ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Comportamento Mecânico dos Materiais – Parte I

Parthenon, Atenas

Burj Khalifa, Dubai

Ponte Akashi-Kaikyo (ou Pearl Bridge)

PMT 3100 - Fundamentos de Ciência e Engenharia dos Materiais
2° semestre de 2014

Roteiro da Aula

- Propriedades no Estado Sólido
- Classificação dos Ensaios Mecânicos
- 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.

Propriedades no estado sólido

Físicas

sem *modificação*

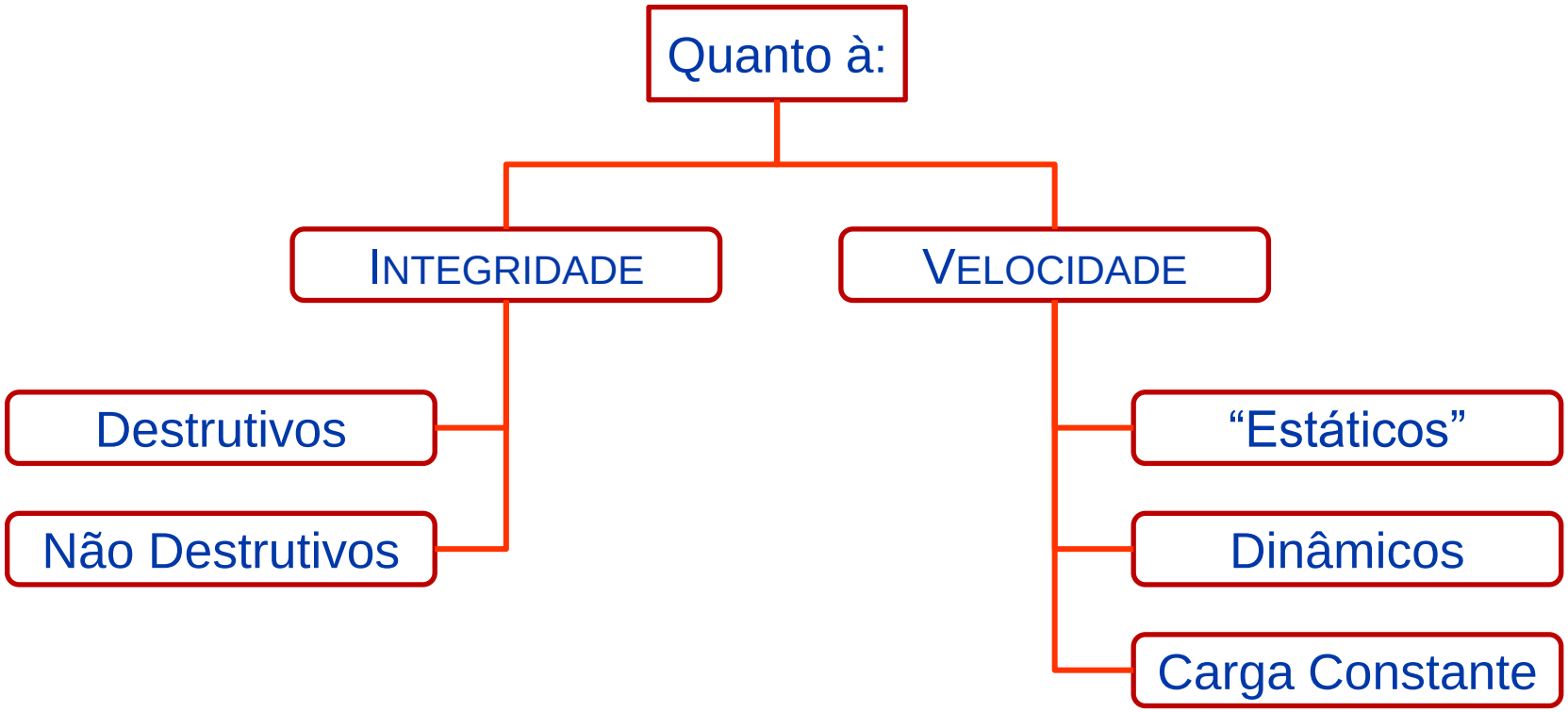
- Propriedades Elétricas (condutividade elétrica, resistividade elétrica, etc.)
- Propriedades Magnéticas (permeabilidade magnética; força coercitiva, indução magnética, etc.) ***pode haver modificação***
- Propriedades Térmicas (condutividade térmica; dilatação térmica, etc.)
- Propriedades Óticas (transparência; índice de refração, etc.)

Mecânicas

com *modificação*

- Resistência à tração e compressão;
- Resistência a flexão transversal;
- Resistência ao impacto;
- Resistência à fadiga, à fluência;
- Dureza;
- Plasticidade/ductilidade e tenacidade;
- Entre outras

Classificação dos testes mecânicos



Quanto à Integridade

- Destrutivos

  Provocam a inutilização parcial ou total da peça.

  Ex: Tração, Dureza, Fadiga, Fluência, Torção, Flexão, Impacto, Tenacidade.

- Não-Destrutivos

  Não comprometem a integridade da peça.

  Ex: Raios-X, Raios-γ, Ultrassom, Partículas Magnéticas, Líquidos Penetrantes, Tomografia.

Quanto à velocidade

- **Estáticos**

  Carga relativamente lenta

  Ex: Tração, Compressão, Dureza, Torção, Flexão

- **Dinâmicos**

  Carga rápida ou cíclica.

  Ex: Fadiga, Impacto

- **Carga Constante**

  Carga aplicada durante um longo período.

  Ex: Fluência

Normas para Determinação das Propriedades

Para determinar as propriedades de um material são realizados ensaios específicos para cada propriedade.

O procedimento de cada ensaio é descrito em normas técnicas nacionais e internacionais tais como:

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- ASTM – American Society for Testing and Materials
- ISO – International Standard Organization;
- DIN – Deutsche Industrie Normen;

A geometria das amostras a serem ensaiadas (corpos de prova) e as condições técnicas de condução de cada ensaio são descritas nestas normas técnicas.

Conceitos

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.

- **Tensão (stress)** – é uma medida da intensidade de forças internas atuando dentro de um corpo deformável consequente de forças externas causando uma deformação relativa deste corpo. Assim, mede a força média por unidade de área e, portanto, a sua dimensão é aquela da pressão.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (Pa)$$

Onde: *σ = Tensão mecânica*
F = Força
A = Área
Pa = Unidade pascal

- **Deformação (deformation)** – em ciência dos materiais, é a mudança na forma, ou dimensão, de um corpo devido a uma força aplicada ou mudança de temperatura.

  - 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 ou deslizamento das cadeias, quando uma força é aplicada a um polímero não-reticulado

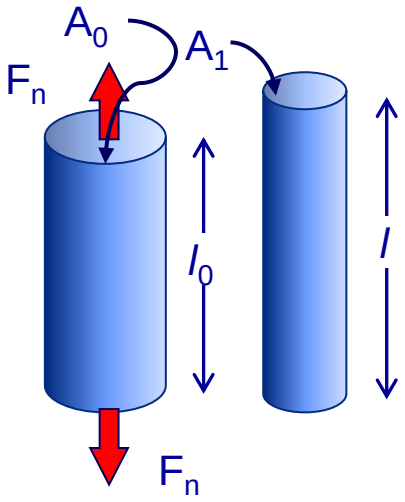
- **Extensão, alongamento, deslocamento (strain)** – é uma medida normalizada da deformação, representando o deslocamento entre partes de um corpo em relação a um comprimento de referência

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{(adimensional)}$$

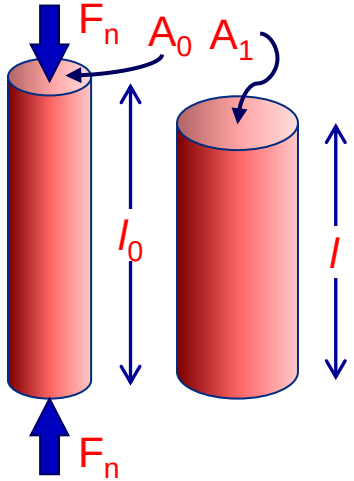
Onde: ε *= deformação de tração (alongamento)*
l *= Comprimento final*
l_0 *= Comprimento inicial*

Tipos de Tensões

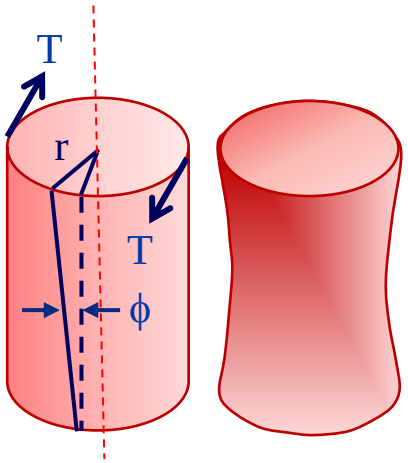
Tração



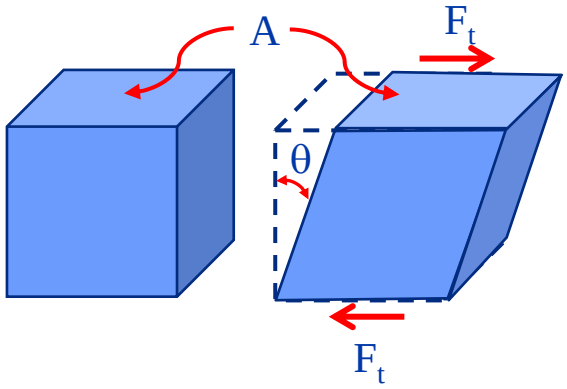
Compressão



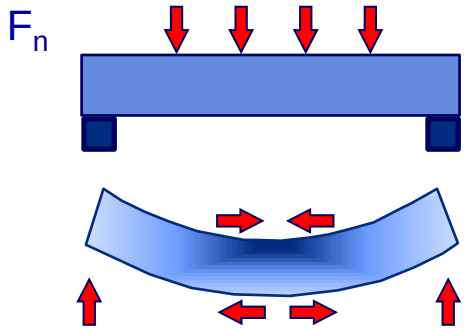
Torção



Cisalhamento

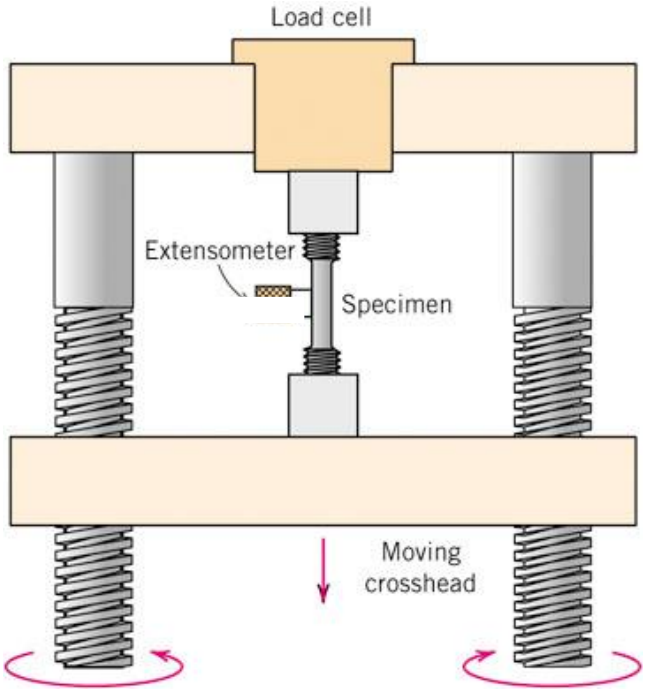


Flexão

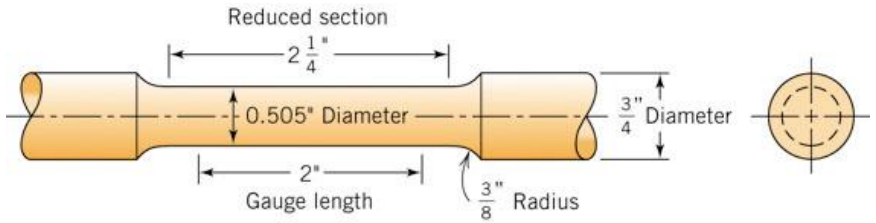


Ensaio de Tração

- 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

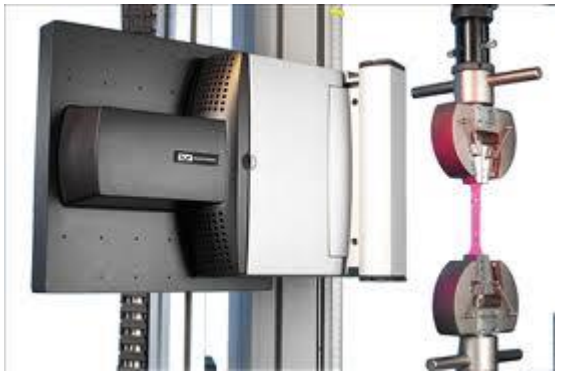


CORPO DE PROVA

Máquina Universal de Testes

Extensômetro

Mecânico

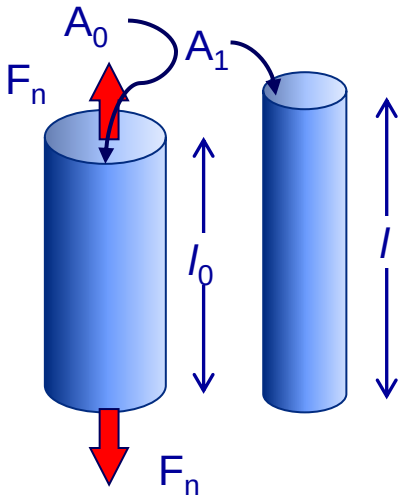


Video Extensômetro

Curva Tensão - Deformação

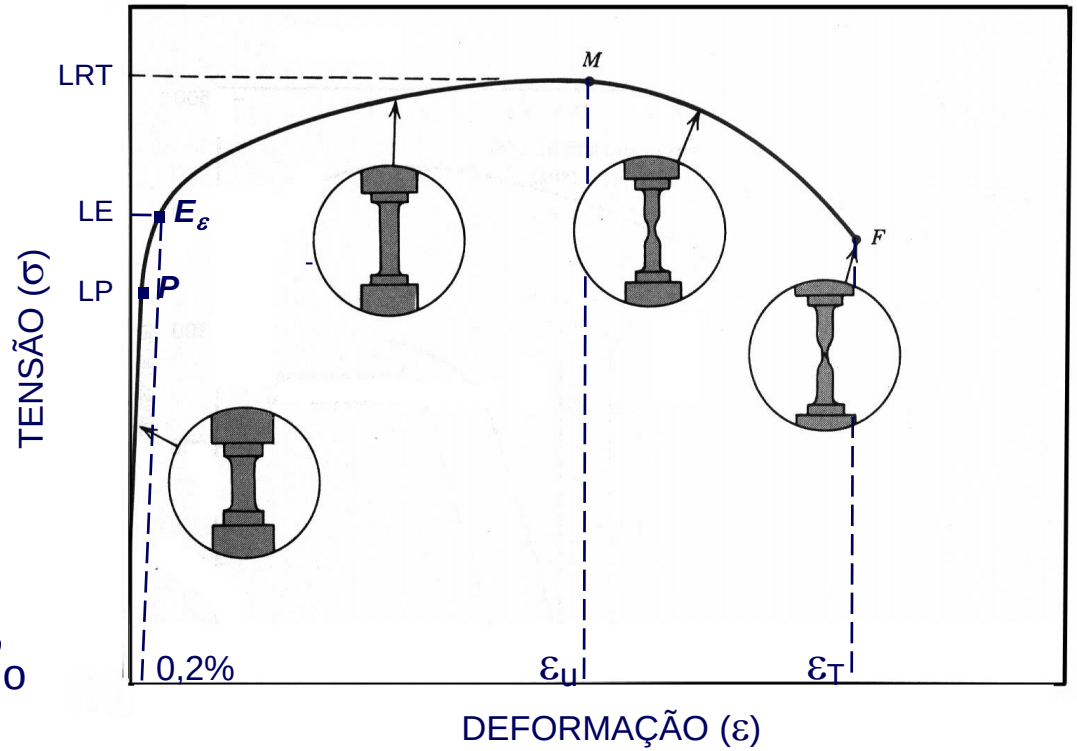
PMT 3100 Fundamentos de Ciência e Engenharia dos Materiais EPUSP - 2014

Tração



$$\sigma = F / A_o$$

$$\varepsilon = (\ell - \ell_o) / \ell_o = \Delta\ell / \ell_o$$

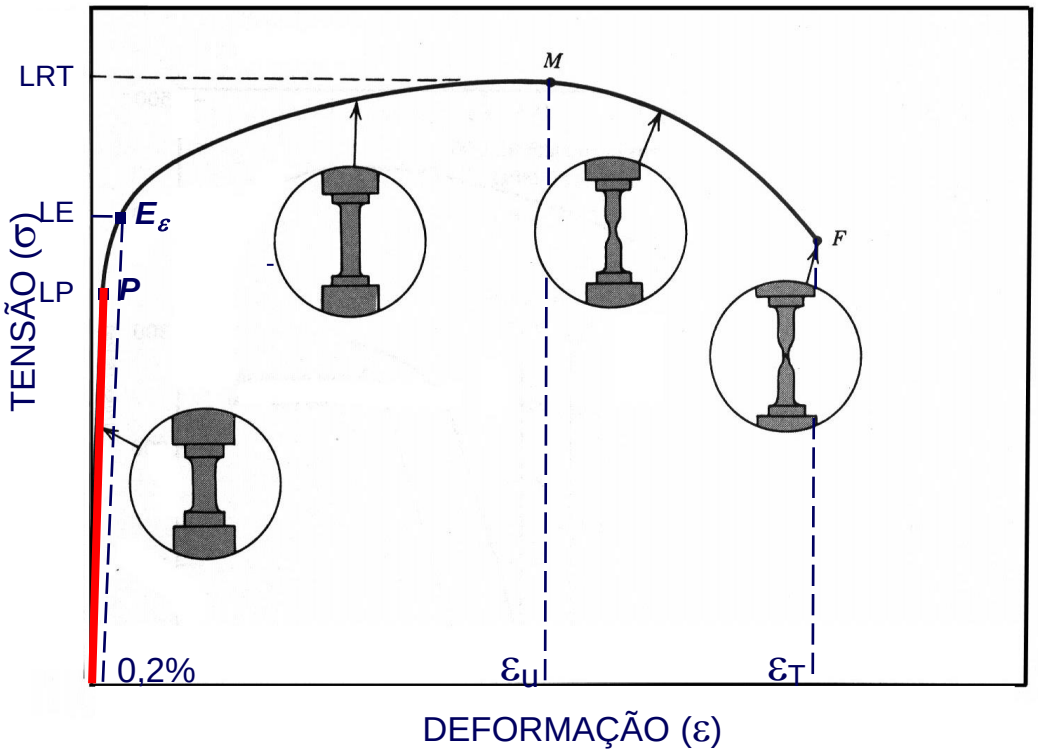


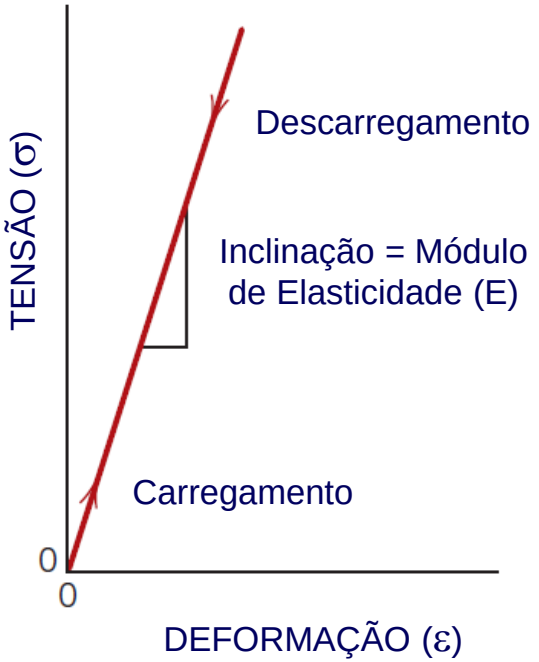
Comportamento representativo da curva TENSÃO DE ENGENHARIA em função da DEFORMAÇÃO DE ENGENHARIA obtida num ENSAIO DE TRAÇÃO de um *corpo metálico*.

Comportamento Elástico

Lei de Hooke $\sigma = E \times \varepsilon$

E – Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young

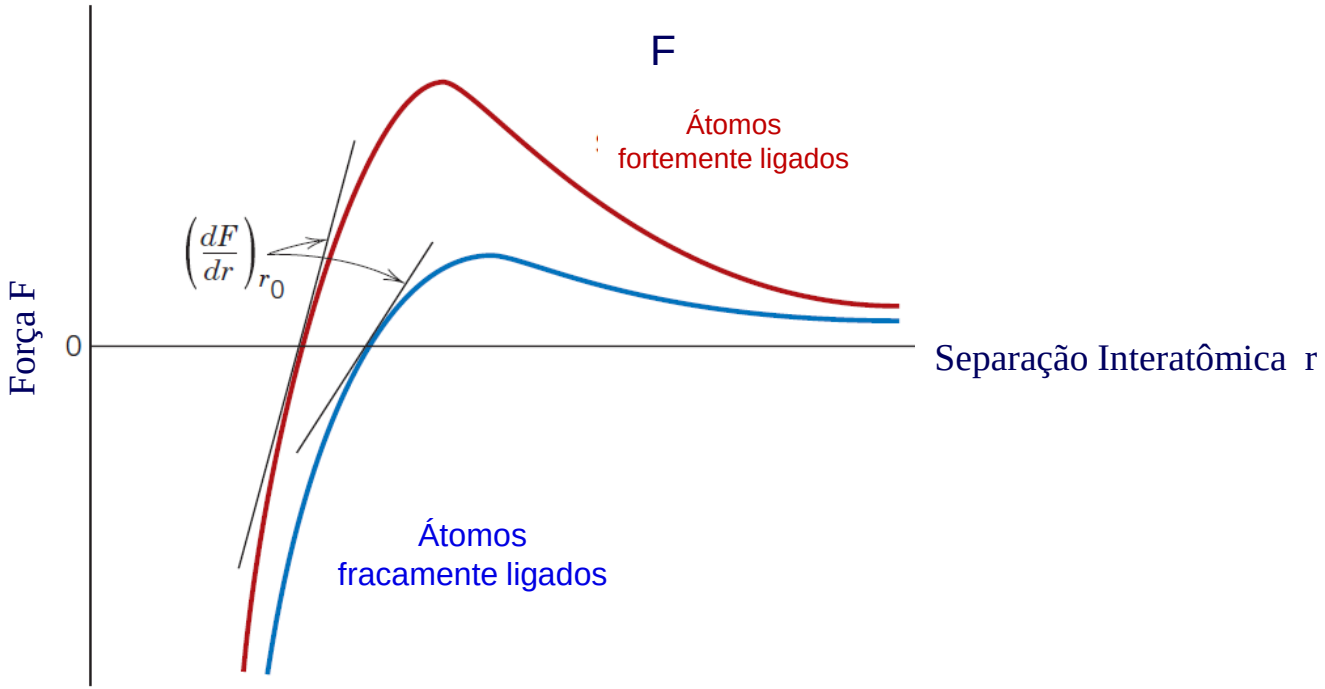




Perfil da curva de materiais frágeis (Ex: cerâmicas)

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*

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.

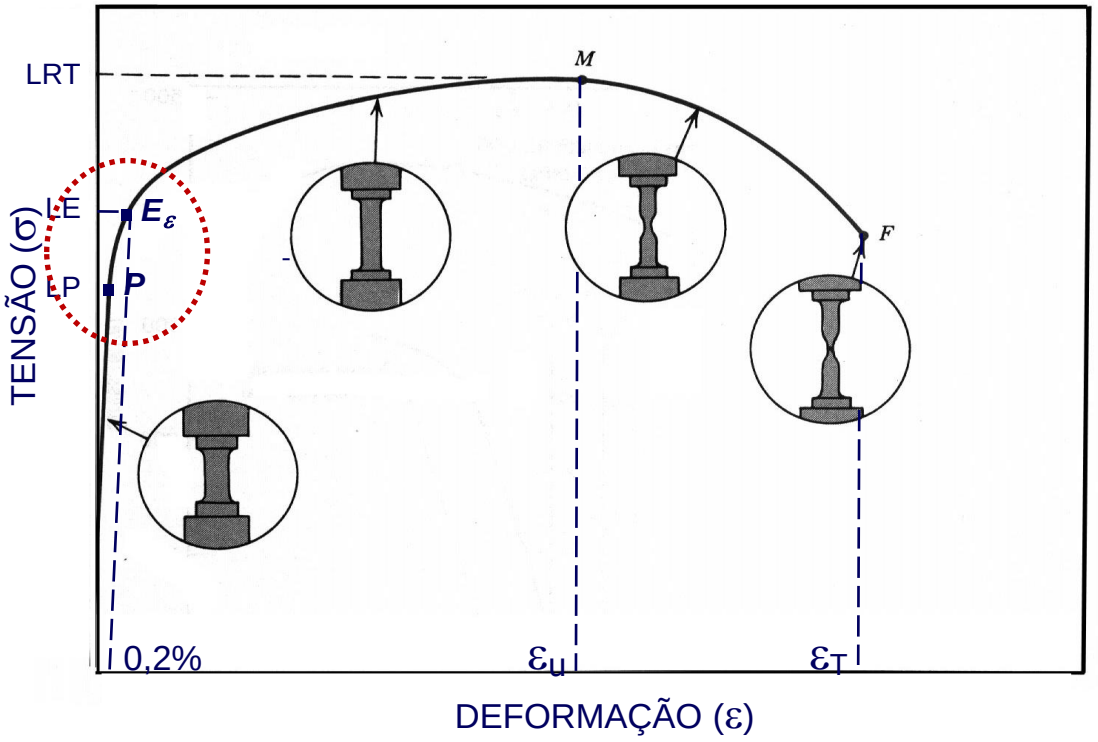
- Em uma escala atômica, a DEFORMAÇÃO ELÁSTICA macroscópica é manifestada como pequenas alterações no espaçamento interatômico e na extensão de ligações interatômicas.

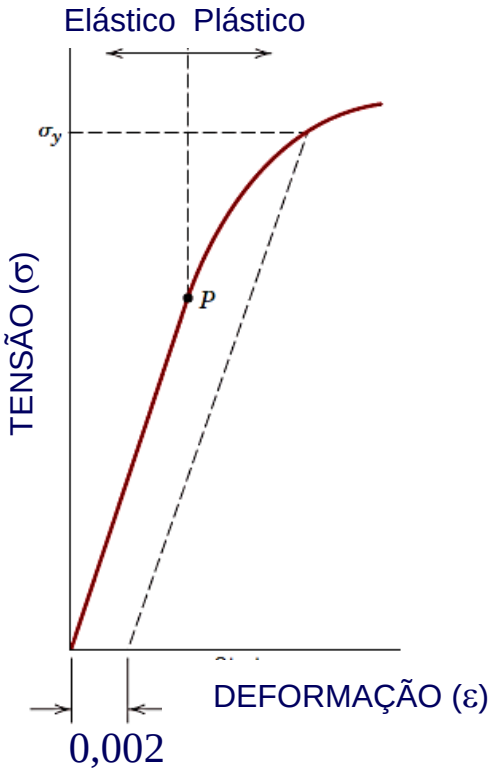
- Para a maioria dos materiais metálicos, as deformações elásticas ocorrem até deformações de ~0,5%.

- 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.

Transição Elástico - Plástico

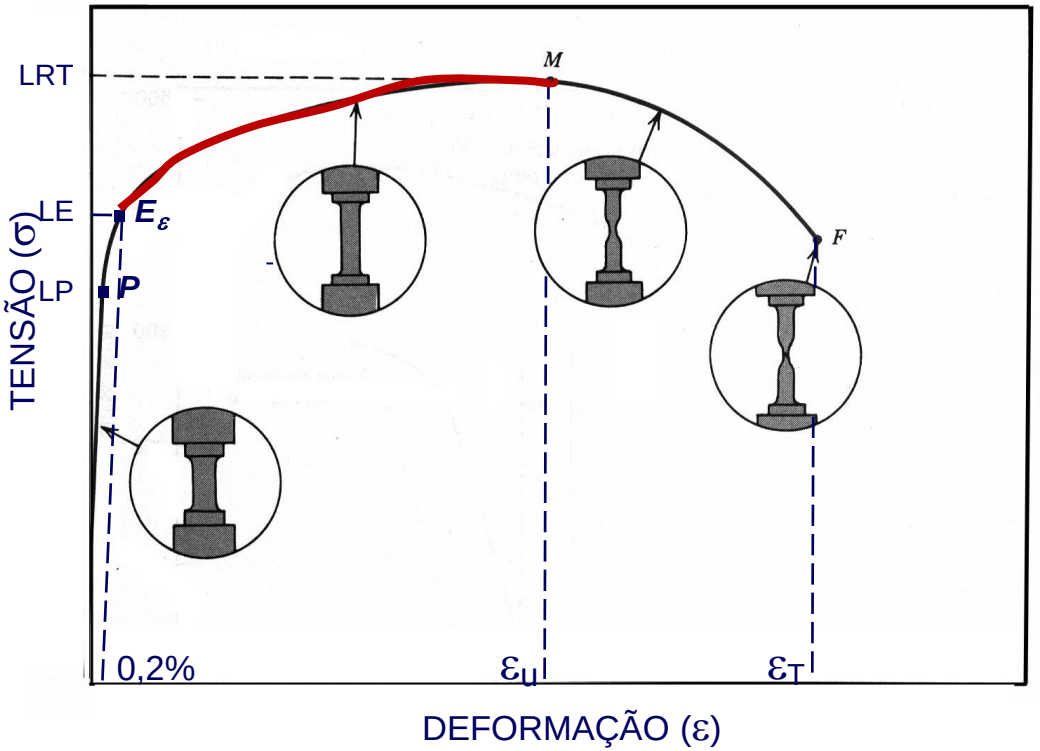
Limite de Escoamento (LE)





- Na prática, muitas vezes, é difícil definir a posição do ponto P com precisão. Como conseqüência, 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_ε corresponde a uma deformação de engenharia $\varepsilon = 0{,}002 = 0{,}2\%$.

Comportamento Plástico (Região I)



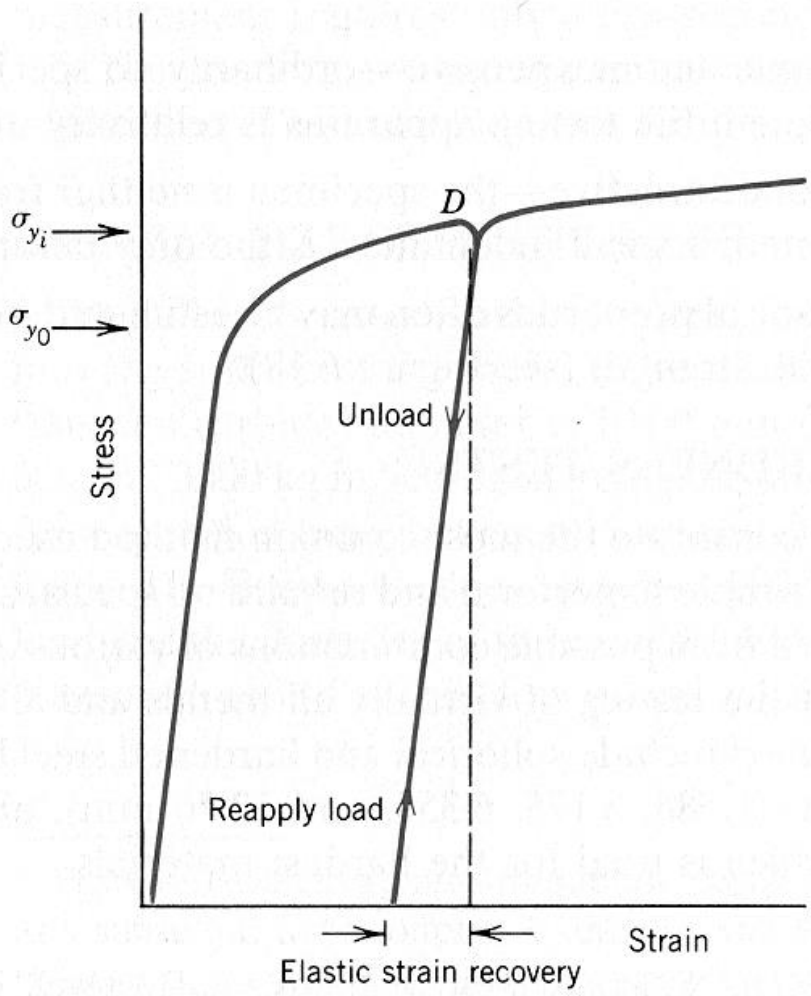
$$\sigma = k\,\varepsilon^n$$

k – Constante
n – índice de encruamento

•O ponto **M** corresponde ao LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO **(LRT)**, que é a tensão máxima atingida durante o ensaio.

•A deformação **(ε_u)** no ponto **M** corresponde ao máximo valor de ε com *alongamento uniforme***.** Deformações maiores que ε_u ocorrem com *estricção* (*empescoçamento*).

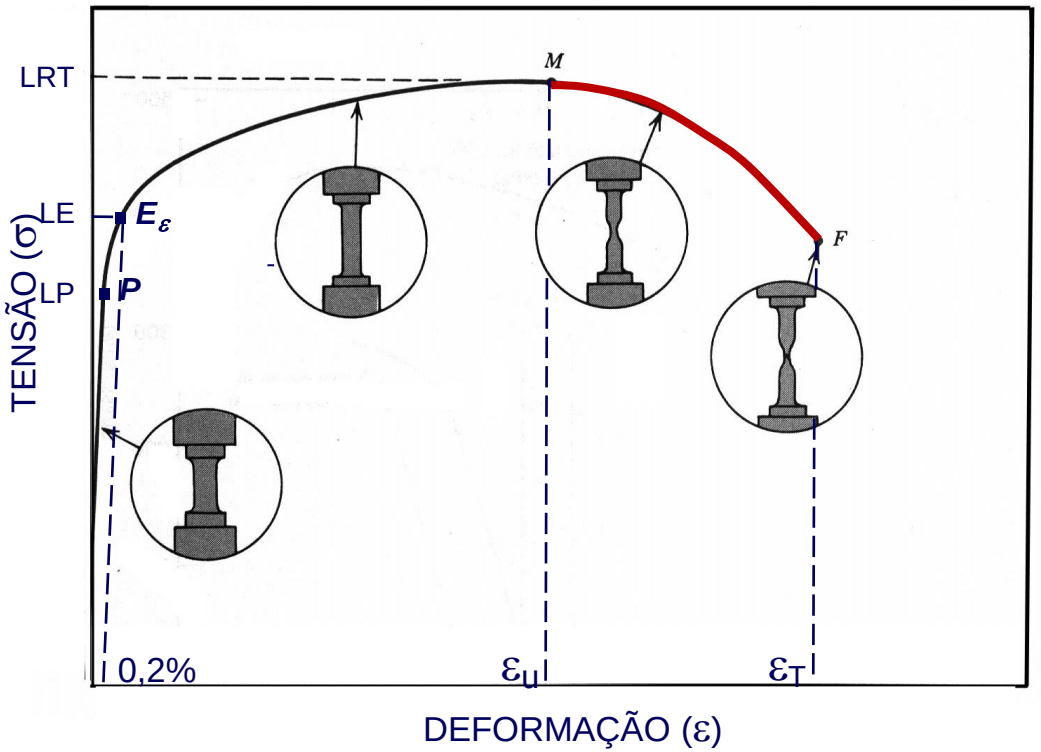
Recuperação Elástica e Encruamento



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

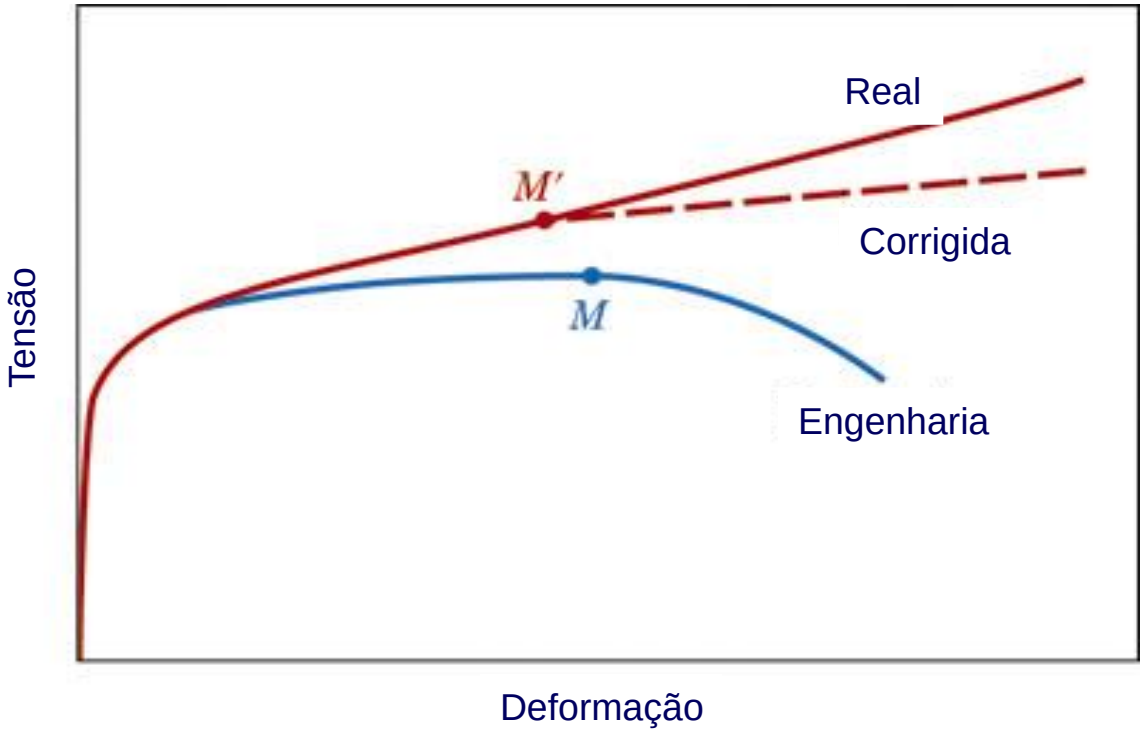
Encruamento é o aumento na dureza e na resistência mecânica de um metal dúctil à medida em que ele passa por uma deformação plástica em temperatura abaixo de sua temperatura de recristalização.

Comportamento Plástico (Região II)



•A *fratura* ocorre no ponto **F**. A deformação (ε_T) na fratura corresponde ao *alongamento total*

Curva Tensão Real - Deformação Real

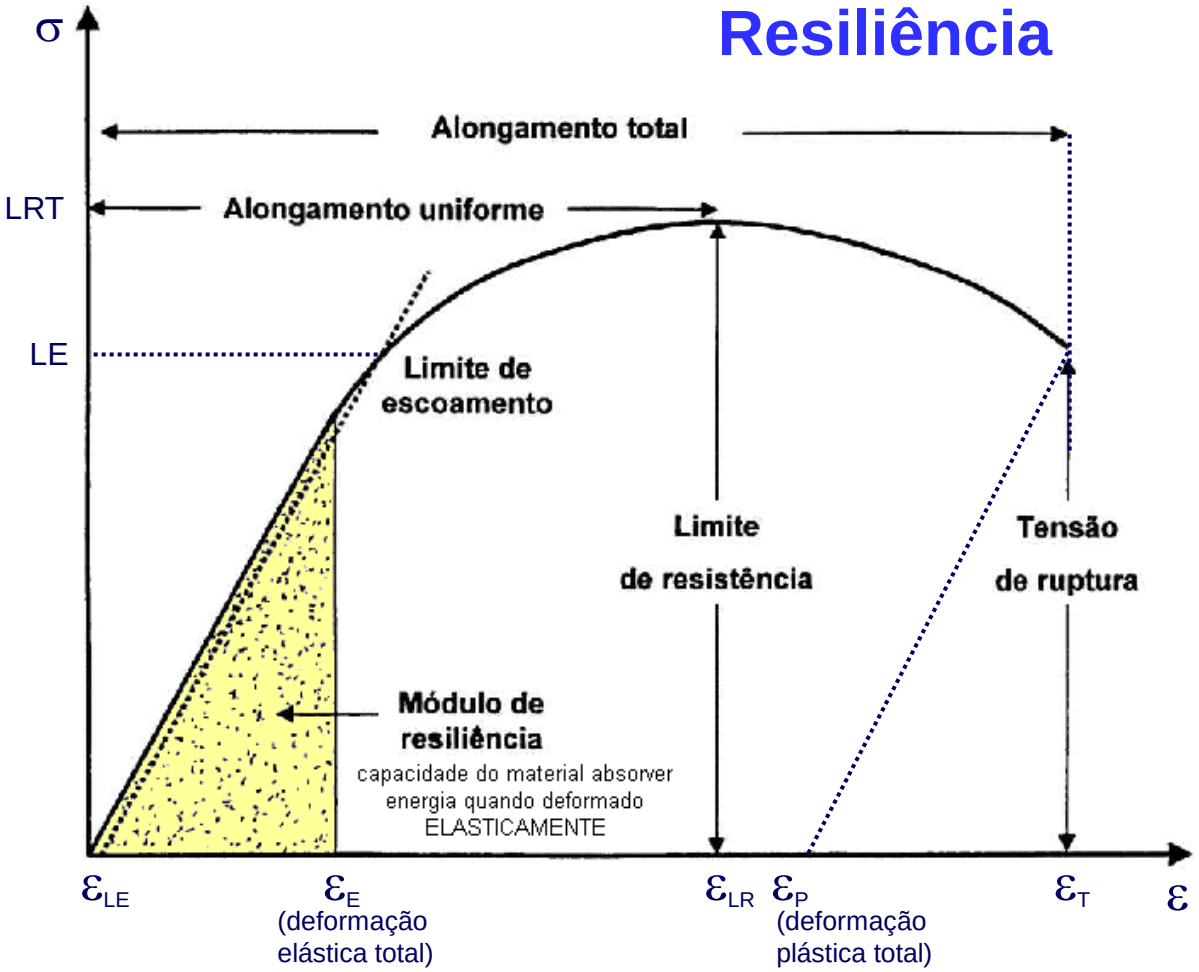


- Equações válidas até o início do empescoçamento (pontos M e M'):

$$\sigma_R = \frac{F}{A} = \sigma(\varepsilon + 1) \qquad \varepsilon_R = \ln\frac{\ell_N}{\ell_0} = \ln(\varepsilon + 1)$$

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

Resiliência



Porcentagem de alongamento $\%\varepsilon_T$

$$\%\varepsilon_T = \left(\frac{\ell_f - \ell_0}{\ell_0}\right) x100$$

Porcentagem de redução de área %RA

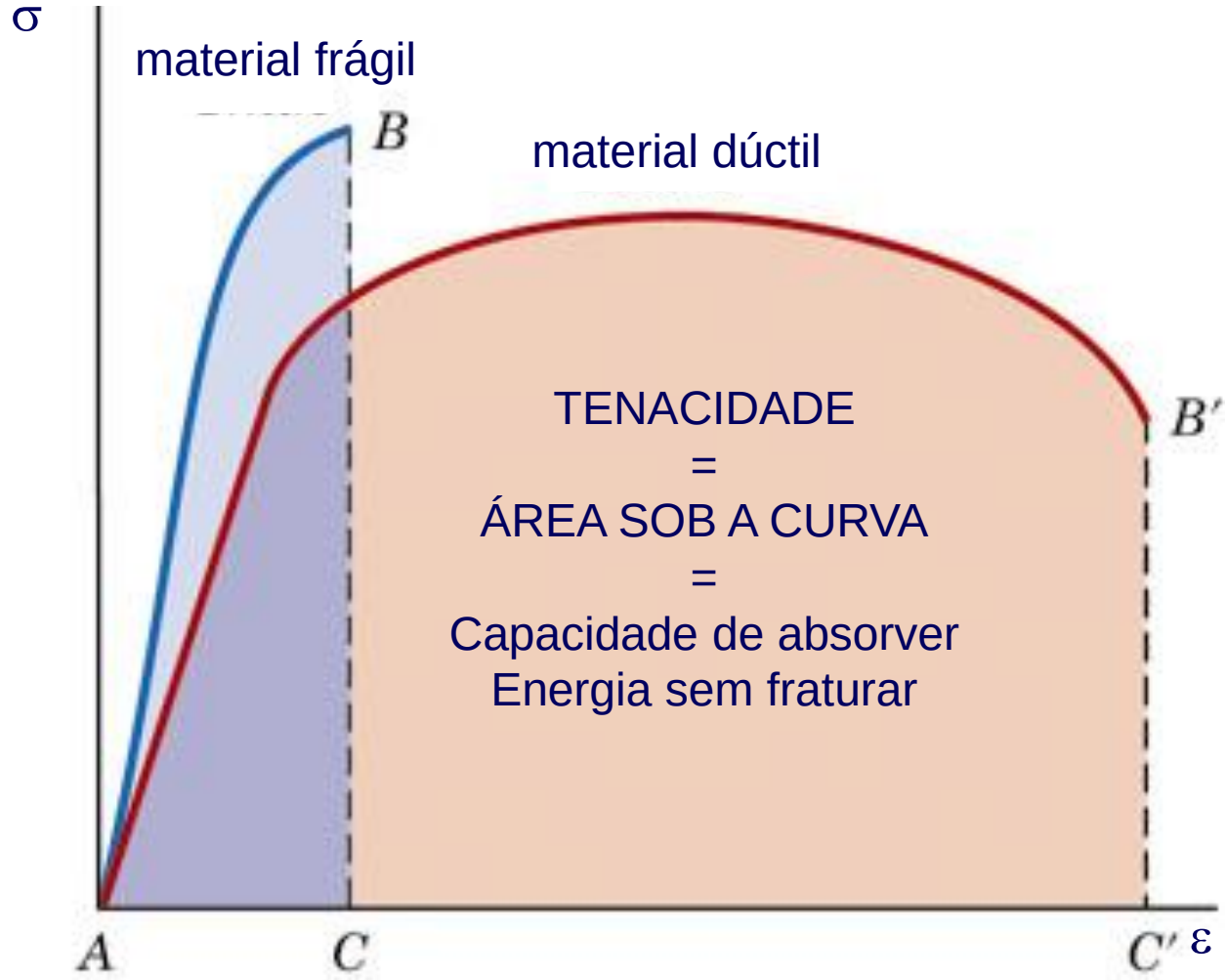
$$\%RA = \left(\frac{A_o - A_f}{A_o}\right) x100$$

- LE, LRT e E representam habilidades do material de suportar cargas em diferentes condições.
- ε_{LE}, ε_E, ε_{LR}, ε_P, a resiliência e a **tenacidade** quantificam a habilidade do material em se deformar

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

Materiais Dúcteis e Frágeis

Curva Tensão - Deformação

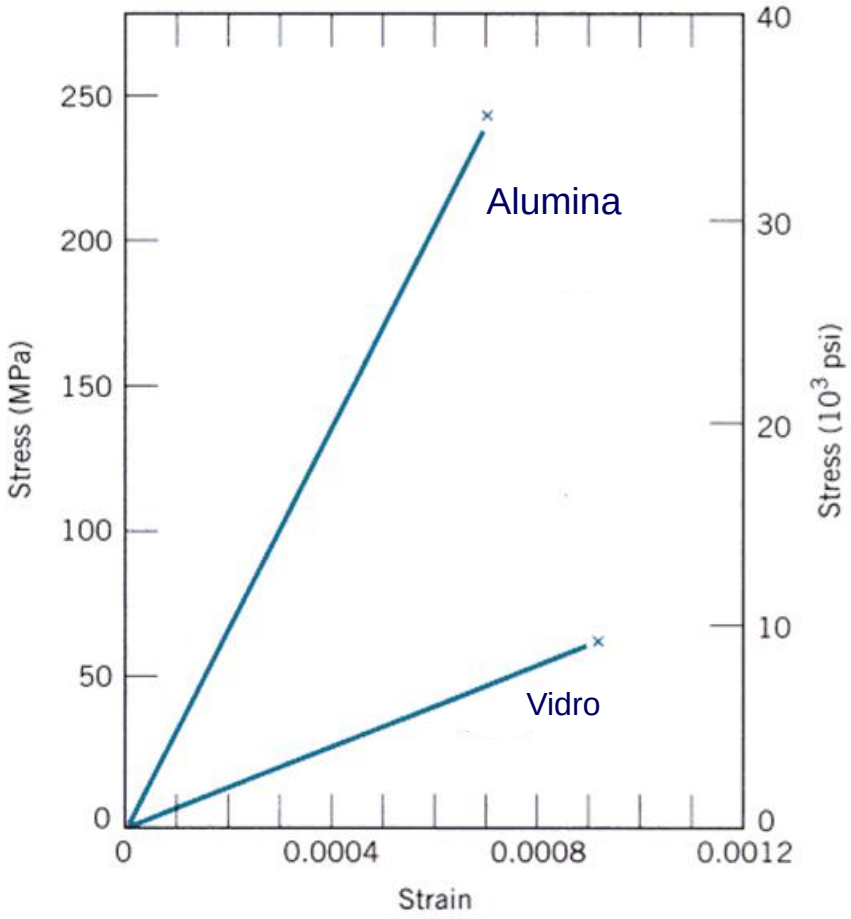


Propriedades de Tração de Alguns Metais

Metal Alloy	*Yield Strength MPa (ksi)*	*Tensile Strength MPa (ksi)*	*Ductility, %EL [in 50 mm (2 in.)]*
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

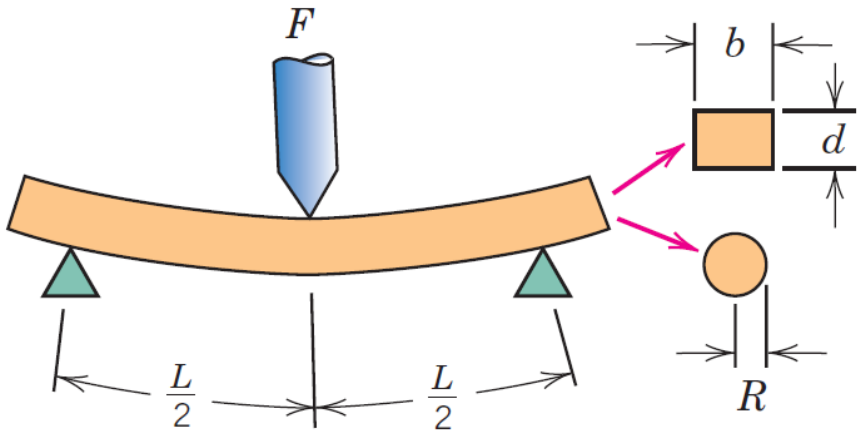
Porém, ensaio de difícil execução em materiais cerâmicos devido à:

- **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

Seção Transversal



Suporte

Retangular

Circular

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

M = momento fletor máximo
c = distância do centro do corpo de prova
I = momento de Inércia
F = Carga aplicada

	M	c	I	Σ
Retangular	$\frac{FL}{4}$	$\frac{d}{2}$	$\frac{bd^3}{12}$	$\frac{3FL}{2bd^2}$
Circular	$\frac{FL}{4}$	R	$\frac{\pi R^4}{4}$	$\frac{FL}{\pi R^3}$

Propriedades de Flexão de Alguns Materiais Cerâmicos

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

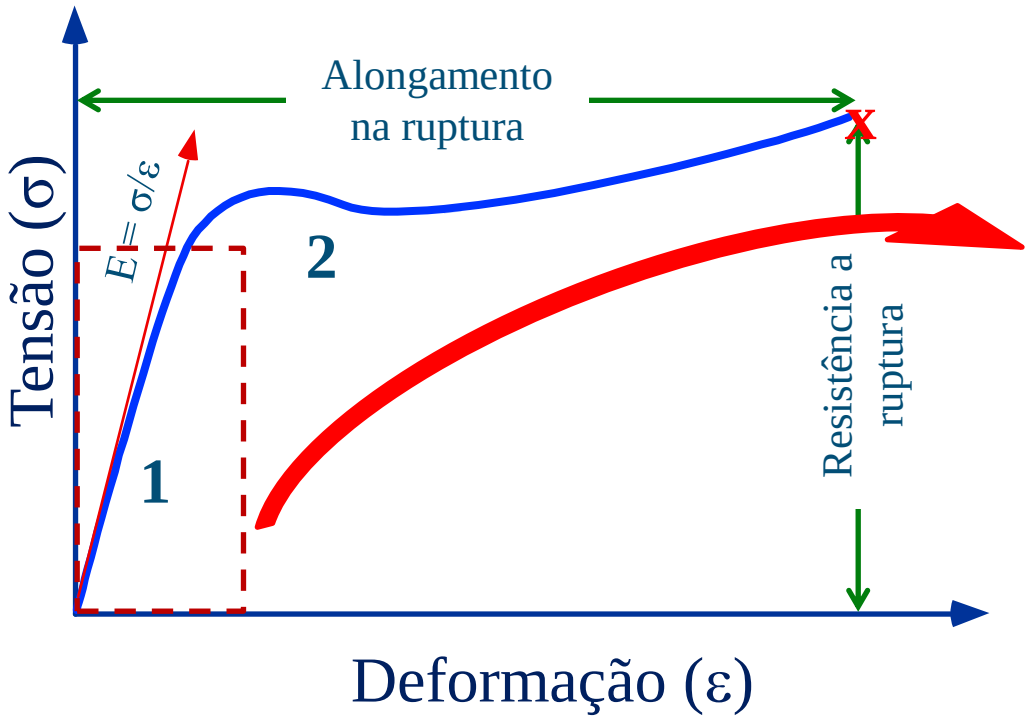
Material	Flexural Strength		Modulus of Elasticity	
	MPa	ksi	GPa	10^6 psi
Silicon nitride (Si_3N_4)	700–1000	100–145	304	44
Zirconia[a] (ZrO_2)	634	92	200	29
Silicon carbide (SiC)	552–862	80–125	430	62
Aluminum oxide (Al_2O_3)	275–550	40–80	393	57
Glass-ceramic (Pyroceram)	241	35	120	17
Mullite ($3Al_2O_3$-$2SiO_2$)	185	27	145	21
Spinel ($MgAl_2O_4$)	110–245	16–35.5	260	38
Fused silica (SiO_2)	110	16	73	11
Magnesium oxide (MgO)	105[b]	15[b]	225	33
Soda-lime glass	69	10	69	10

[a] Partially stabilized with 3 wt% MgO.
[b] Sintered and containing approximately 5% porosity.

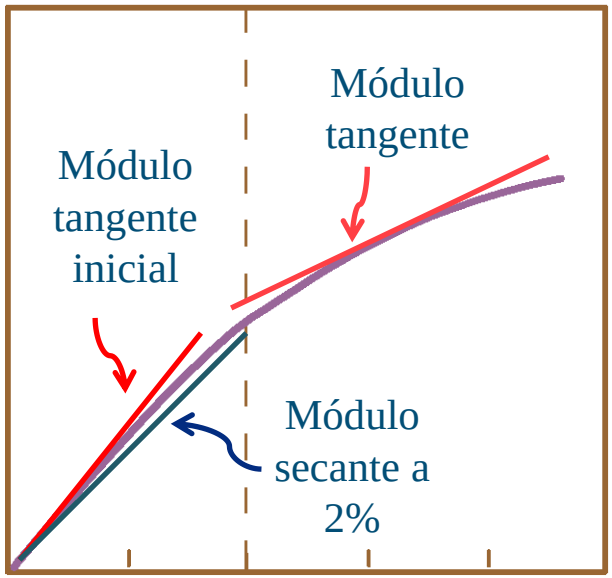
Características das propriedades mecânicas típicas de materiais Poliméricos

PMT 3100 Fundamentos de Ciência e Engenharia dos Materiais EPUSP - 2014

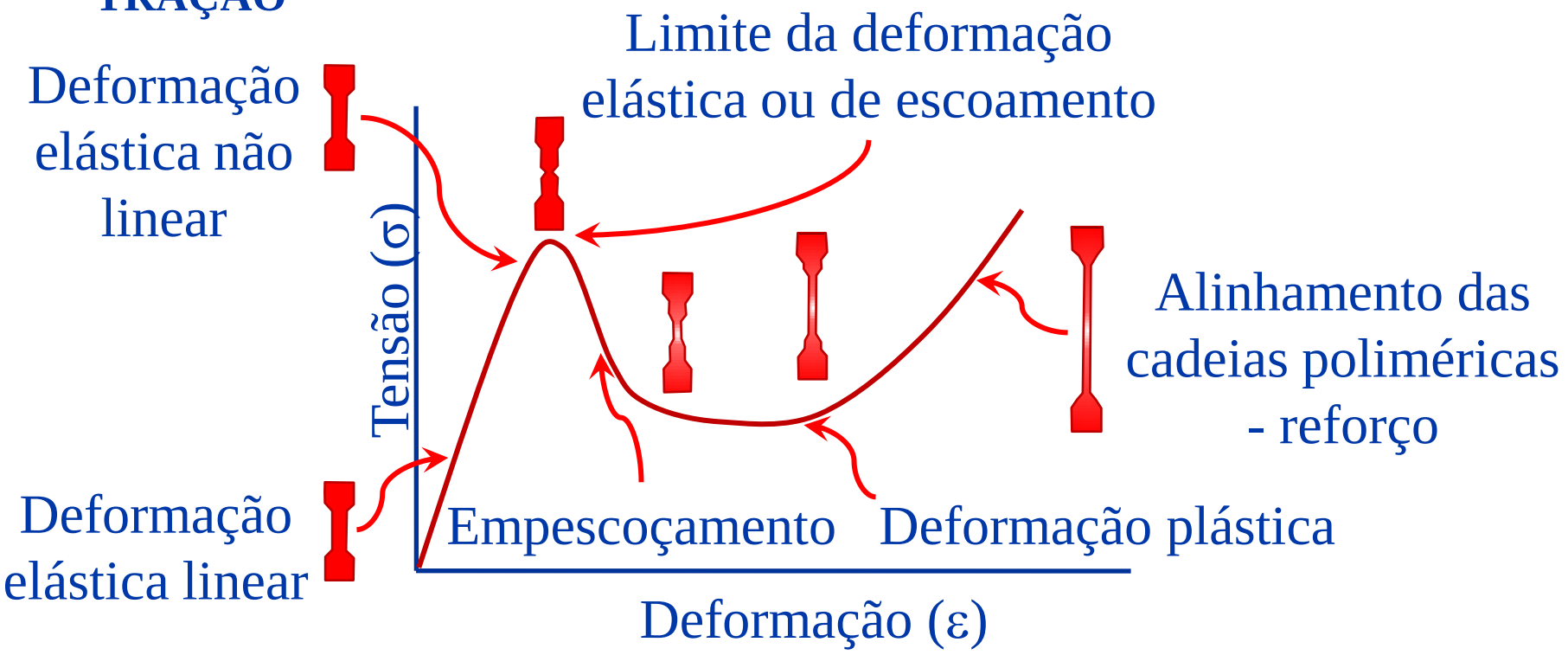
Diagrama tensão-deformação nominal

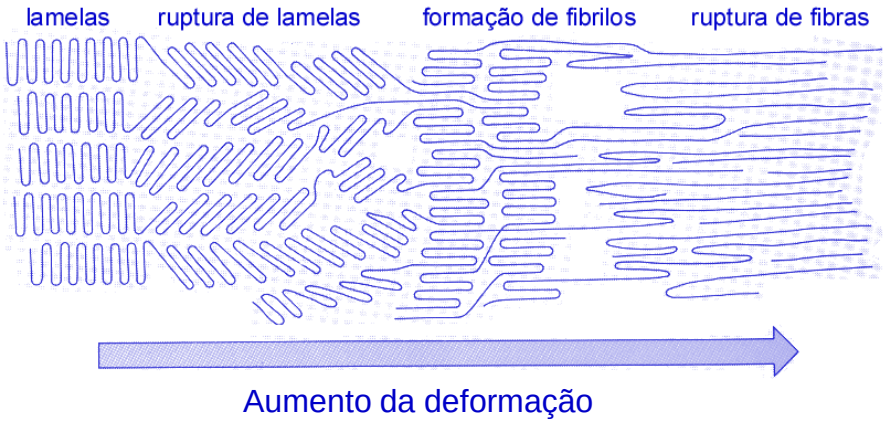


Módulos típicos referentes aos materiais poliméricos

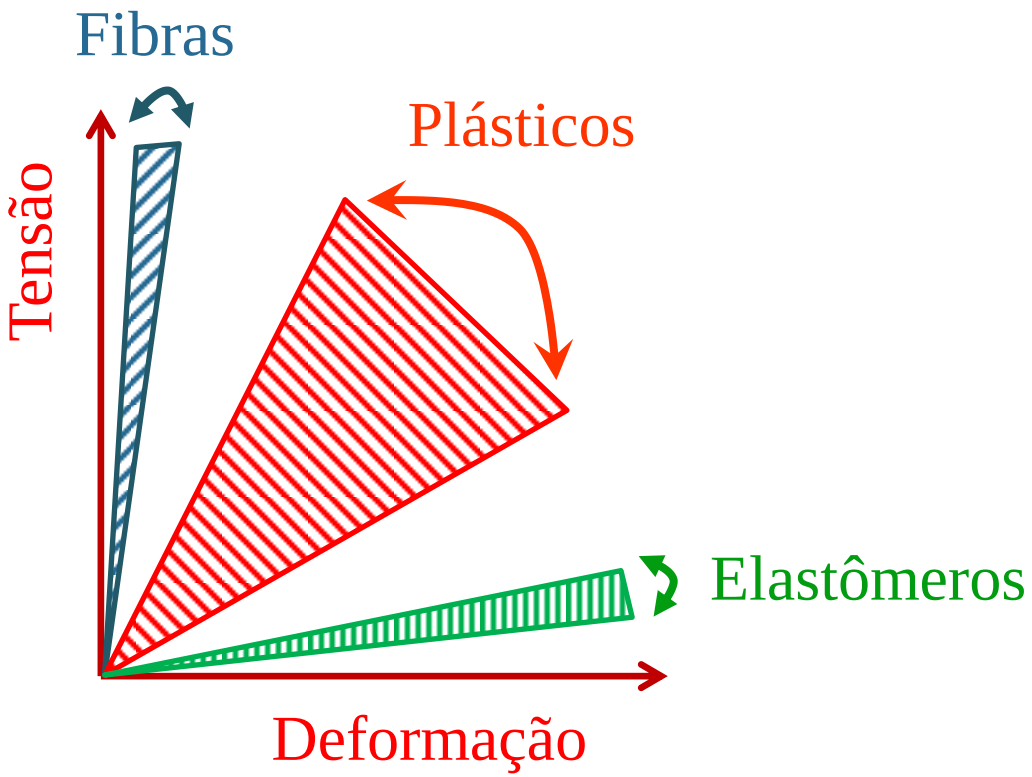


FENÔMENOS COM O MATERIAL POLIMÉRICO SOB TRAÇÃO





Comportamento típico de tensão-deformação para fibras plásticos e elastômeros

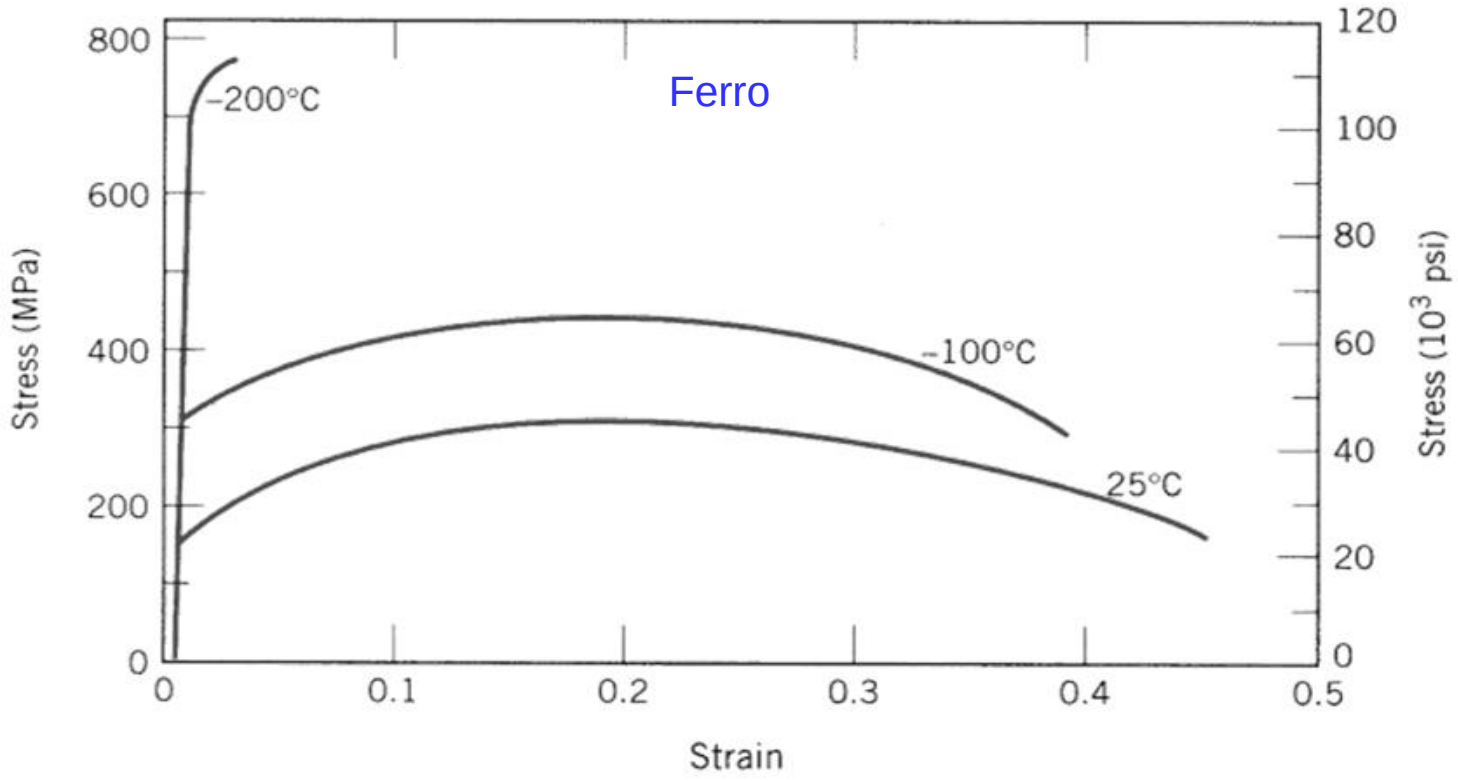


Propriedades mecânicas características de diferentes tipos de polímeros

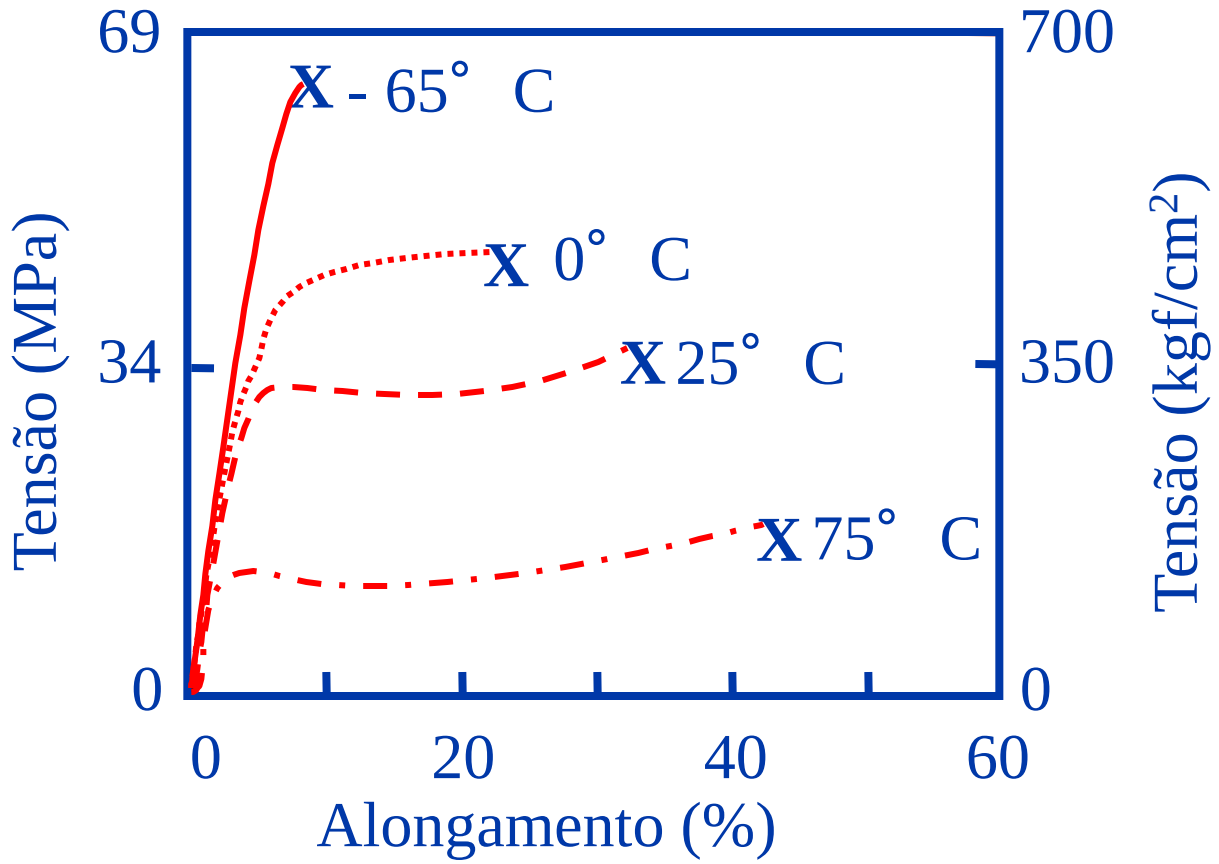
Tipo de Polímero	Módulo	Tensão no Escoamento	Alongamento no Escoamento	Tensão na Ruptura	Alongamento na Ruptura
Maleável e fraco	Baixo	Baixa	Moderado	Baixa	Moderado
Maleável e tenaz	Baixo	Baixa	Moderado	Moderada	Alto
Duro e tenaz	Alto	Alta	Moderado	Alta	Alto
Duro e forte	Alto	Alta	Moderado	Alta	Moderado
Duro e frágil	Alto	Não há	Não há	Moderada	Baixo

Efeito da Temperatura sobre as Curvas Tensão - Deformação

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



Curvas tensão-deformação do acetato de celulose a diferentes temperaturas



Efeito da Temperatura sobre a Deformação Plástica

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

- Portanto:

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

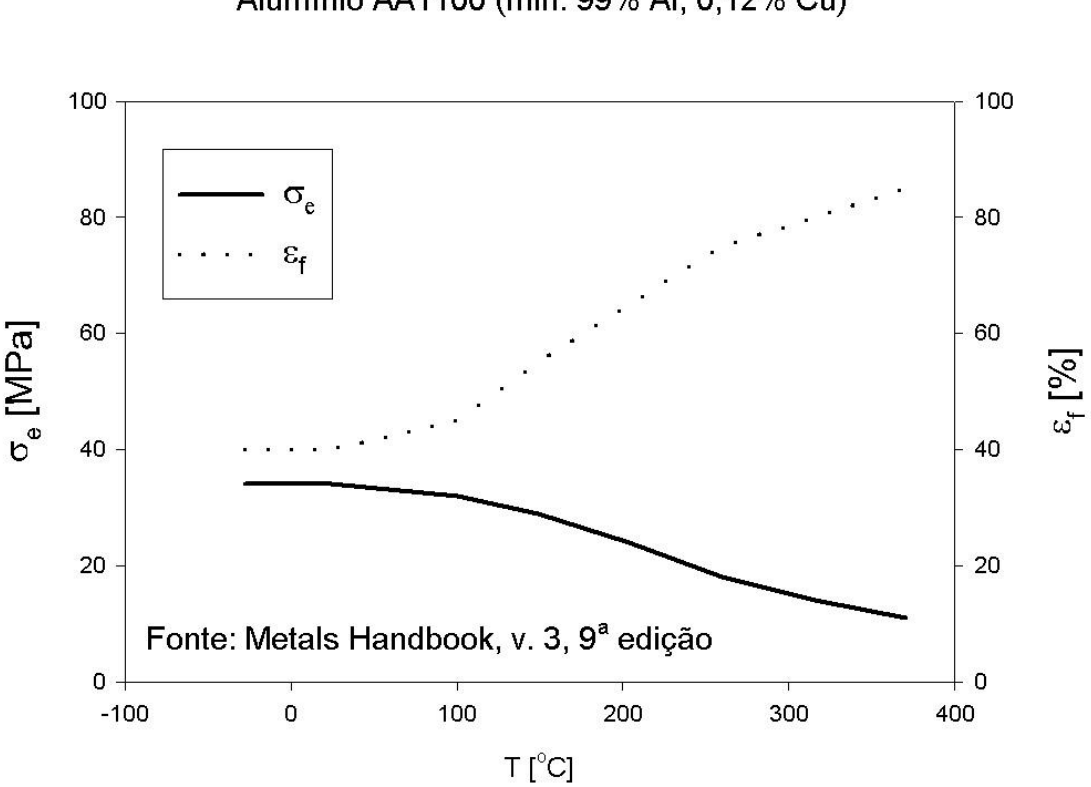
e

↑ alongamento

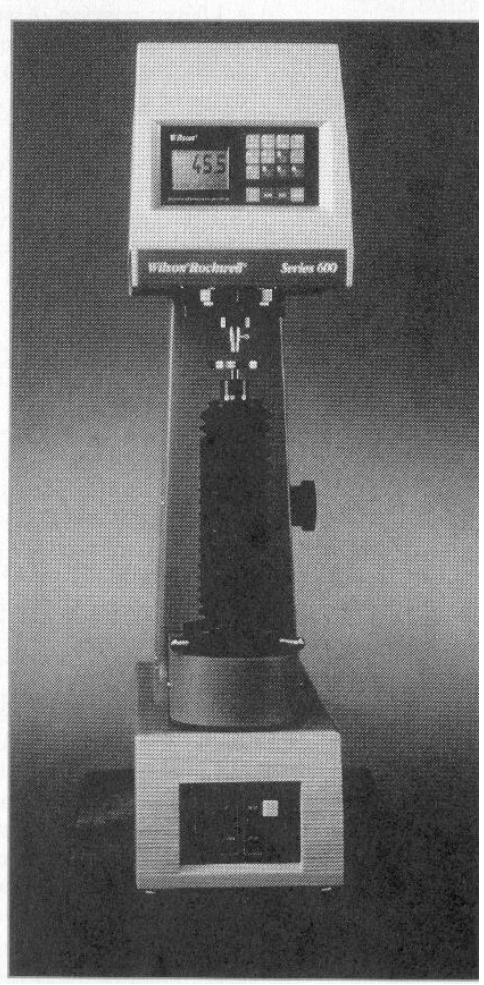
- *Aplicações* : conformação mecânica de materiais metálicos, poliméricos e cerâmicos (vidros).

Exemplo

Variação do limite de escoamento (σ_e) e do alongamento para fratura (ε_f) com a temperatura para alumínio AA1100.



Dureza



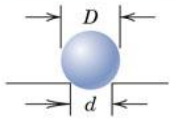
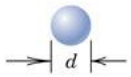
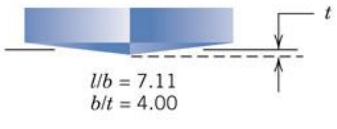
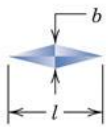
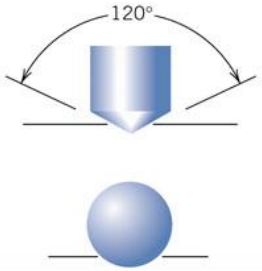
- O ensaio consiste na aplicação de uma *carga* conhecida através de um *penetrador* de geometria conhecida e na medição da *área* da impressão produzida na superfície do corpo de prova.
- Ensaio de grande importância tecnológica (controle de qualidade)
- Dureza, ao contrário do limite de escoamento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

Dureza

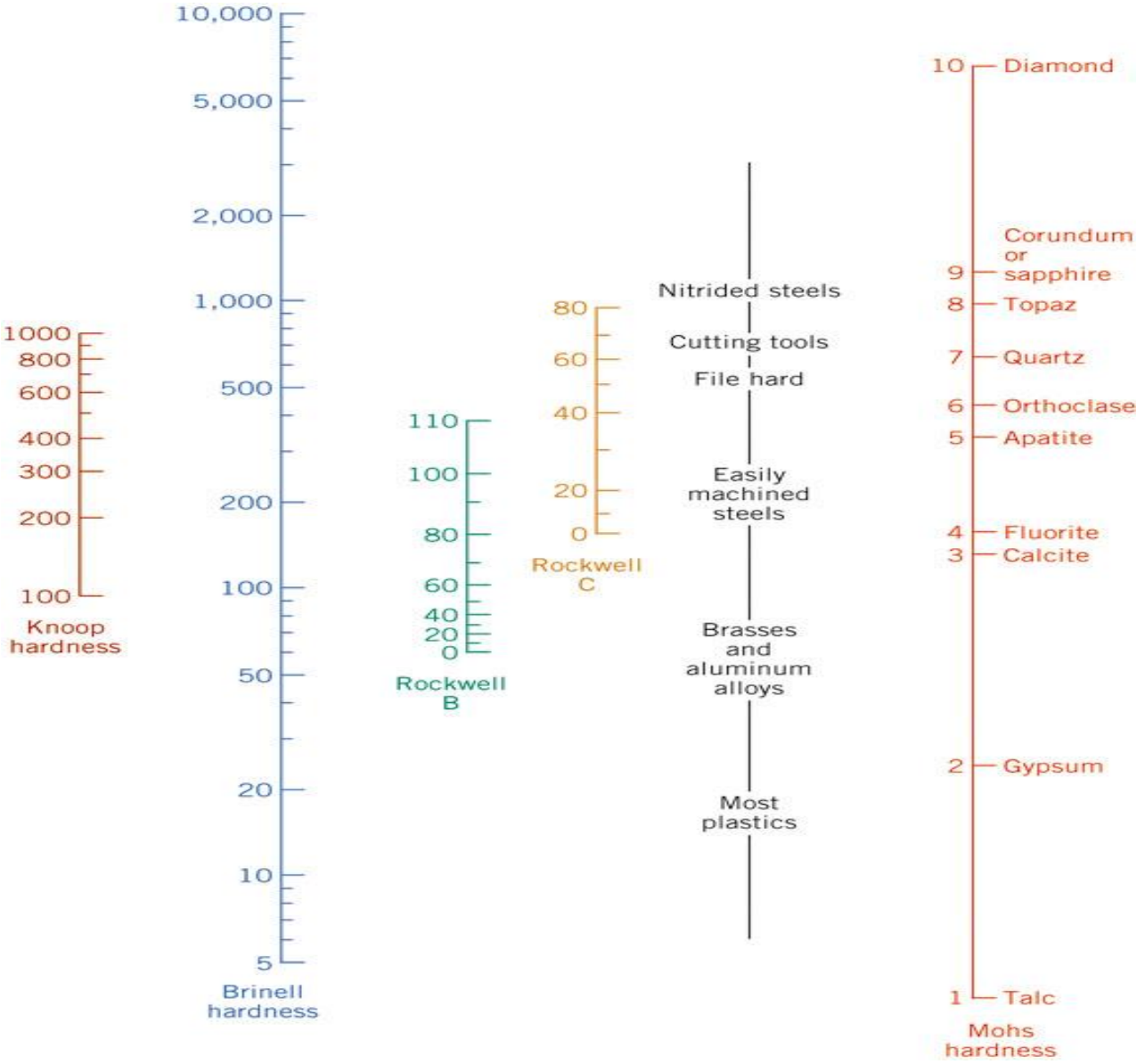
As primeiras medidas de dureza foram feitas comparando a capacidade dos diversos materiais de riscarem uns aos outros (Dureza Mohs).

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

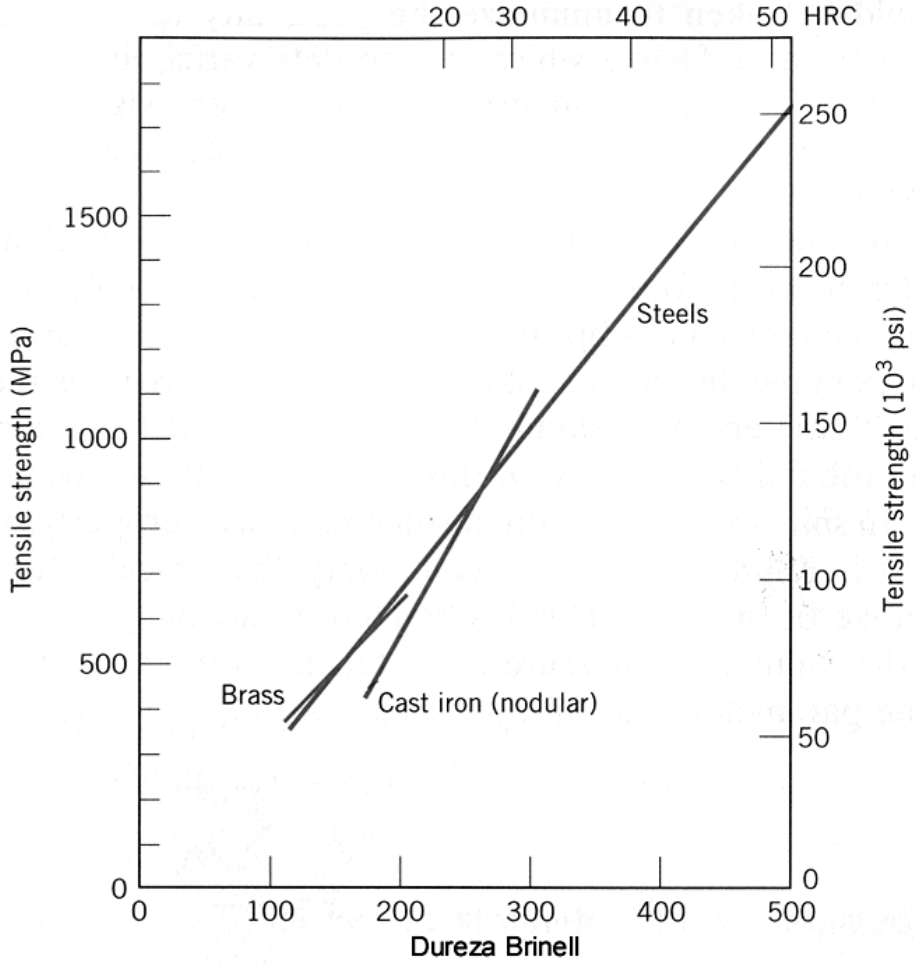
Ensaios de Dureza

Test	Indenter	Shape of Indentation: Side View	Shape of Indentation: Top View	Load	Formula for Hardness Number[a]
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	Diamond cone; $\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}$ in. diameter steel spheres			60 kg, 100 kg, 150 kg: Rockwell 15 kg, 30 kg, 45 kg: Superficial Rockwell	

Comparação da Dureza de Alguns Materiais



Relação entre Dureza e Limite de Resistência a Tração



Para a maioria dos aços:

LRT (MPa) = 3,45 x 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.

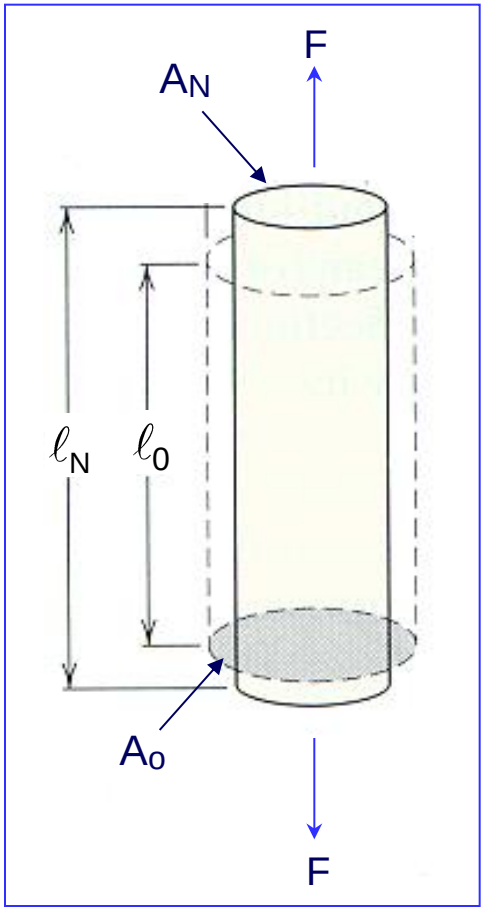
Capítulos do Callister, 7ª ed., 2008, tratados nesta aula

- 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

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 ε vale

$$\varepsilon = \frac{\ell_N - \ell_0}{\ell_0}.$$

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

$$\varepsilon_R = \frac{\ell_1 - \ell_0}{\ell_0} + \frac{\ell_2 - \ell_1}{\ell_1} + \ldots + \frac{\ell_N - \ell_{N-1}}{\ell_{N-1}} = \sum_{i=1}^{N} \frac{\ell_i - \ell_{i-1}}{\ell_{i-1}}$$

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

$$\varepsilon_R = \int_{\ell_0}^{\ell_N} \frac{d\ell}{\ell} = \ln \frac{\ell_N}{\ell_0} = \ln(\varepsilon + 1).$$

ε_R é a denominada DEFORMAÇÃO REAL e a sua correlação com ε é apresentada na equação acima.

Deformação de Engenharia e Deformação Real

- Seja $\ell_0 = 1{,}0\,\text{m}$ e consideremos dois valores para o comprimento final, $\ell_{N1} = 2$ e $\ell_{N2} = \ell_0 / 2 = 0{,}5\,\text{m}$.

Para a deformação de engenharia obtemos

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

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

(Os resultados não apresentam a simetria física esperada.)

Para a deformação real obtemos

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

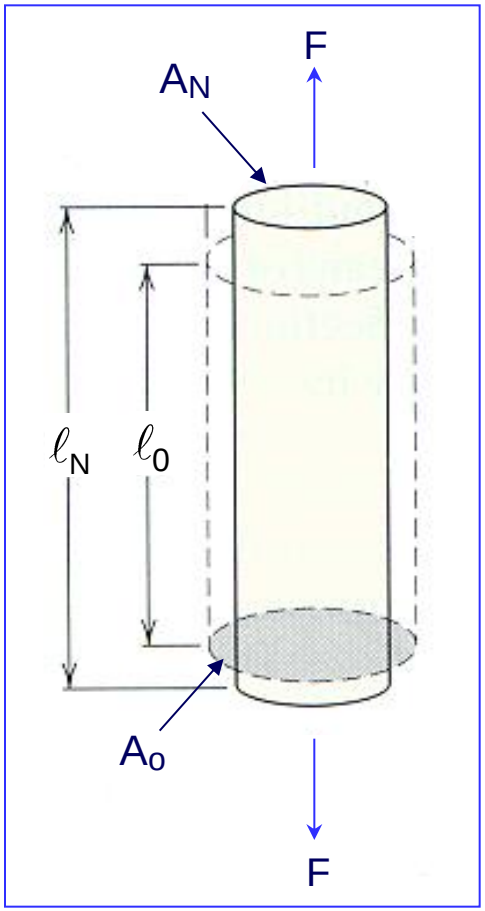
$$\ell_{N2} = 0{,}5\,\text{m} \Rightarrow \varepsilon_{R2} = \ln 0{,}5 = -\ln 2$$

(Os resultados apresentam a simetria física esperada.)

- 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 σ_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 σ é dada por

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

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

- 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:

$$A_0 \ell_0 = A \ell \;\Rightarrow\; \frac{A_0}{A} = \frac{\ell}{\ell_0} = \varepsilon + 1 \;\Rightarrow\; \sigma_R = \sigma(\varepsilon + 1)$$