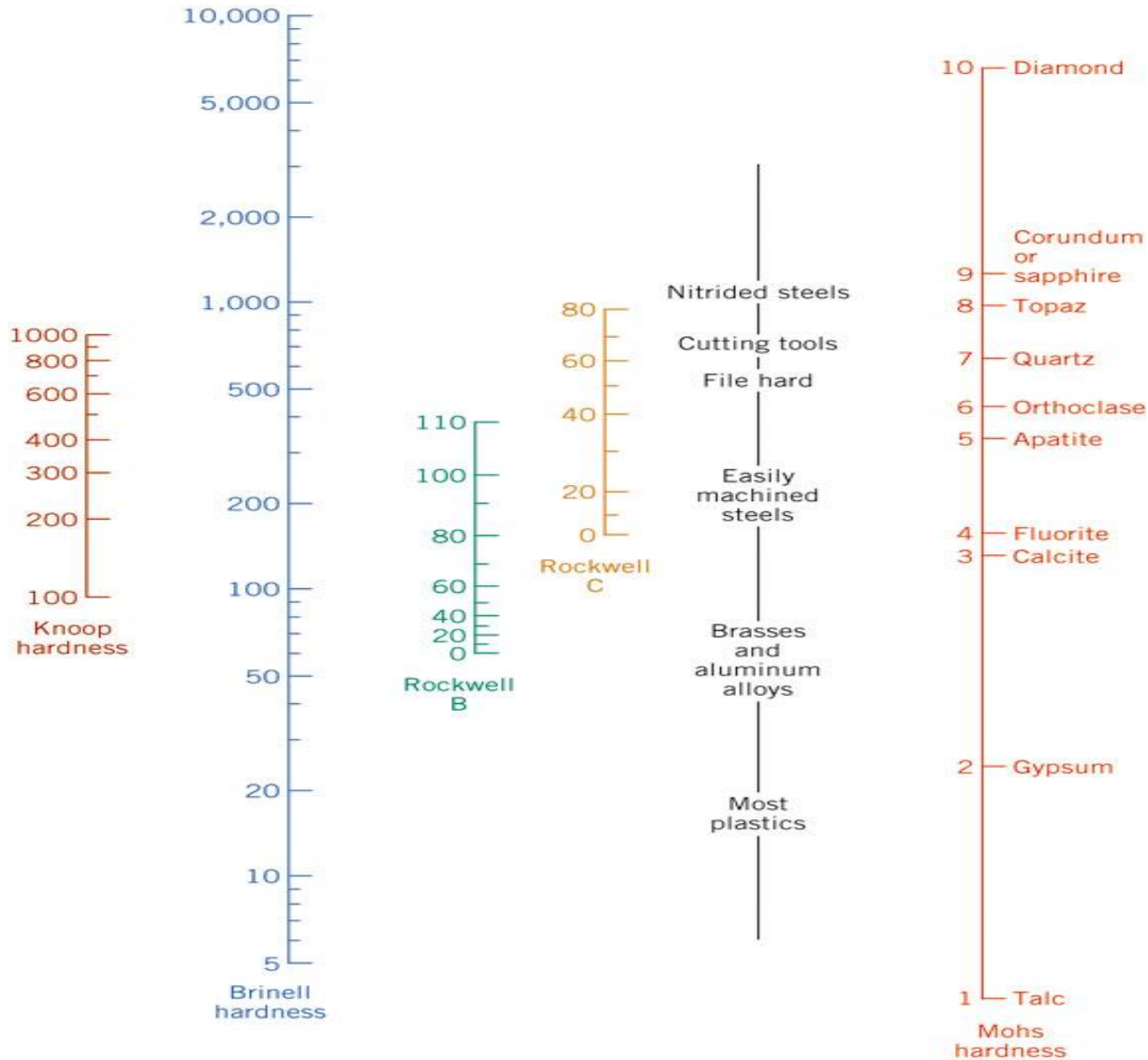
As primeiras medidas de dureza foram feitas comparando a capacidade dos diversos materiais de riscarem uns aos outros (Dureza Mohs).

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

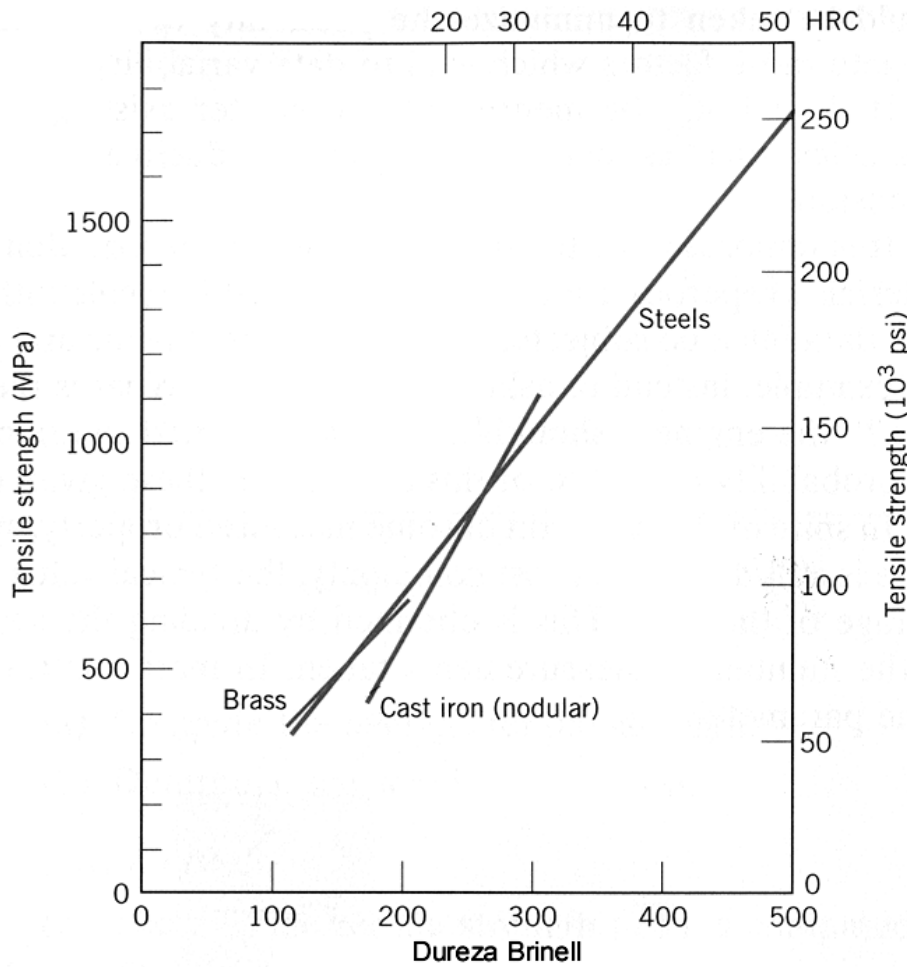
## Ensaio de Dureza

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			$P$	$HK = 14.2P/l^2$
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	

# Comparação da Dureza de Alguns Materiais



# Relação entre Dureza e Limite de Resistência a Tração



Para a maioria dos aços:  
 $LRT \text{ (MPa)} = 3,45 \times HB$

# RESUMO

- Características e propriedades mecânicas importantes dos materiais podem ser obtidas por meio de ensaios de tensão-deformação.
- Vários **parâmetros mecânicos** são medidos a partir das **curvas de tensão-deformação** dos materiais: módulo de elasticidade (Young), limite de escoamento, limite de resistência, alongamento uniforme, alongamento total até a ruptura, tensão de ruptura, resiliência e tenacidade.
- A **curva de tensão-deformação** do material **varia** com a configuração do ensaio mecânico (p.ex.: tração x flexão x compressão).
- O **comportamento mecânico** do material muda com a **velocidade de deformação** e a **temperatura**. Dependendo das **condições do ensaio**, um material apresenta **comportamento elástico ou plástico (viscoso)** mais pronunciado.
- A **deformação mecânica com escoamento plástico** (carregamento e descarregamento) produz **encruamento** do material, observado como um aumento no seu limite de escoamento.
- A **dureza** é uma medida rápida da resistência mecânica do material.

## Capítulos do Callister, 7ª ed., 2008, tratados nesta aula

- Capítulo 6 : completo; capítulo 12: seções 12.8 e 12.9; capítulo 15: seções 15.1 a 15.3

Outras referências importantes:

- Callister, 5ª Ed - capítulo 6 : completo; capítulo 13: seções 13.8 e 13.9 ; capítulo 16: seções 16.1 a 16.4
- Shackelford, J. F. Ciência dos Materiais, 6ª ed. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2008. – Capítulo 6: Seções 6.1 a 6.4
- 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