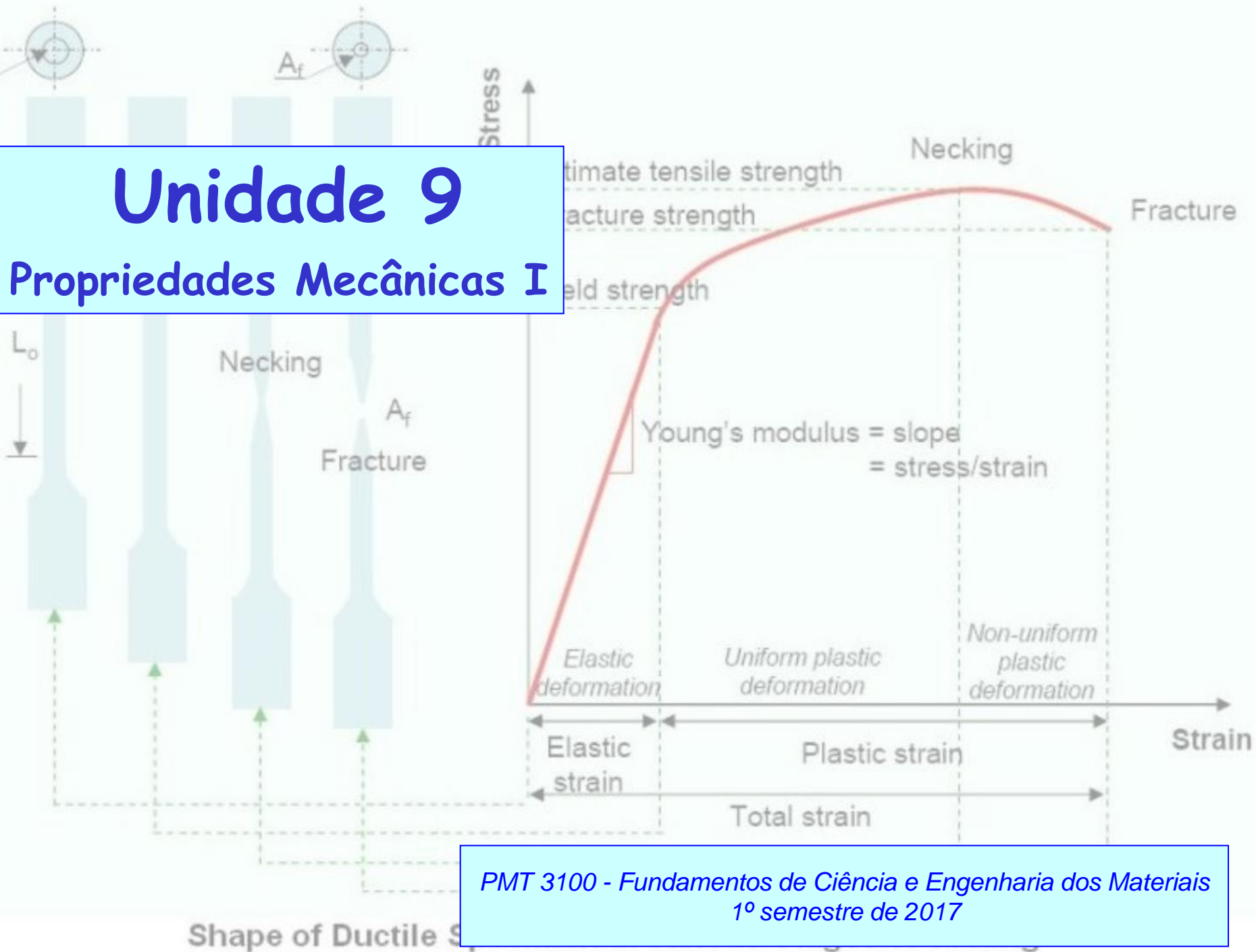


# Unidade 9

## Propriedades Mecânicas I



## Importância Tecnológica

- Materiais de Engenharia são selecionados combinando suas **propriedades mecânicas** com **as especificações de projeto e as condições de serviço** requeridas para o componente.
- O primeiro passo no processo de seleção requer uma análise da **aplicação do material** para determinar suas características mais importantes: **o material deve ser forte, duro ou dúctil? Será submetido a uma aplicação que envolva alta tensão ou força intensa súbita? condições corrosivas ou abrasivas?**
- Uma vez conhecidas as propriedades requeridas, podemos fazer uma **seleção** preliminar do material apropriado usando várias bases de dados.

# Conceitos de Tensão e Deformação

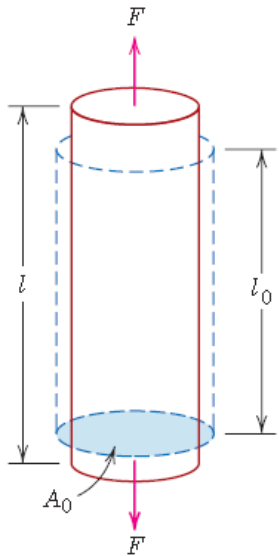
- O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre a sua resposta (ou **DEFORMAÇÃO**) a uma carga (ou **TENSÃO**) que esteja sendo aplicada sobre um corpo fabricado deste material.
- Algumas propriedades mecânicas importantes são a *resistência*, a *dureza*, a *ductilidade* e a *rigidez*.
- 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.

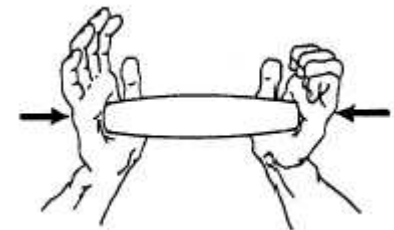
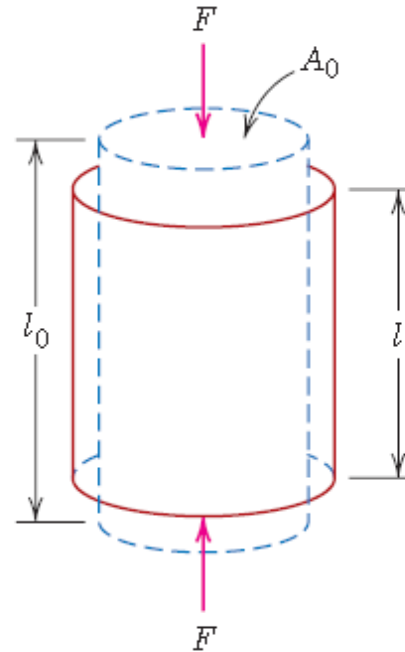
• As **DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS** são permanentes, isto é, permanecem após a tensão aplicada ser retirada. **Deformações plásticas são irreversíveis**, sendo acompanhadas por deslocamentos atômicos permanentes.

# Conceitos de Tensão e Deformação

- As *FORMAS DE APLICAÇÃO DE TENSÃO* podem ser : tração, compressão, cisalhamento e torção.



**Tração**  
(tensile stress)



**Compressão**  
(compressive stress)

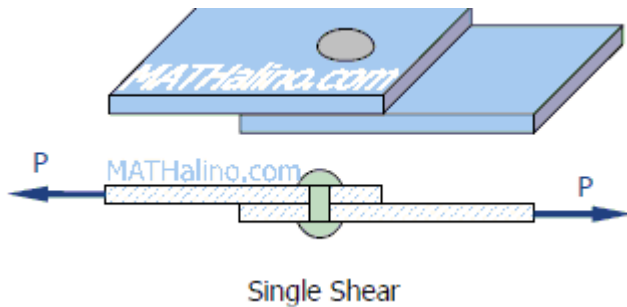
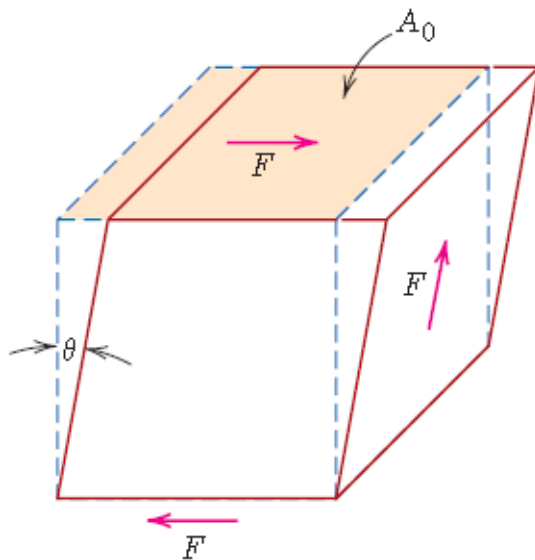
Note que a tensão e a pressão são grandezas fisicamente análogas, ambas tendo unidades de força dividida por área → no Sistema Internacional : Newton/metro<sup>2</sup>

# Conceitos de Tensão e Deformação

- As **FORMAS DE APLICAÇÃO DE TENSÃO** podem ser : tração, compressão, cisalhamento e torção.

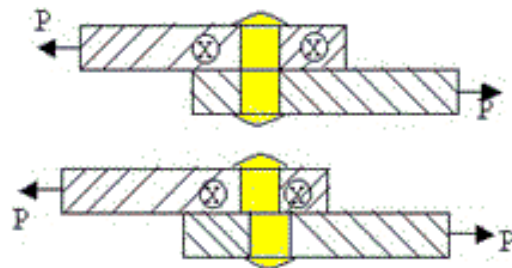
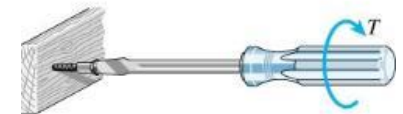
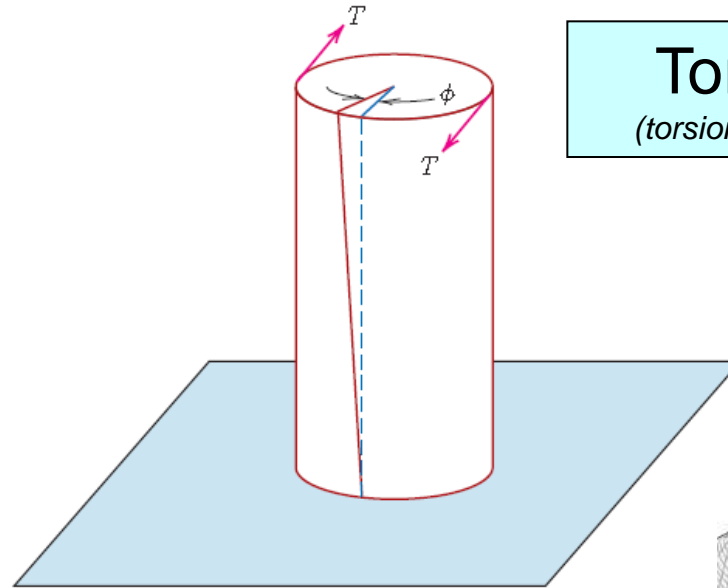
## Cisalhamento

(shear stress)



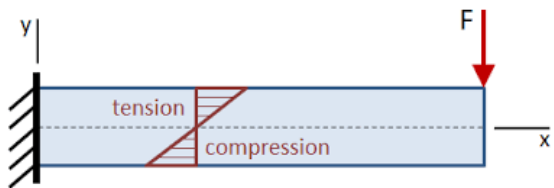
## Torção

(torsional stress)



# Conceitos de Tensão e Deformação : Flexão

## Flexão (flexural or bending stress)

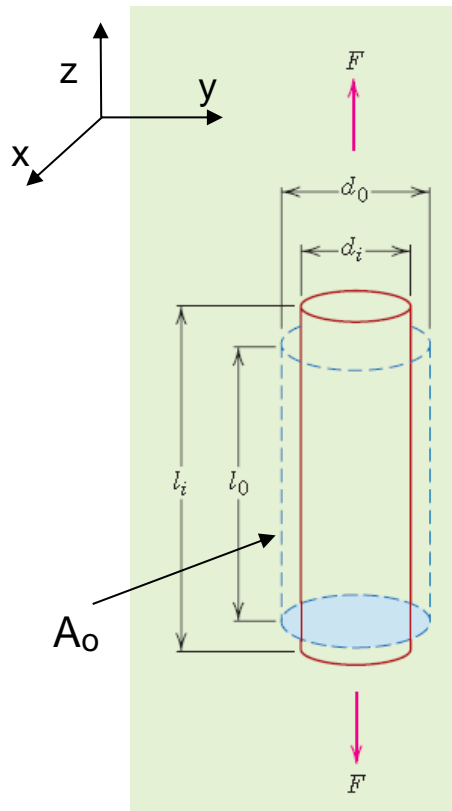
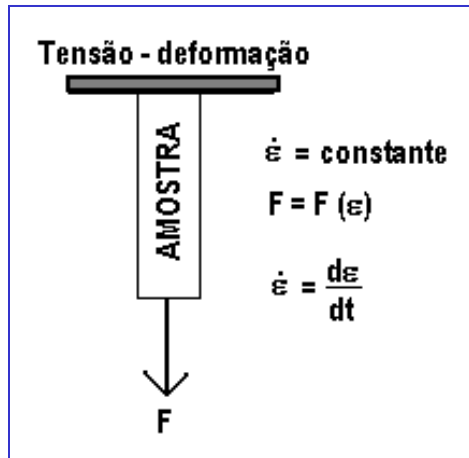


Viga em Balanço



# Tensão - Deformação: TRAÇÃO SIMPLES

8



- **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:**  $\sigma$

$$\sigma = F / A_0$$

$A_0$  = área de secção transversal original

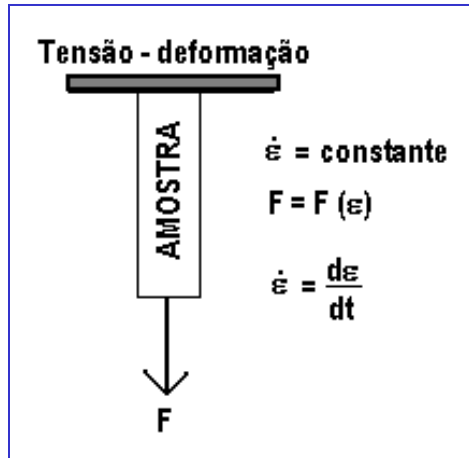
- **DEFORMAÇÃO DE ENGENHARIA:**  $\epsilon$

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

onde:  $l_0$  é o comprimento original, antes da força ser aplicada, e  $l_i$  é o comprimento instantâneo.

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

# Tensão - Deformação: TRAÇÃO SIMPLES

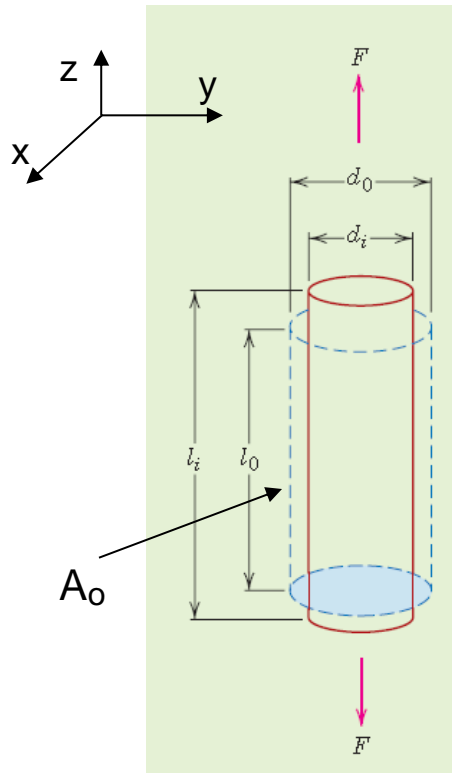


Para Deformações Elásticas

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

$$\nu = - (\epsilon_x / \epsilon) = - (\epsilon_y / \epsilon)$$

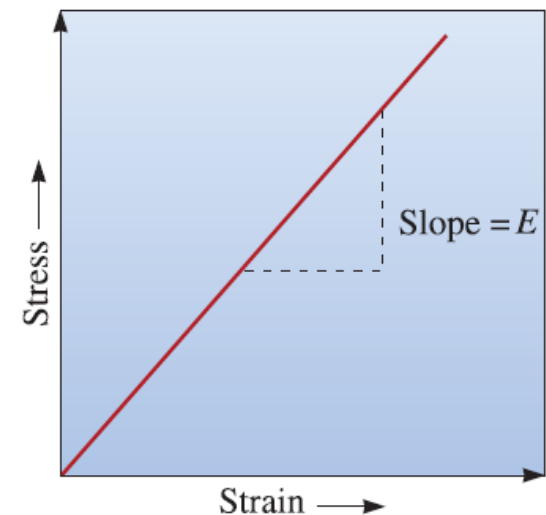
onde  $\epsilon_x = \epsilon_y = (d_o - d_i) / d_o = \Delta d / d_o$



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

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

Análoga à Lei de Hooke (1676), que trata da deformação elástica de uma mola:  
“As forças deformantes são proporcionais às deformações elásticas produzidas.”





# Tensão - Deformação: CISALHAMENTO SIMPLES

10

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

- **TENSÃO DE ENGENHARIA:**  $\tau$

$$\tau = F / A_o$$

- **DEFORMAÇÃO:**  $\gamma$

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

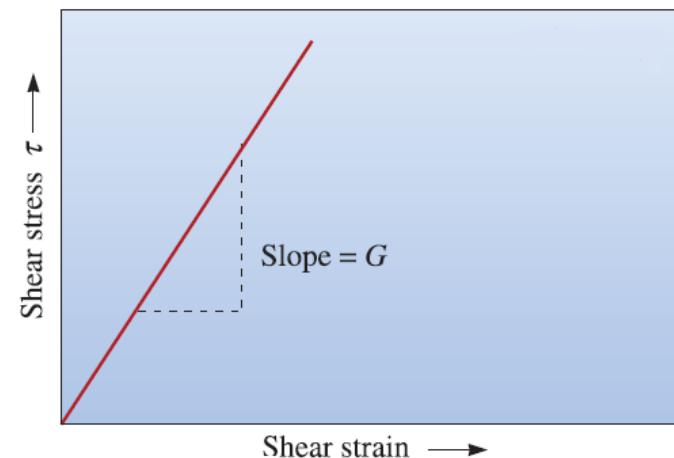
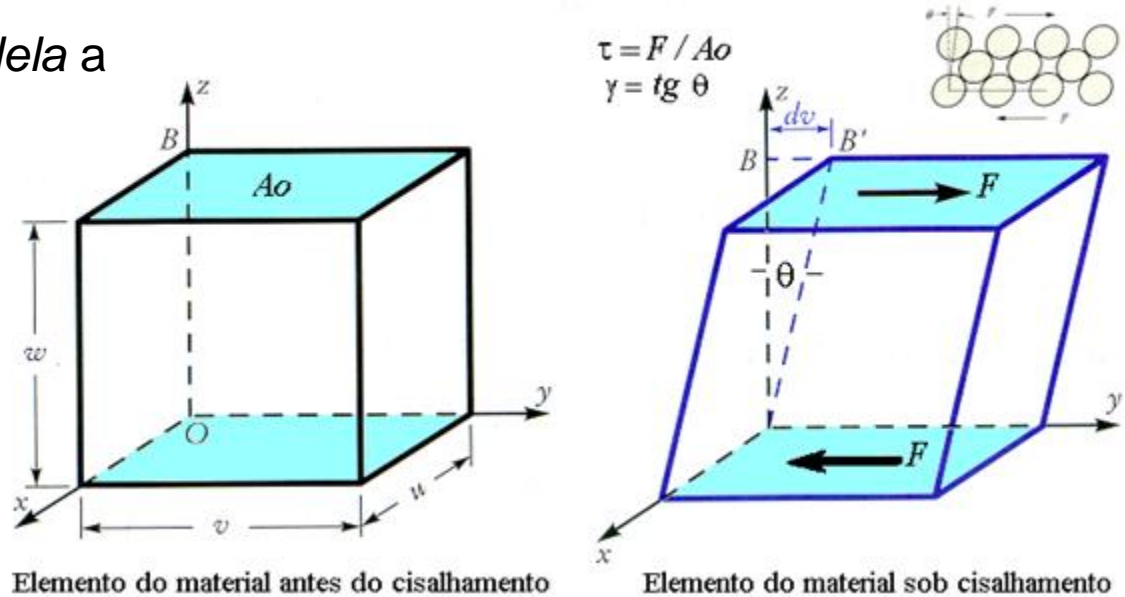
- **MÓDULO DE CISALHAMENTO:**  $G$

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

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

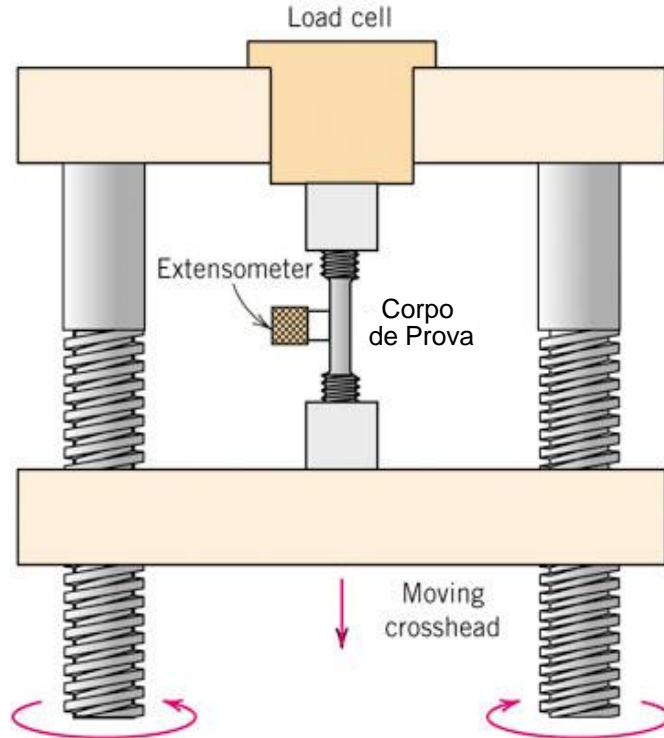
$$E = 2G (1 + \nu)$$

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

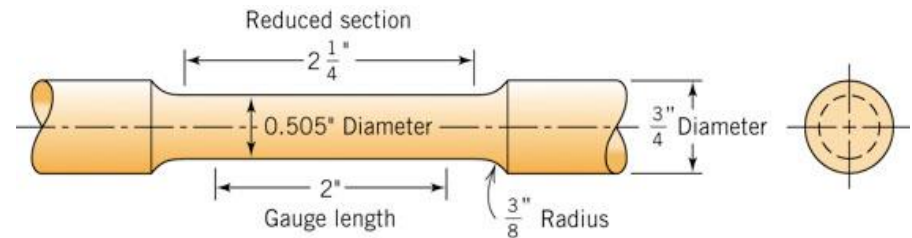


# Ensaio de Tração

- Os **CORPOS DE PROVA** utilizados nos ensaios de tração podem ter diferentes formas e dimensões.
- As medidas de **TENSÃO** 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 METÁLICO**

# Ensaio de Tração

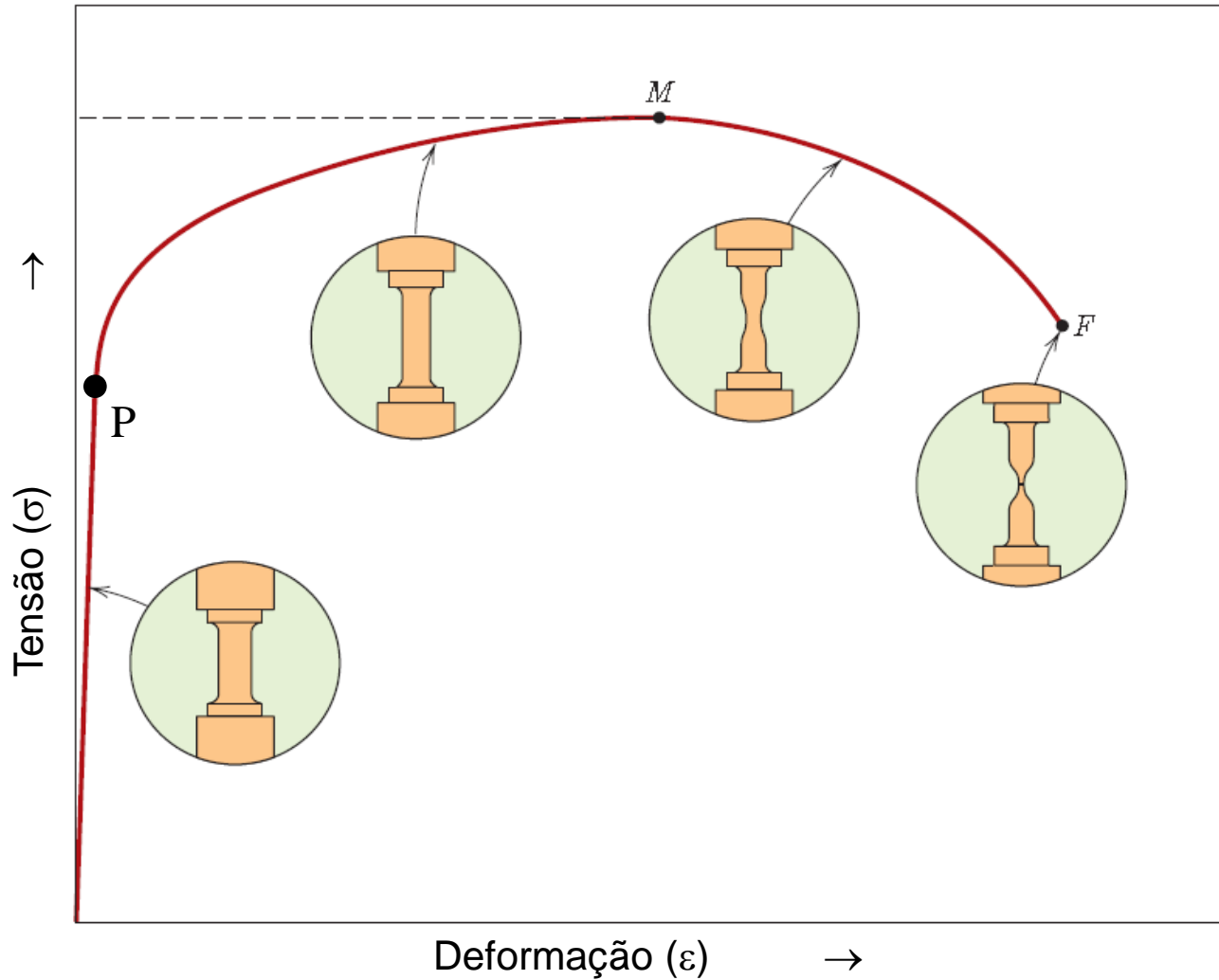


Máquina de Ensaio com  
Extensômetro Digital



Máquina de Ensaio com  
Extensômetro Óptico

# Curva Tensão - Deformação

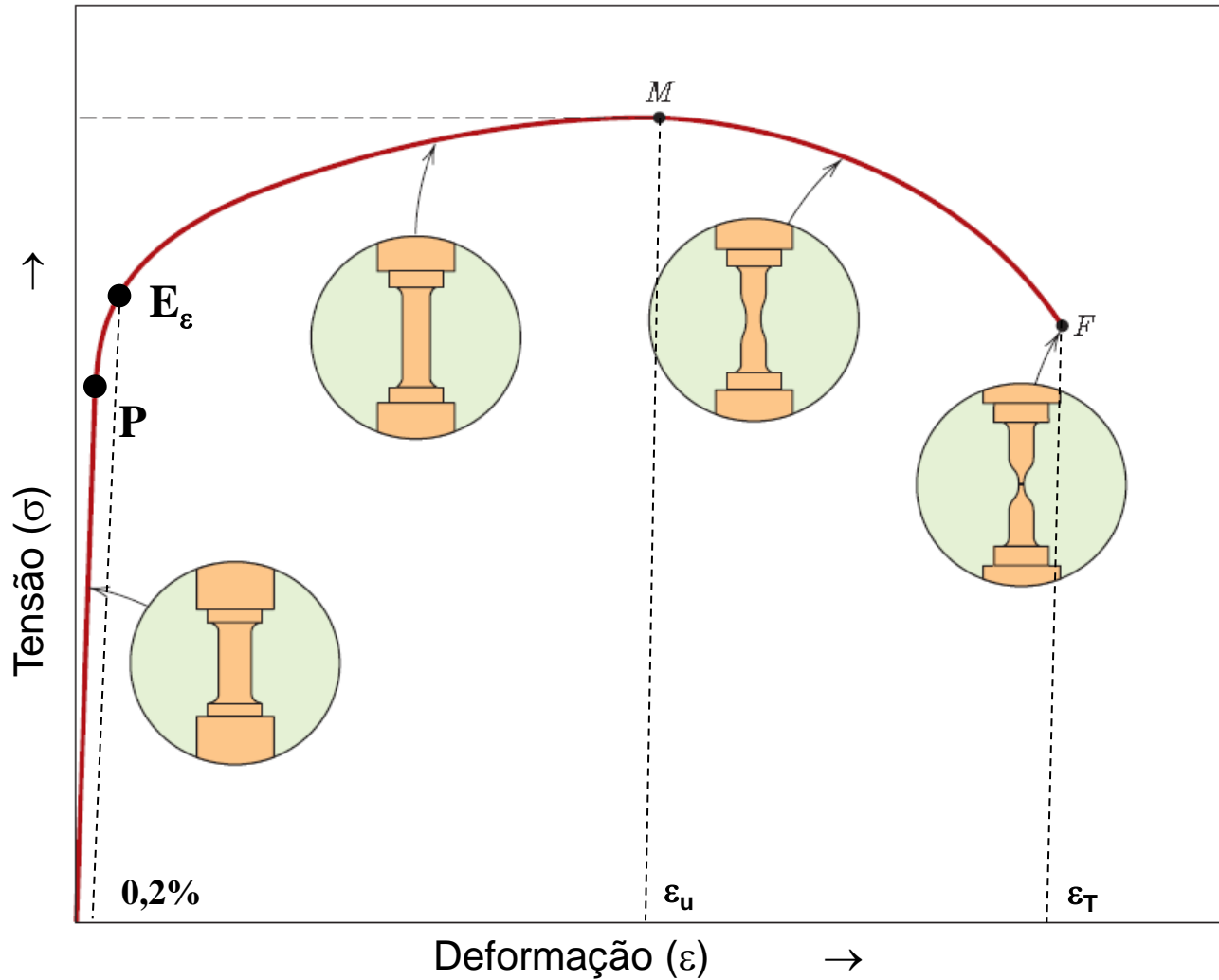


Comportamento representativo da curva **TENSÃO DE ENGENHARIA** em função da **DEFORMAÇÃO DE ENGENHARIA** obtida num **ENSAIO DE TRAÇÃO** de um *corpo metálico*.

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

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

# Curva Tensão-Deformação

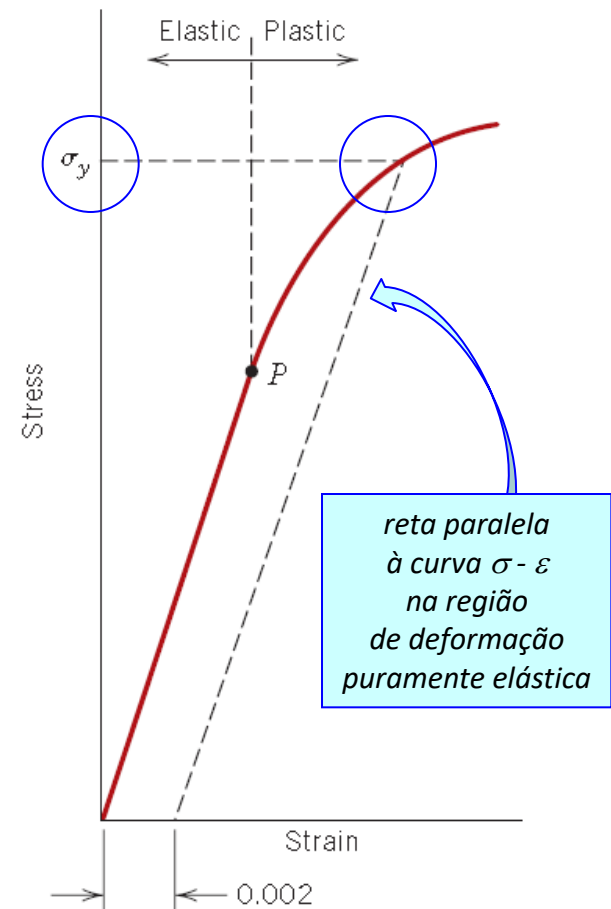


Comportamento representativo da curva **TENSÃO DE ENGENHARIA** em função da **DEFORMAÇÃO DE ENGENHARIA** obtida num **ENSAIO DE TRAÇÃO** de um *corpo metálico*.

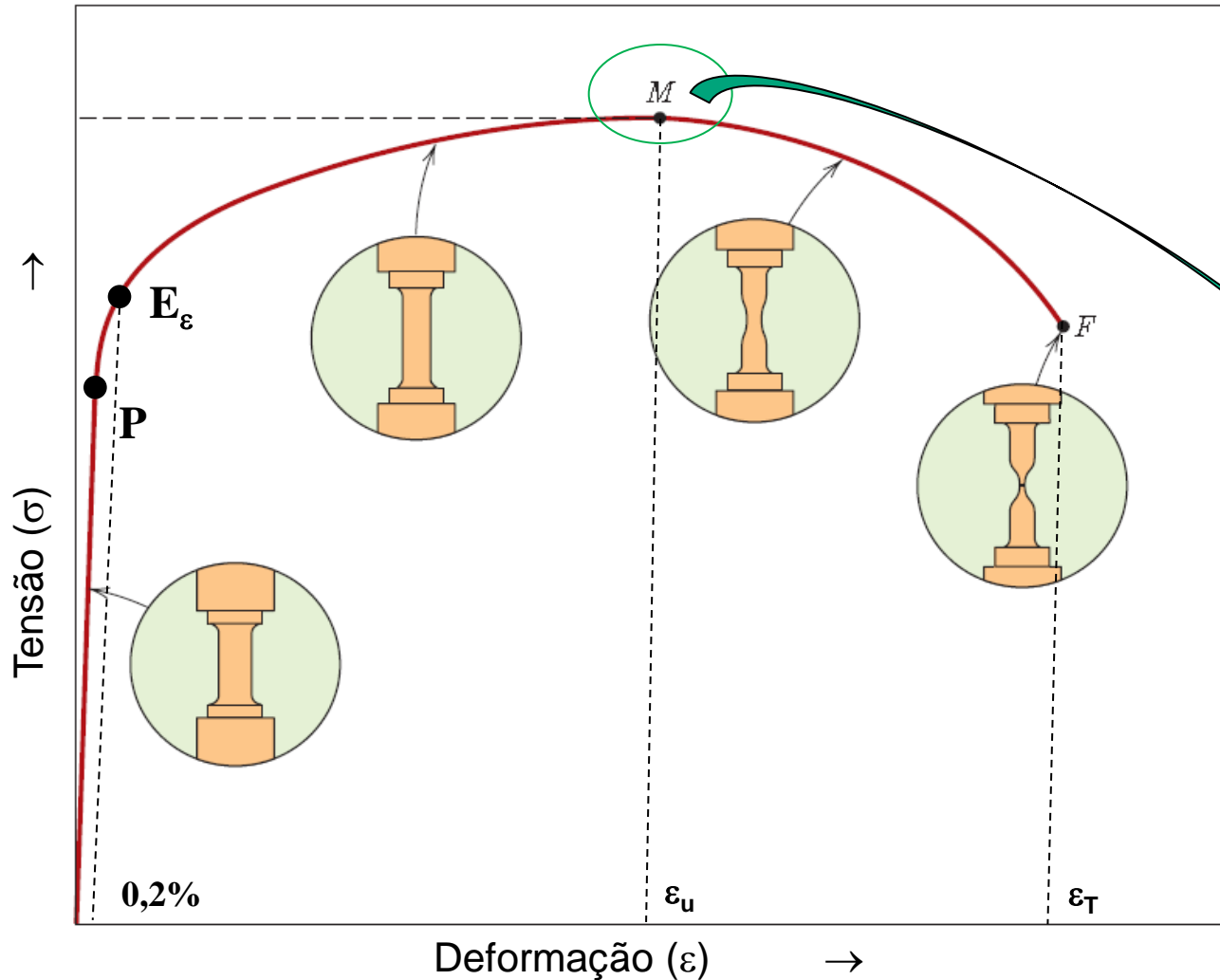
- O ponto  $E_\epsilon$  corresponde ao **LIMITE DE ESCOAMENTO (LE)**.
- O ponto **M** corresponde ao **LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (LRT)**, que é a tensão máxima atingida durante o ensaio (*Tensile Strength*).

# Tensão Limite de Escoamento – LE ou $\sigma_y$

- 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 (ponto **P**), 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 (Yield Strength)** (LE ou  $\sigma_y$ ) como sendo a tensão necessária para se produzir uma pequena deformação plástica.
- Para os **metais**, assume-se que essa pequena deformação plástica é igual a uma deformação de engenharia  $\varepsilon = 0,002 = 0,2\%$ .



# Curva Tensão-Deformação

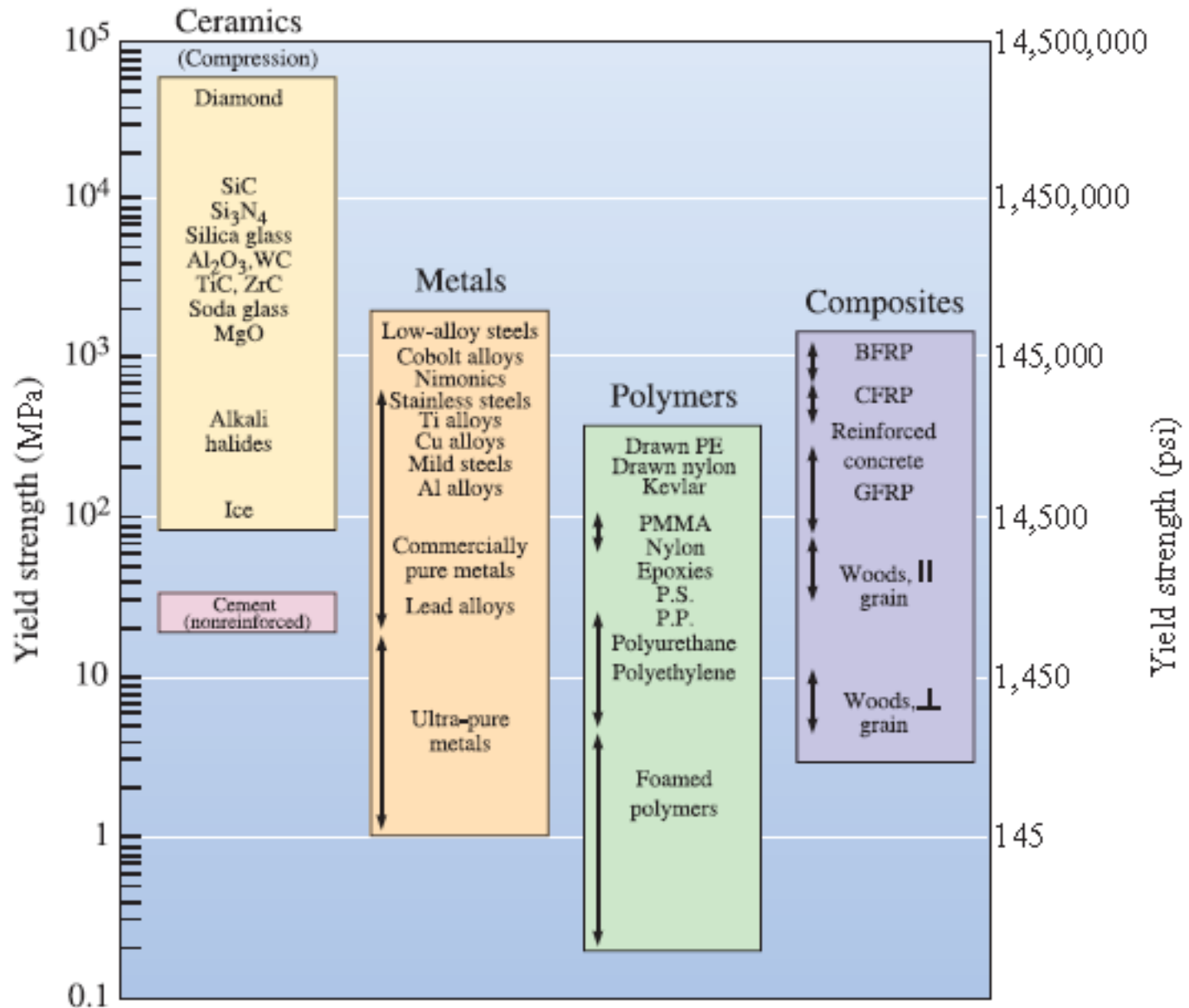


Comportamento representativo da curva **TENSÃO DE ENGENHARIA** em função da **DEFORMAÇÃO DE ENGENHARIA** obtida num **ENSAIO DE TRAÇÃO** de um *corpo metálico*.



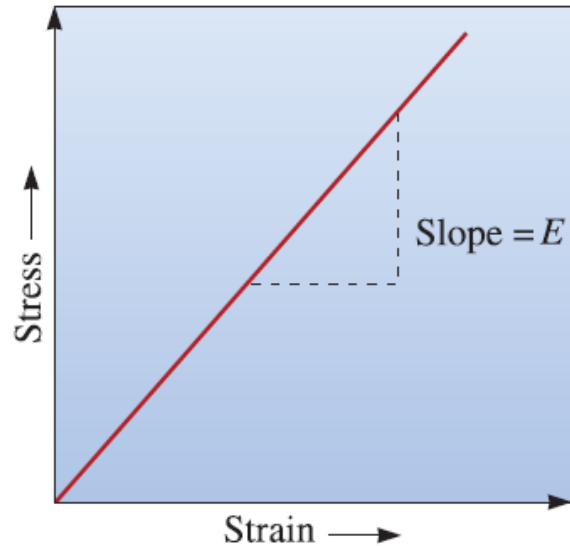
- A deformação ( $\epsilon_u$ ) no ponto **M** corresponde ao máximo valor de  $\epsilon$  com **alongamento uniforme**. Deformações maiores que  $\epsilon_u$  ocorrem com **estricção** (*empescoçamento*).
- A **fratura** ocorre no ponto **F**. A deformação ( $\epsilon_T$ ) na fratura corresponde ao **alongamento total**.

# Tensão Limite de Escoamento





## Curva Tensão - Deformação

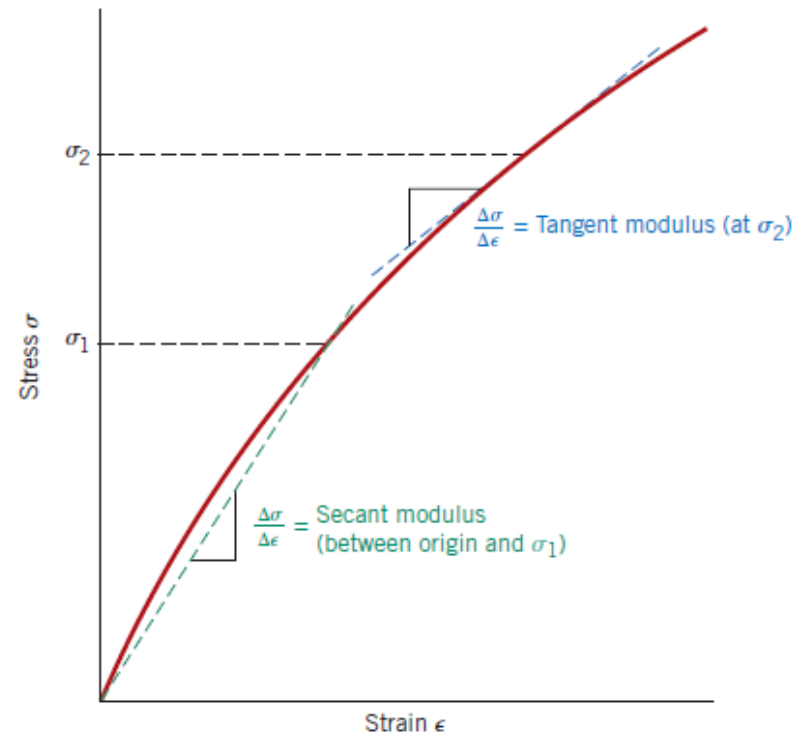


- Define-se o **MÓDULO DE ELASTICIDADE** como sendo o coeficiente angular da curva  $\sigma$  vs.  $\epsilon$ , na região linear da curva. Como a curva tem origem no ponto (0,0).

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

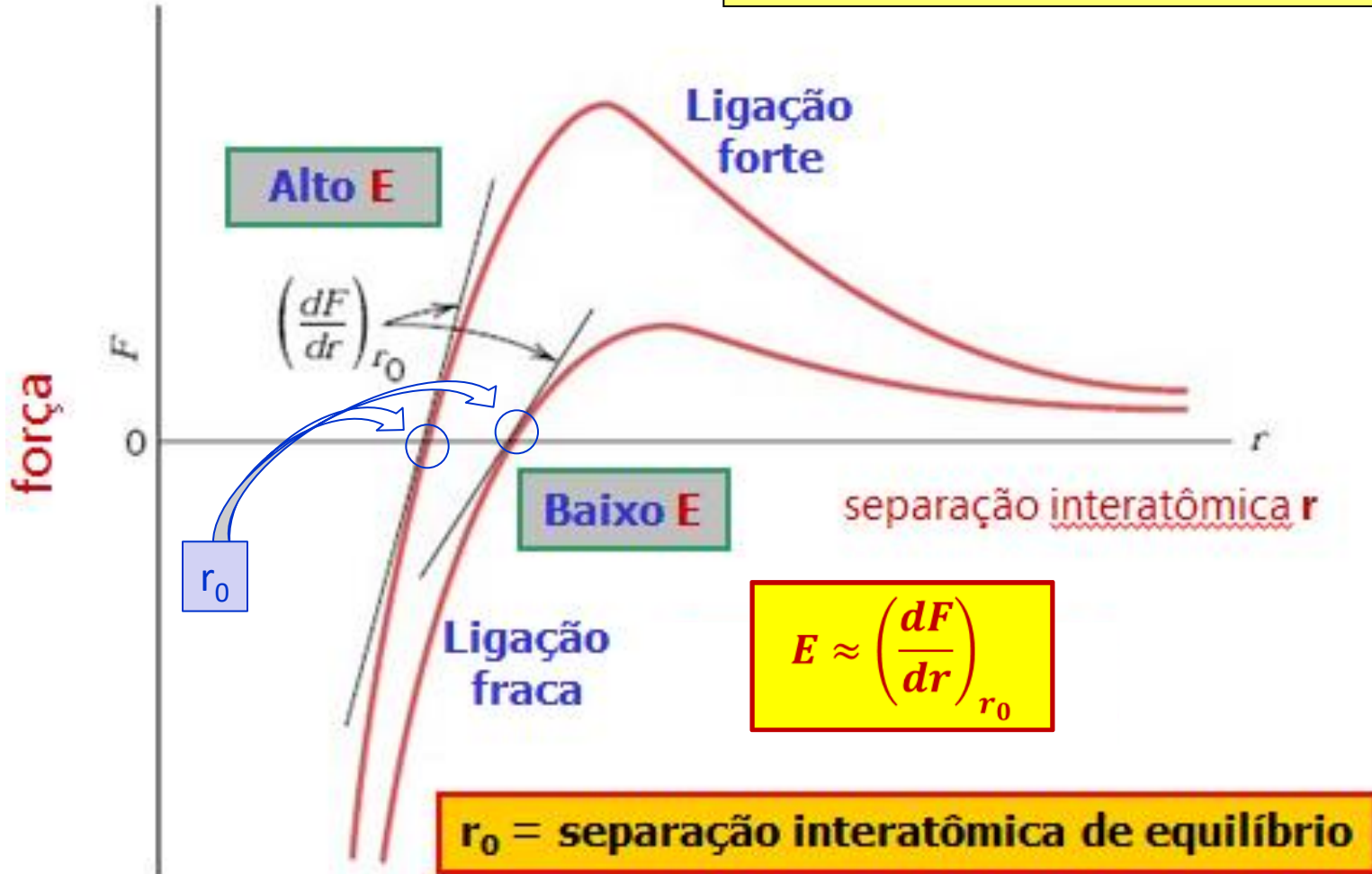
(Lei de Hooke)

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

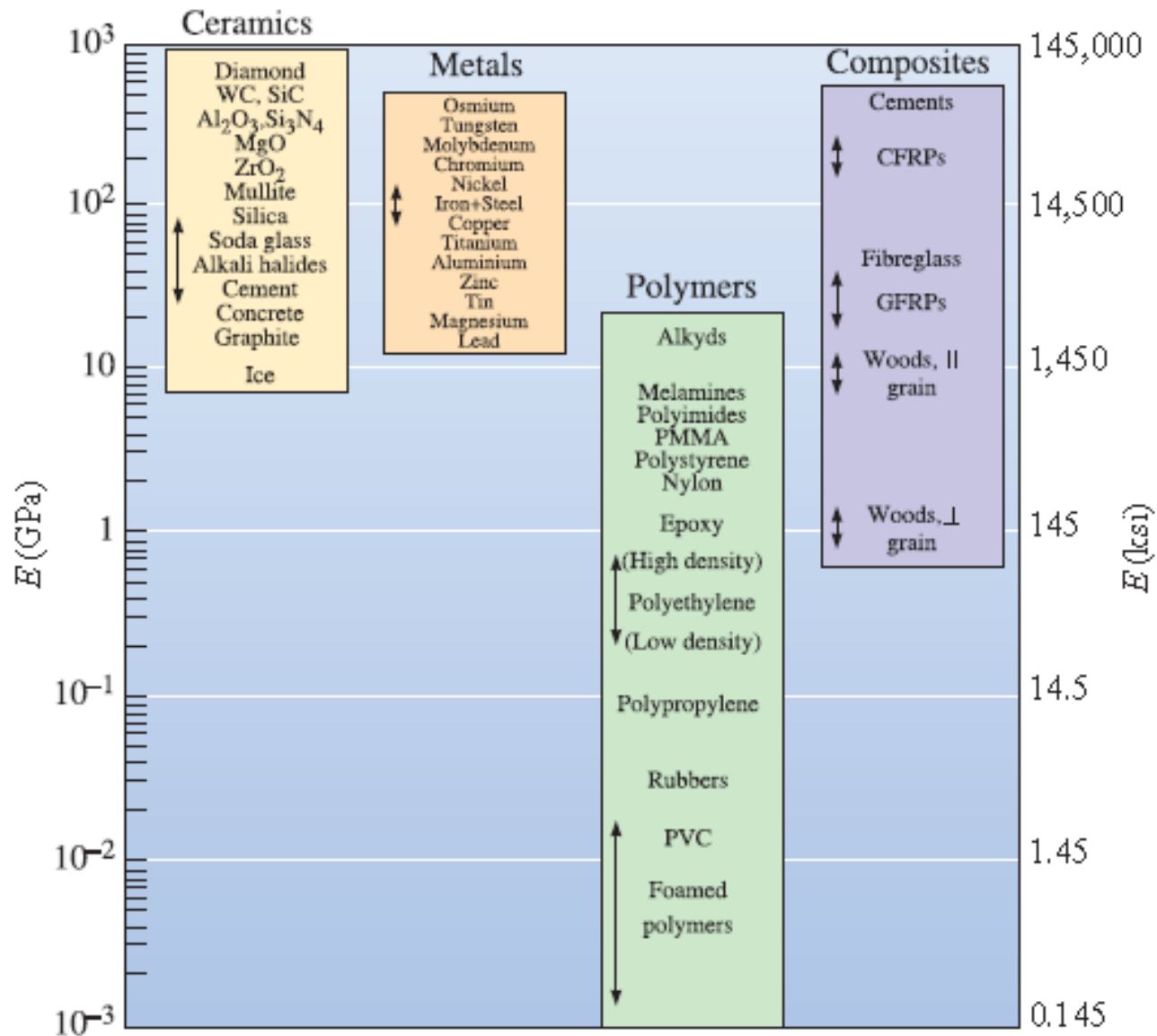


# Módulo de Elasticidade

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

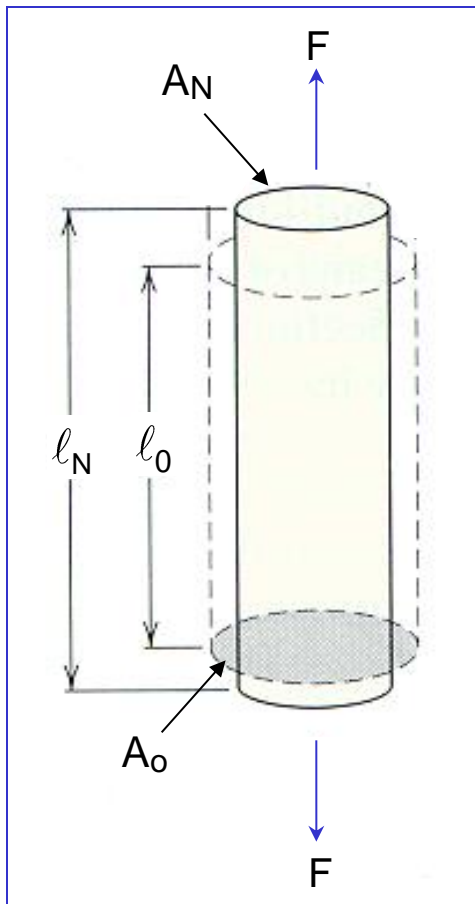


# Módulo de Elasticidade



# 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 varia de  $A_0$  até  $A_N$ .



- 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:

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

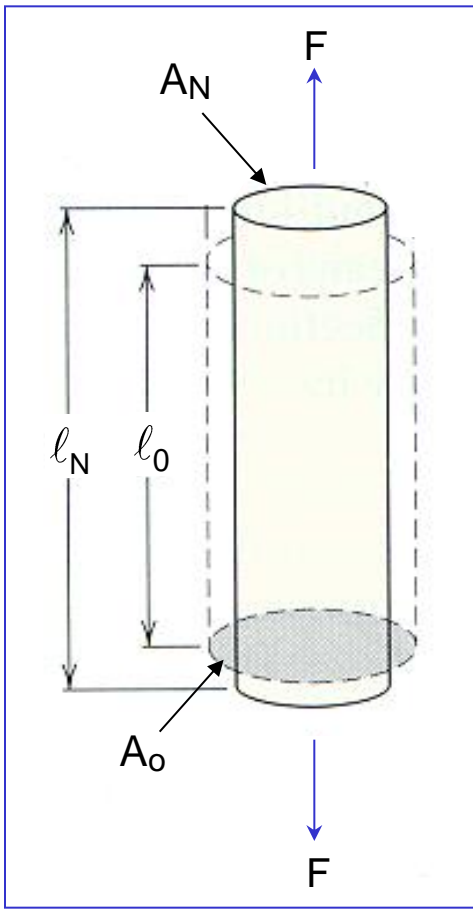
Para  $N$  grande, podemos substituir a somatória por uma integral e

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

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

# 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

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

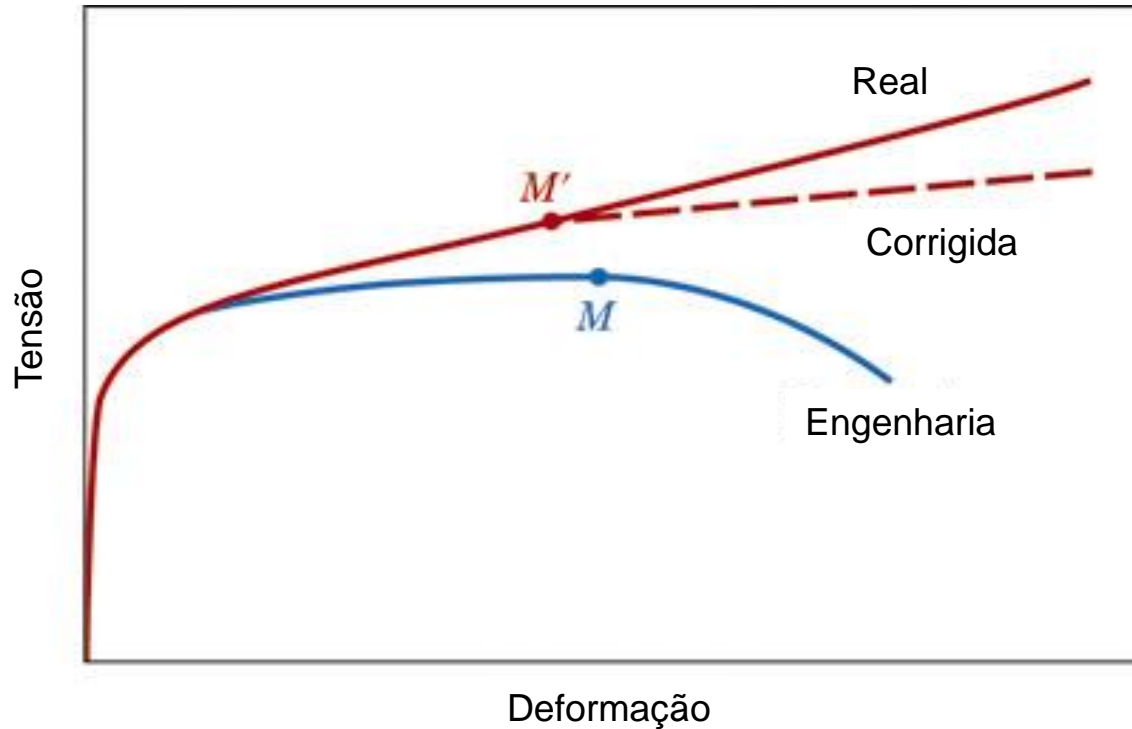
$$\therefore \sigma_R = \frac{F}{A_0} \frac{A_0}{A} = \sigma \frac{A_0}{A} .$$

- 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  $t$ :

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

# Curva Tensão Real-Deformação Real

23

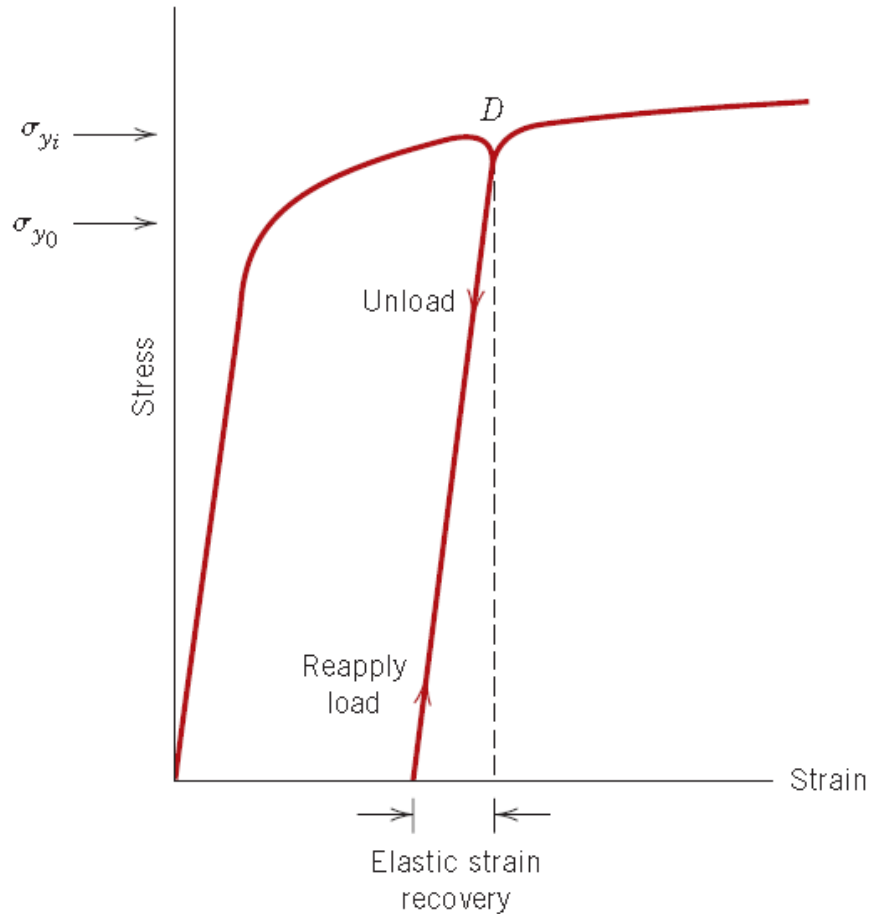


- Equações válidas até o início do empescoamento (pontos M e M'):

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

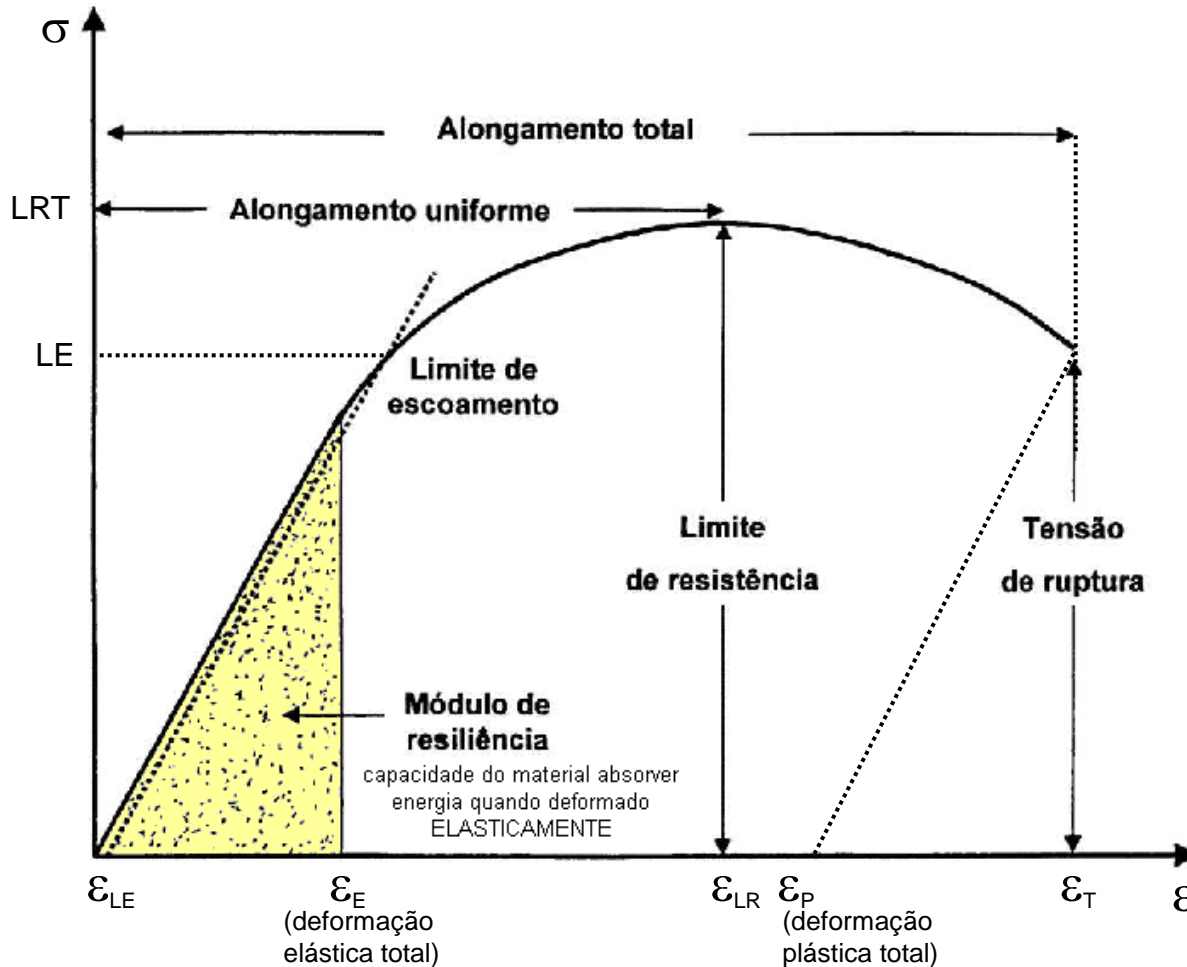
- A curva **Tensão Real - Deformação Real “Corrigida”** *(que não será discutida neste curso...)* leva em consideração a existência de um estado tensão-deformação diferenciado na região de empescoamento.

# 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.*



Porcentagem de alongamento % $\epsilon_T$

$$\% \epsilon_r = \left( \frac{L_f - L_0}{L_0} \right) \times 100$$

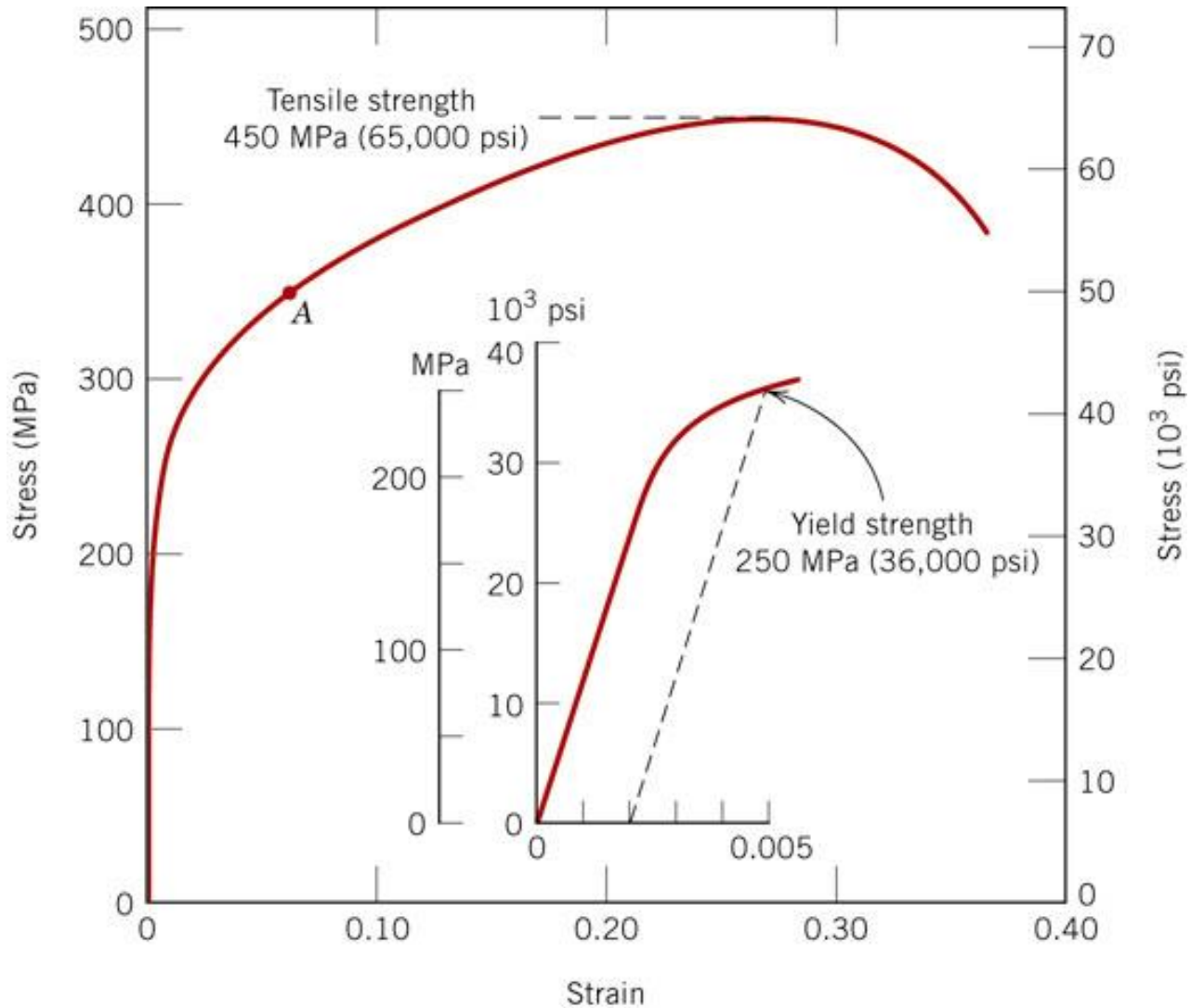
Porcentagem de redução de área %RA

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

- *LE, LRT e E representam habilidades do material de suportar cargas em diferentes condições.*
- *ε<sub>LE</sub>, ε<sub>E</sub>, ε<sub>LR</sub>, ε<sub>P</sub>, a resiliência e a tenacidade quantificam a habilidade do material em se deformar*



# O que se pode obter a partir da curva *Tensão - Deformação*

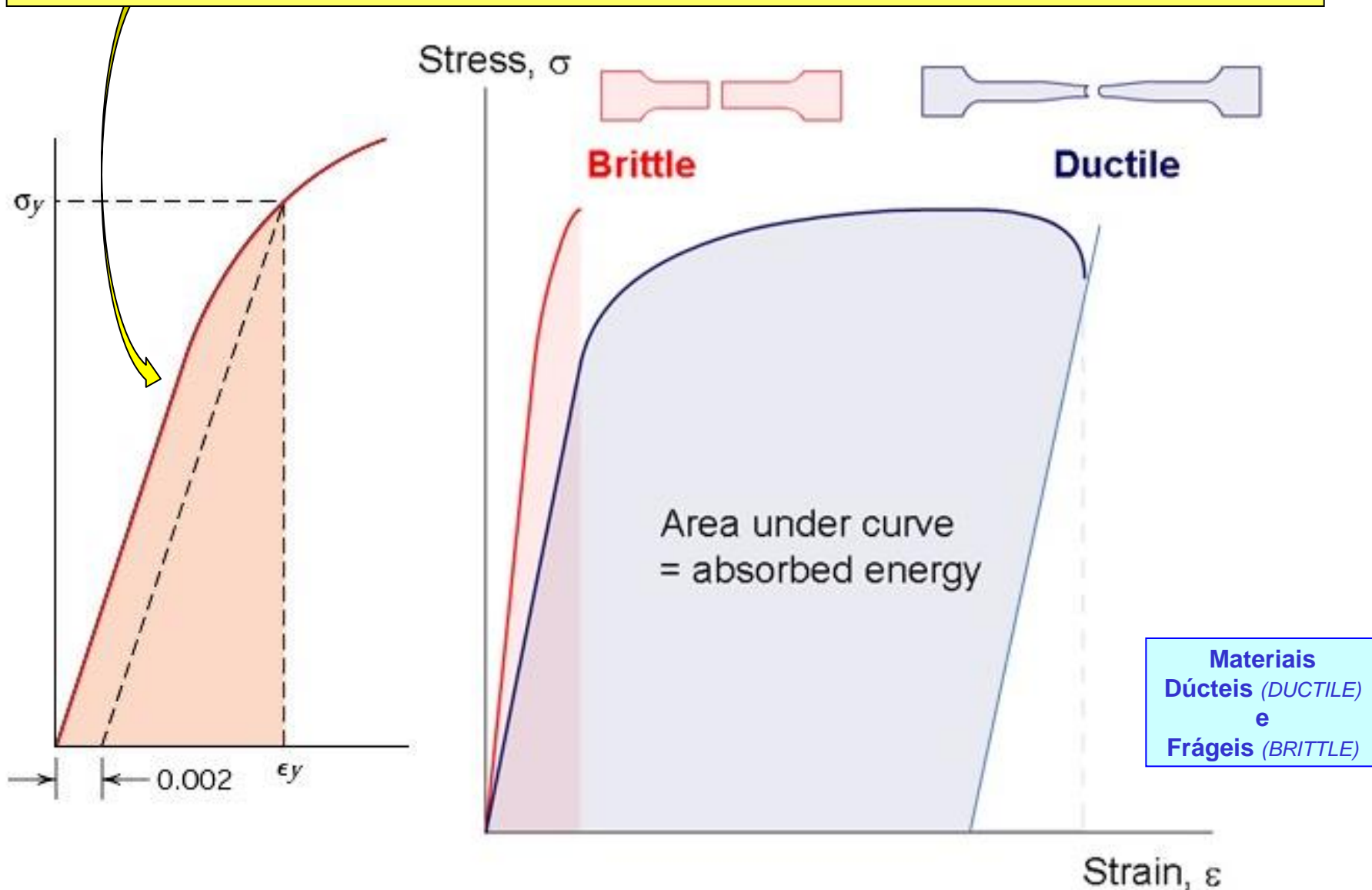


**Limite de Resistência à Tração : *Tensile Strength* ; Limite de Escoamento : *Yield Strength***

# O que se pode obter a partir da curva *Tensão - Deformação*

27

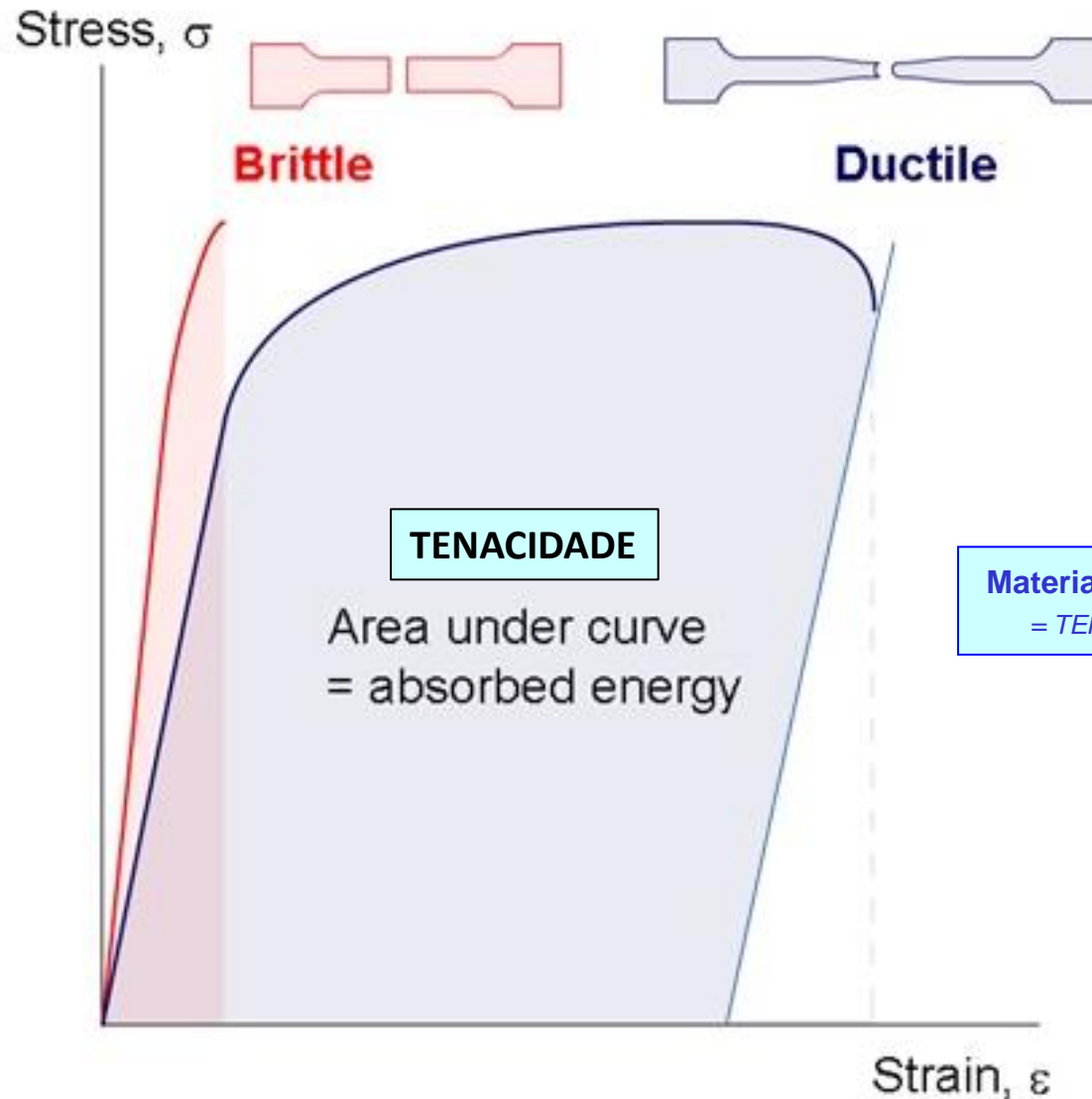
**Resiliência** (ou *módulo de resiliência*) : capacidade de um material estocar energia quando deformado elasticamente e depois de aliviada a carga, ter essa energia recuperada.



# O que se pode obter a partir da curva *Tensão - Deformação*

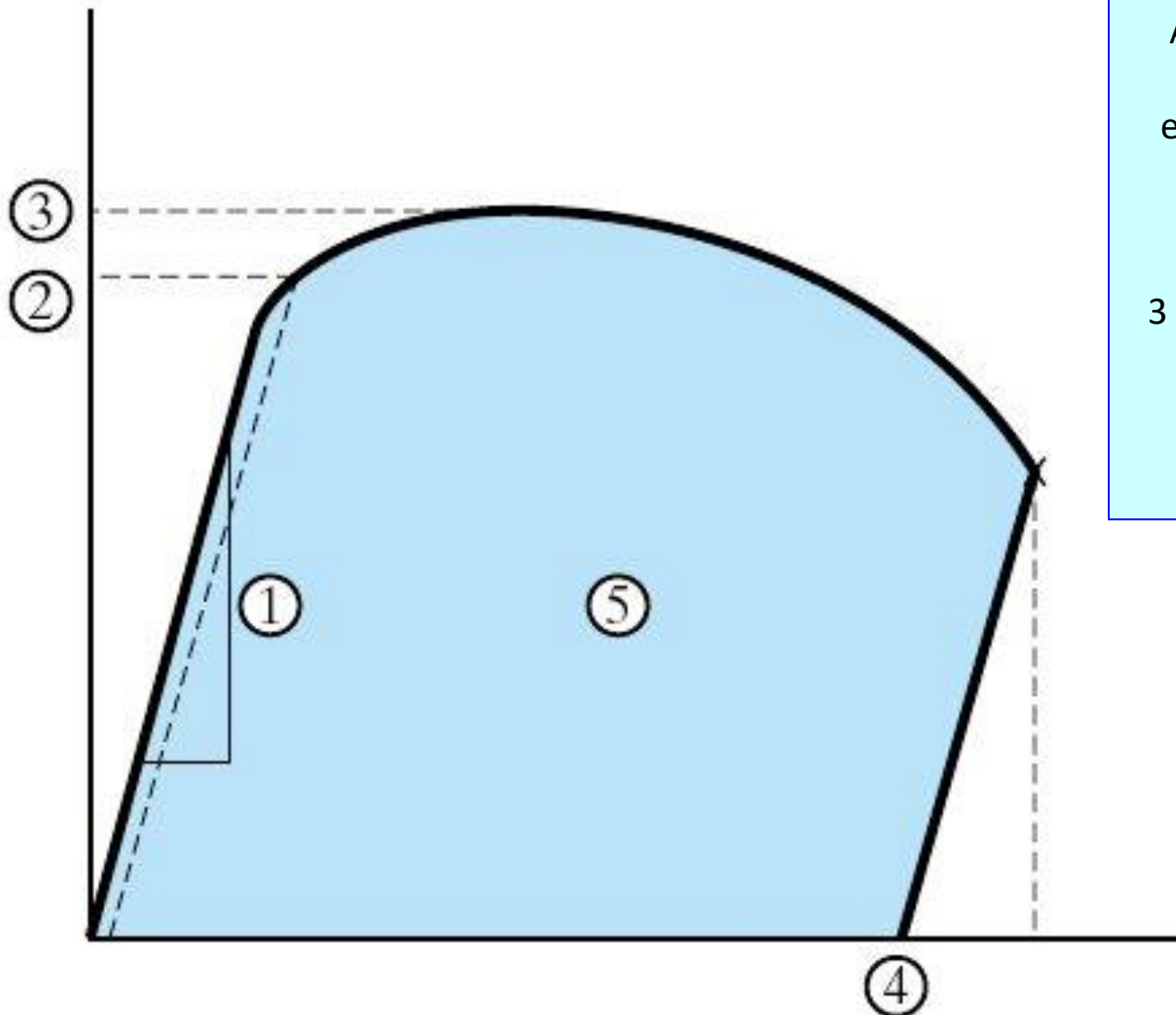
28

**Tenacidade** (ou *módulo de 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 (DUCTILE)**  
= TENACIDADE ELEVADA

## O que se pode obter a partir da curva *Tensão - Deformação*



A partir da curva de tensão de engenharia – deformação de engenharia podem ser obtidos:

- 1 – módulo de elasticidade;
- 2 – tensão de escoamento;
- 3 – limite de resistência à tração;
- 4 – ductilidade:  $= 100 \times \epsilon_{\text{fratura}}$   
(descontada a recuperação elástica)
- 5 – tenacidade:  $\int \sigma d\epsilon$

# 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

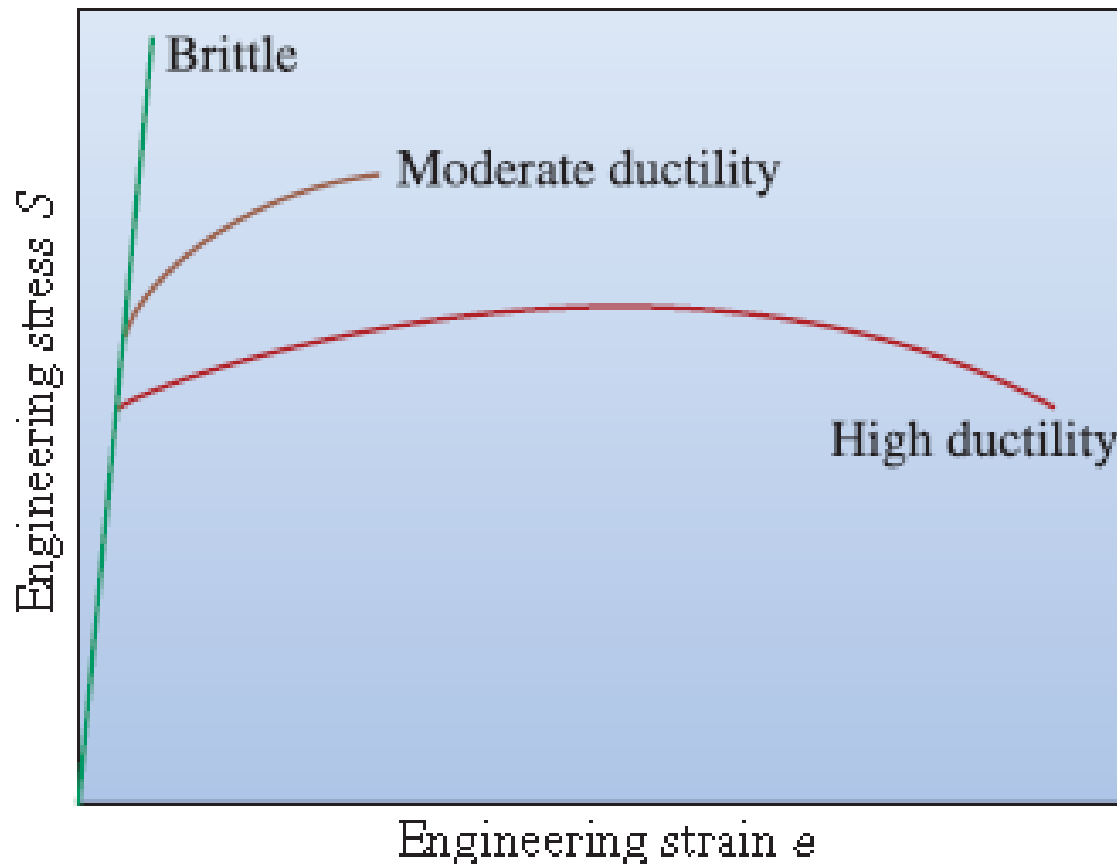
***Yield strength*** : limite (ou tensão) de escoamento

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

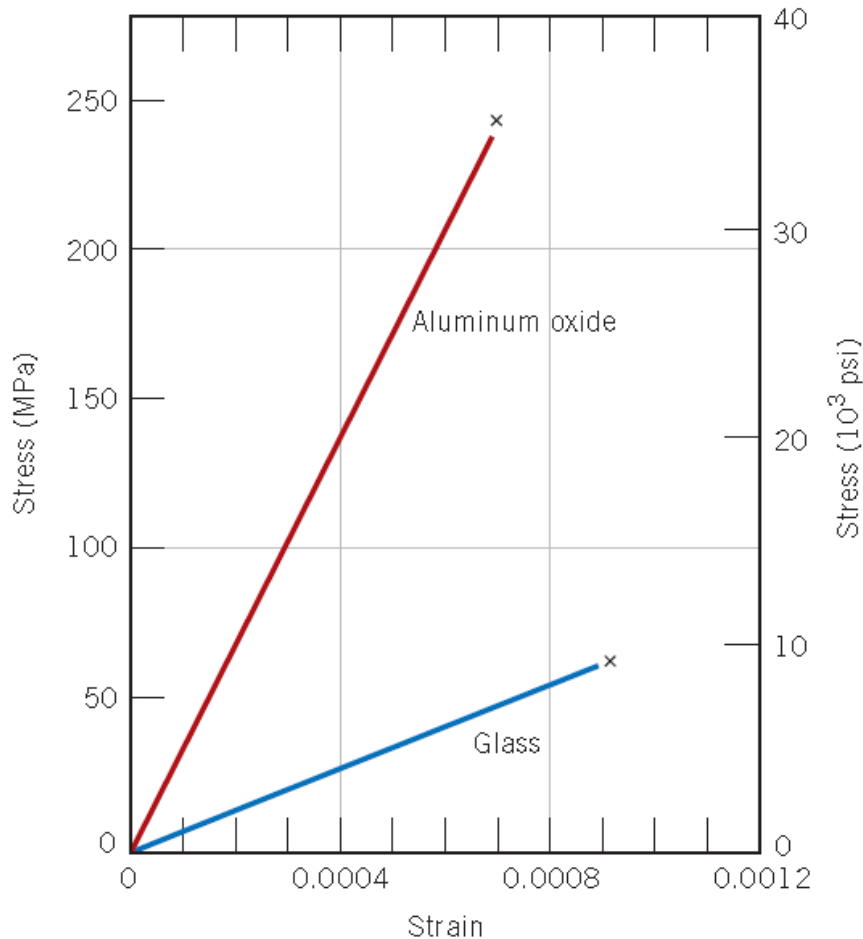
***Ductility*** : ductilidade (medida pela porcentagem de alongamento)

# Comportamento Tensão - Deformação de Materiais Frágeis *(comparado com o de materiais dúcteis)*

*Curvas Tensão de Engenharia – Deformação de Engenharia*



# Curvas de Tração de Materiais Frágeis (Materiais Cerâmicos)



## Curvas Tensão de Engenharia – Deformação de Engenharia

Apesar de ser possível realizar-se ensaios de tração de materiais cerâmicos, é um tipo de ensaio de execução muito difícil devido principalmente à:

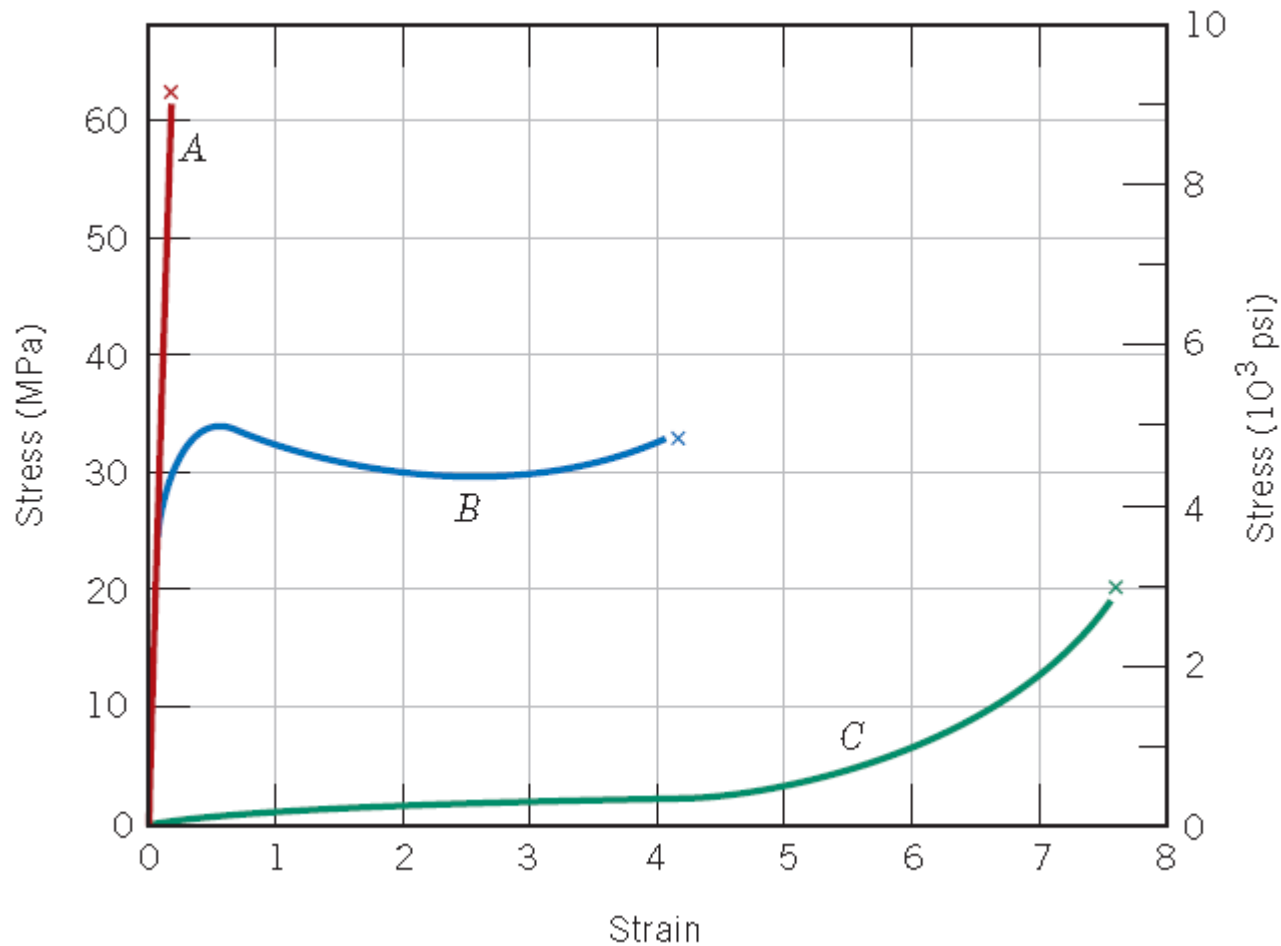
- Fratura frágil característica das cerâmicas e vidros;
- Elevada resistência mecânica desses materiais.

→ *Fica muito difícil fixar a amostra na máquina de testes sem introduzir trincas que mascarem o resultado real do ensaio.*

→ *Além disso, é difícil alinhar as “garras” do equipamento (superior e inferior) de modo a ter-se exclusivamente esforços de tração na amostra.*

# Curvas de Tração de Materiais Poliméricos

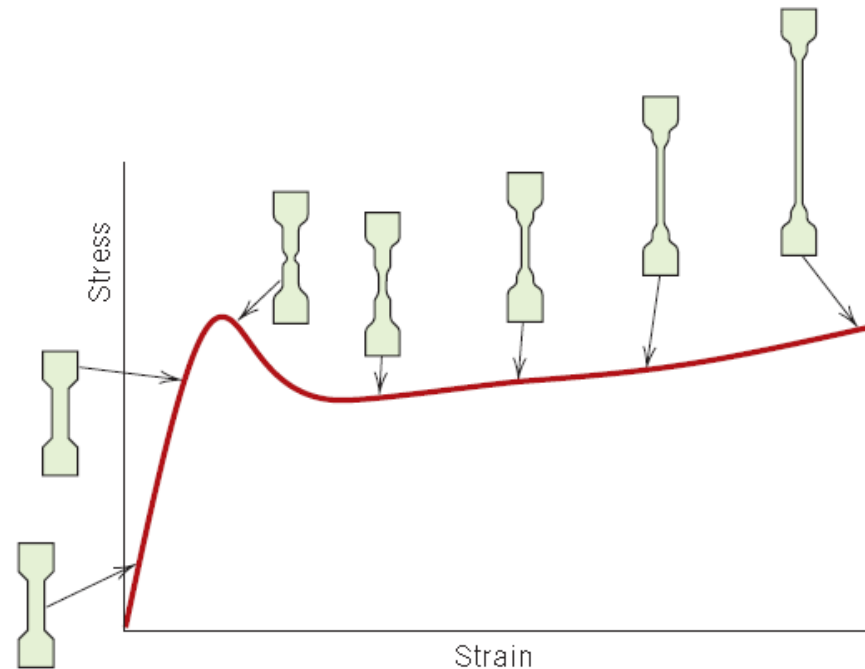
*Curvas Tensão de Engenharia – Deformação de Engenharia*



- A - Polímero frágil
- B - Polímero dúctil
- C - Elastômero



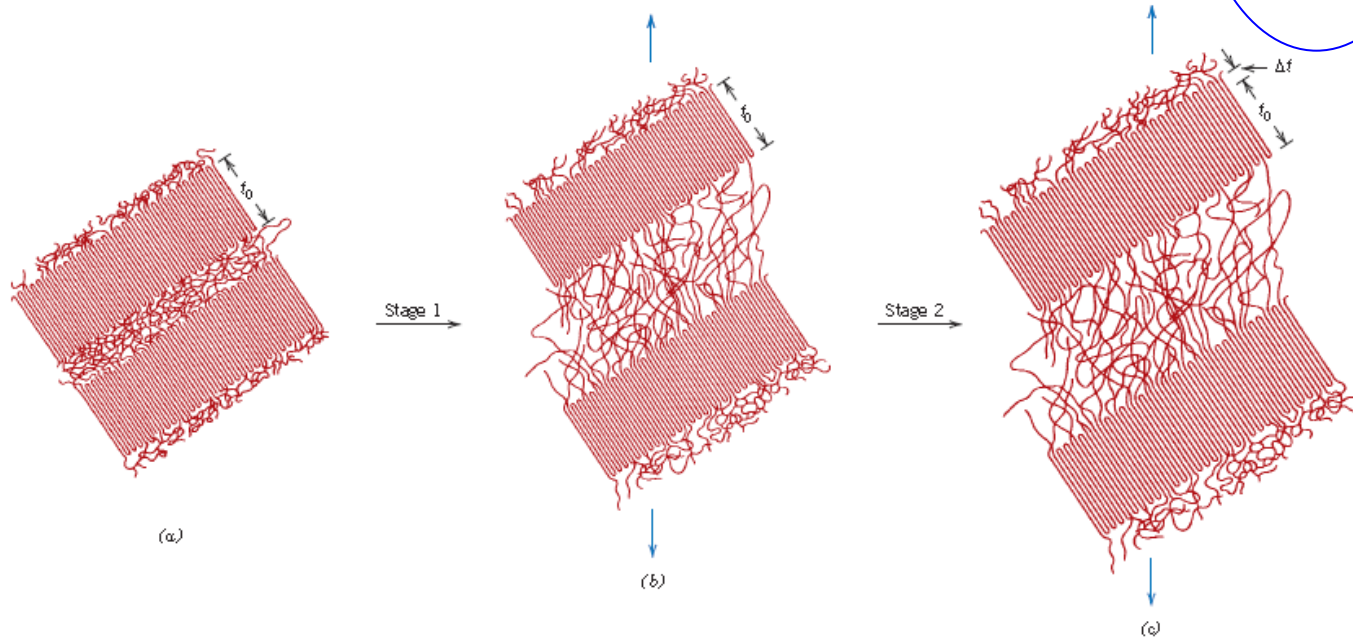
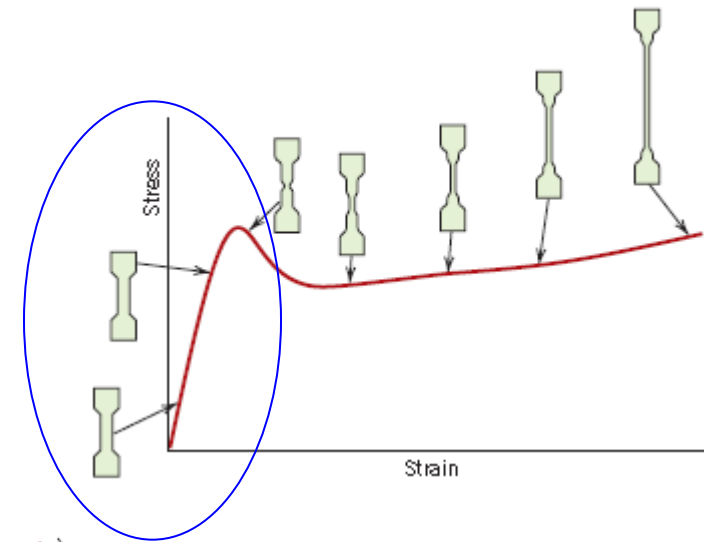
# Curvas de Tração de Materiais Poliméricos Parcialmente Cristalinos



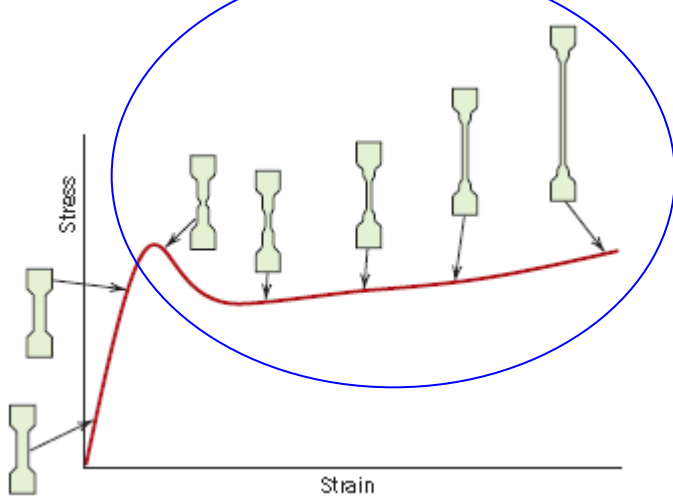
- O limite de escoamento superior corresponde ao início da formação de pescoço (estricção). A tensão cai até o limite inferior de escoamento devido à diminuição da seção resistente.
- Na região do pescoço, as cadeias moleculares se orientam, o que leva a um aumento localizado de resistência. Em consequência, 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).

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

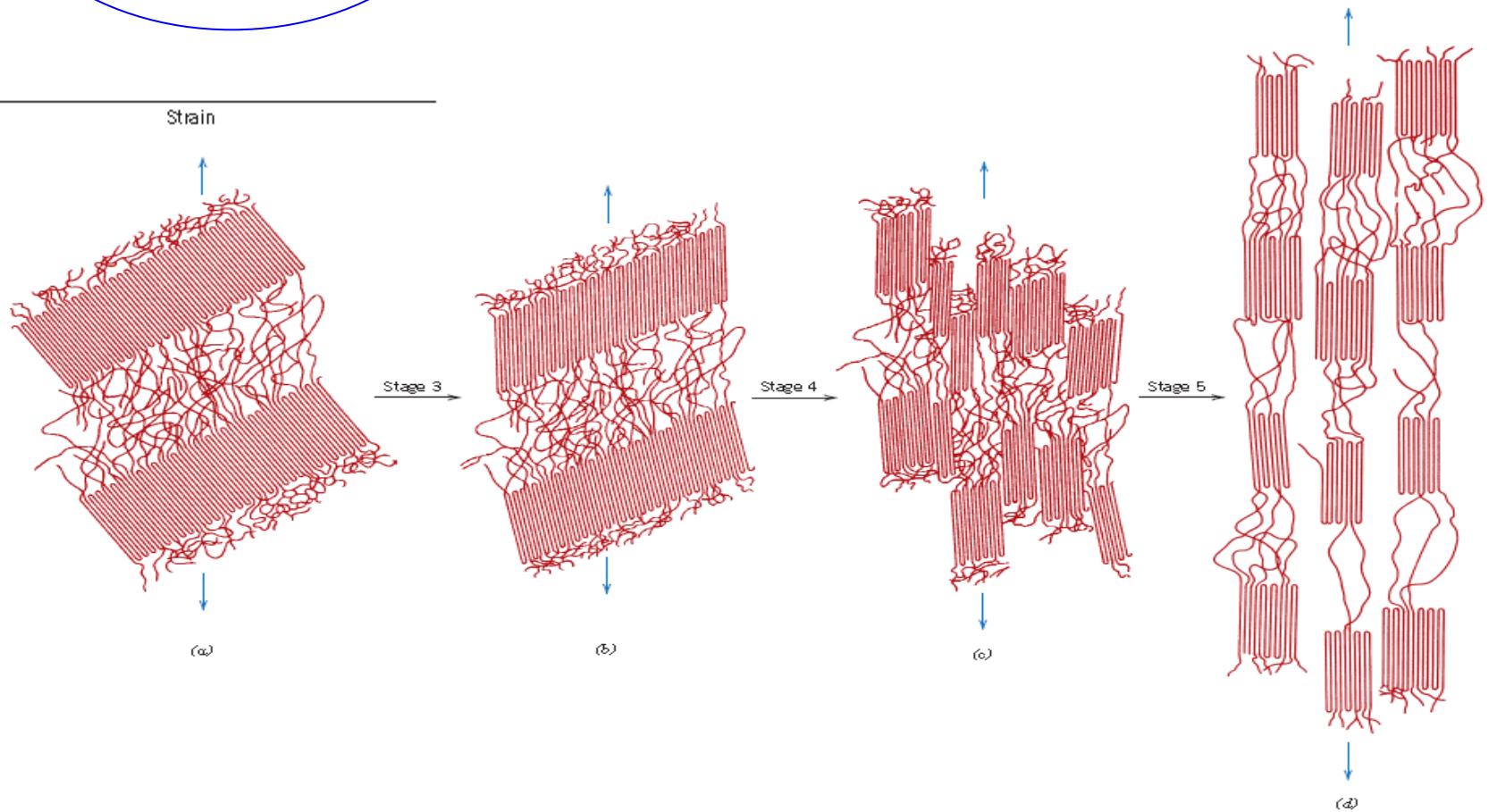
## Estágios de Deformação ELÁSTICA em Materiais Poliméricos Parcialmente Cristalinos



Stages in the elastic deformation of a semicrystalline polymer. (a) Two adjacent chain-folded lamellae and interlamellar amorphous material before deformation. (b) Elongation of amorphous tie chains during the first stage of deformation. (c) Increase in lamellar crystallite thickness (which is reversible) due to bending and stretching of chains in crystallite regions.



## Estágios de Deformação PLÁSTICA em Materiais Poliméricos Parcialmente Cristalinos



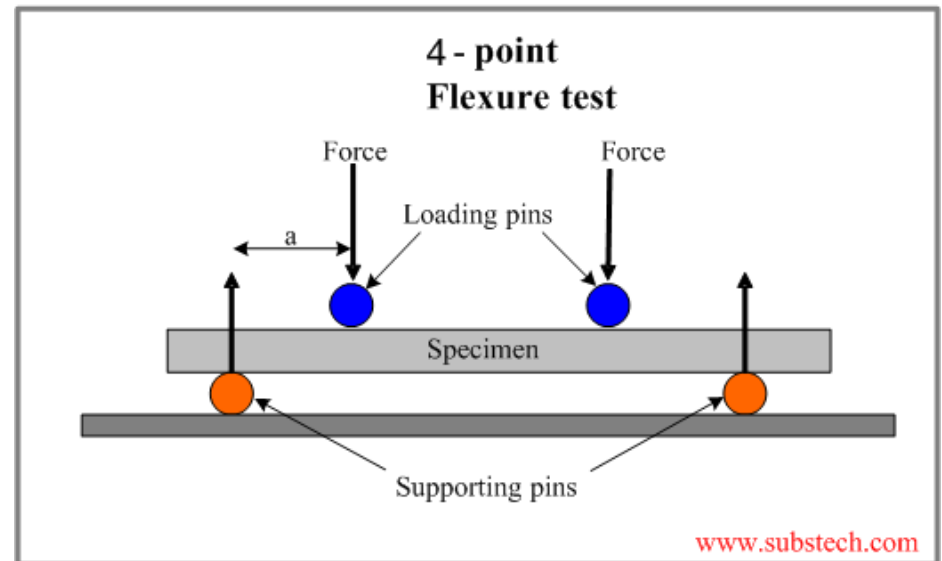
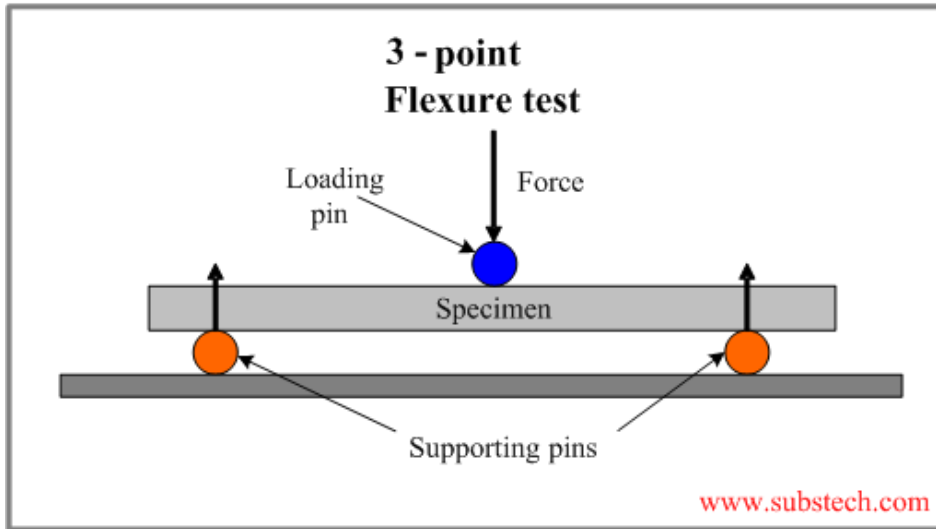
Stages in the plastic deformation of a semicrystalline polymer. (a) Two adjacent chain-folded lamellae and interlamellar amorphous material after elastic deformation (also shown as Figure 15.12c). (b) Tilting of lamellar chain folds. (c) Separation of crystalline block segments. (d) Orientation of block segments and tie chains with the tensile axis in the final plastic deformation stage.

## Propriedades Mecânicas (a temperatura ambiente ) de Materiais Poliméricos

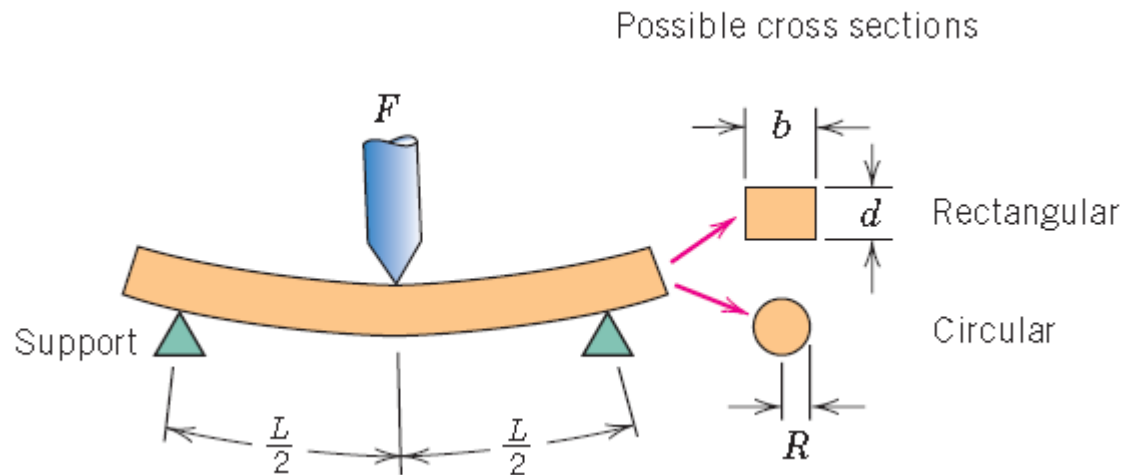
<i>Material</i>	<i>Specific Gravity</i>	<i>Tensile Modulus</i> [GPa (ksi)]	<i>Tensile Strength</i> [MPa (ksi)]	<i>Yield Strength</i> [MPa (ksi)]	<i>Elongation at Break (%)</i>
Polyethylene (low density)	0.917–0.932	0.17–0.28 (25–41)	8.3–31.4 (1.2–4.55)	9.0–14.5 (1.3–2.1)	100–650
Polyethylene (high density)	0.952–0.965	1.06–1.09 (155–158)	22.1–31.0 (3.2–4.5)	26.2–33.1 (3.8–4.8)	10–1200
Poly(vinyl chloride)	1.30–1.58	2.4–4.1 (350–600)	40.7–51.7 (5.9–7.5)	40.7–44.8 (5.9–6.5)	40–80
Polytetrafluoroethylene	2.14–2.20	0.40–0.55 (58–80)	20.7–34.5 (3.0–5.0)	13.8–15.2 (2.0–2.2)	200–400
Polypropylene	0.90–0.91	1.14–1.55 (165–225)	31–41.4 (4.5–6.0)	31.0–37.2 (4.5–5.4)	100–600
Polystyrene	1.04–1.05	2.28–3.28 (330–475)	35.9–51.7 (5.2–7.5)	25.0–69.0 (3.63–10.0)	1.2–2.5
Poly(methyl methacrylate)	1.17–1.20	2.24–3.24 (325–470)	48.3–72.4 (7.0–10.5)	53.8–73.1 (7.8–10.6)	2.0–5.5
Phenol-formaldehyde	1.24–1.32	2.76–4.83 (400–700)	34.5–62.1 (5.0–9.0)	—	1.5–2.0
Nylon 6,6	1.13–1.15	1.58–3.80 (230–550)	75.9–94.5 (11.0–13.7)	44.8–82.8 (6.5–12)	15–300
Polyester (PET)	1.29–1.40	2.8–4.1 (400–600)	48.3–72.4 (7.0–10.5)	59.3 (8.6)	30–300
Polycarbonate	1.20	2.38 (345)	62.8–72.4 (9.1–10.5)	62.1 (9.0)	110–150

**Source:** *Modern Plastics Encyclopedia '96*. Copyright 1995, The McGraw-Hill Companies. Reprinted with permission.

# Ensaio de Flexão – Materiais Frágeis



# Ensaio de Flexão – Materiais Frágeis



where  $M$  = maximum bending moment

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

$I$  = moment of inertia of cross section

$F$  = applied load

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

# Ensaio de Flexão

## Valores de Resistência à Flexão e Módulo de Elasticidade de Materiais Cerâmicos Comuns

<i>Material</i>	<i>Flexural Strength</i>		<i>Modulus of Elasticity</i>	
	<i>MPa</i>	<i>ksi</i>	<i>GPa</i>	<i>10<sup>6</sup> psi</i>
Silicon nitride (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )	250–1000	35–145	304	44
Zirconia <sup>a</sup> (ZrO <sub>2</sub> )	800–1500	115–215	205	30
Silicon carbide (SiC)	100–820	15–120	345	50
Aluminum oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	275–700	40–100	393	57
Glass-ceramic (Pyroceram)	247	36	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
Magnesium oxide (MgO)	105 <sup>b</sup>	15 <sup>b</sup>	225	33
Fused silica (SiO <sub>2</sub> )	110	16	73	11
Soda-lime glass	69	10	69	10

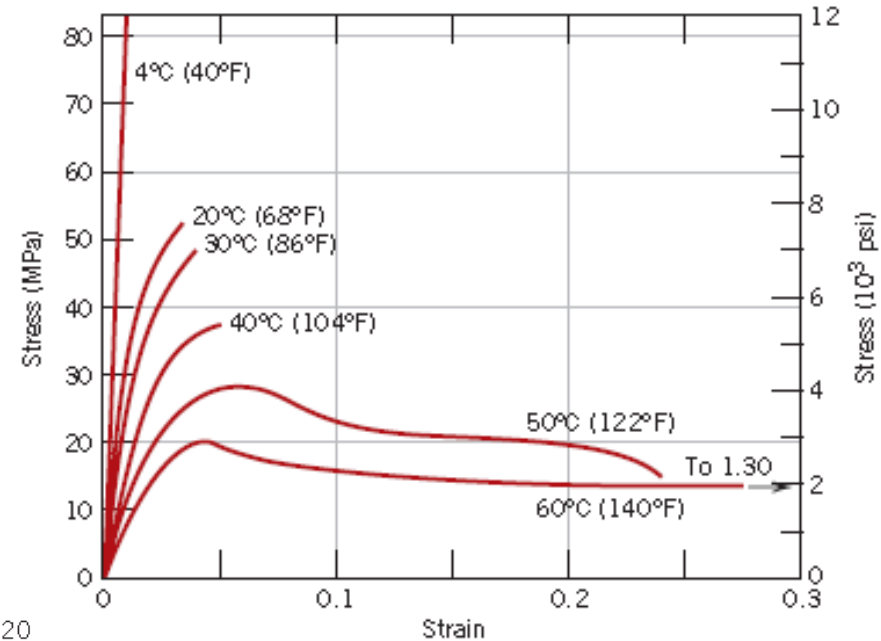
<sup>a</sup> Partially stabilized with 3 mol% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

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

# Efeito da Temperatura – Curvas Tensão - Deformação

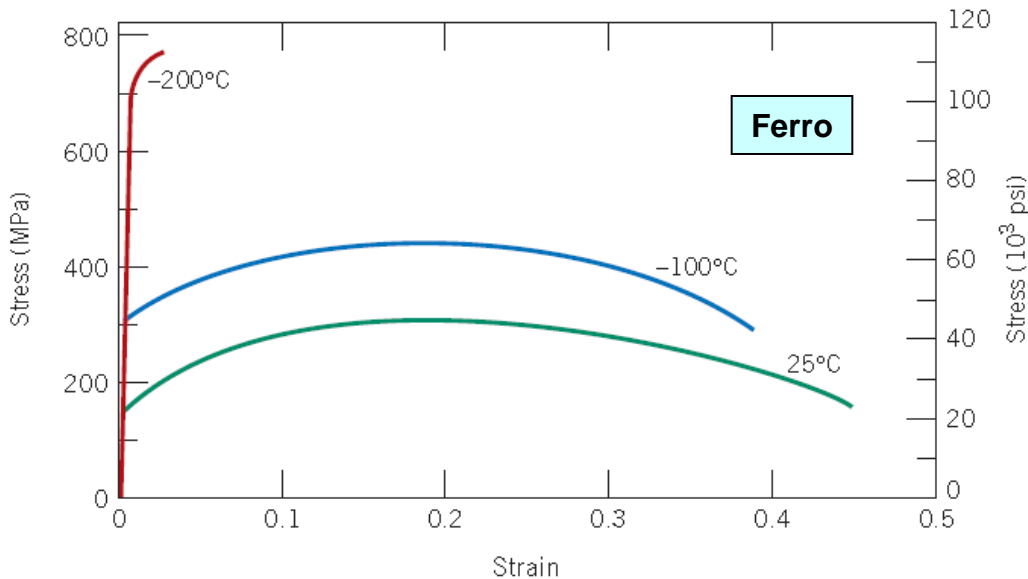
41

*Curvas de Tensão de Engenharia – Deformação de Engenharia obtidas em diferentes temperaturas.*



**PMMA [Poli(metacrilato de metila)] - Acrílico**

*O comportamento mecânico dos materiais pode mudar radicalmente – e muda ! – com a temperatura.*



**Ferro**



# Efeito da Temperatura sobre a Deformação Plástica

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

- Portanto:

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

e

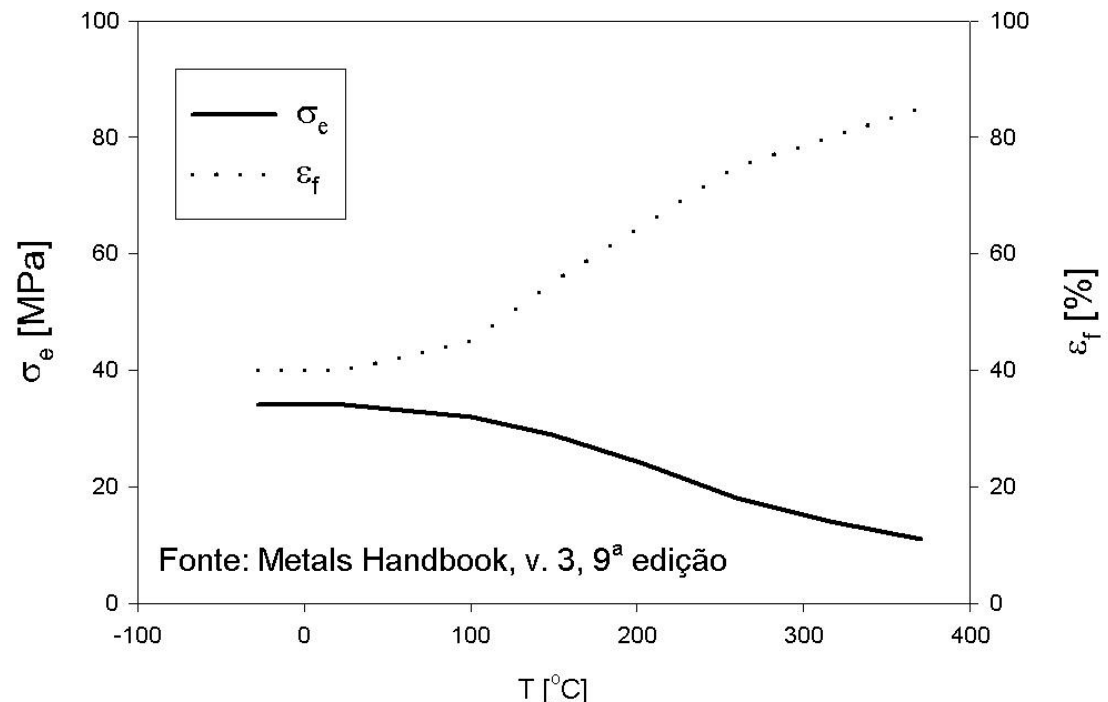
$\uparrow$  alongamento

- *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.

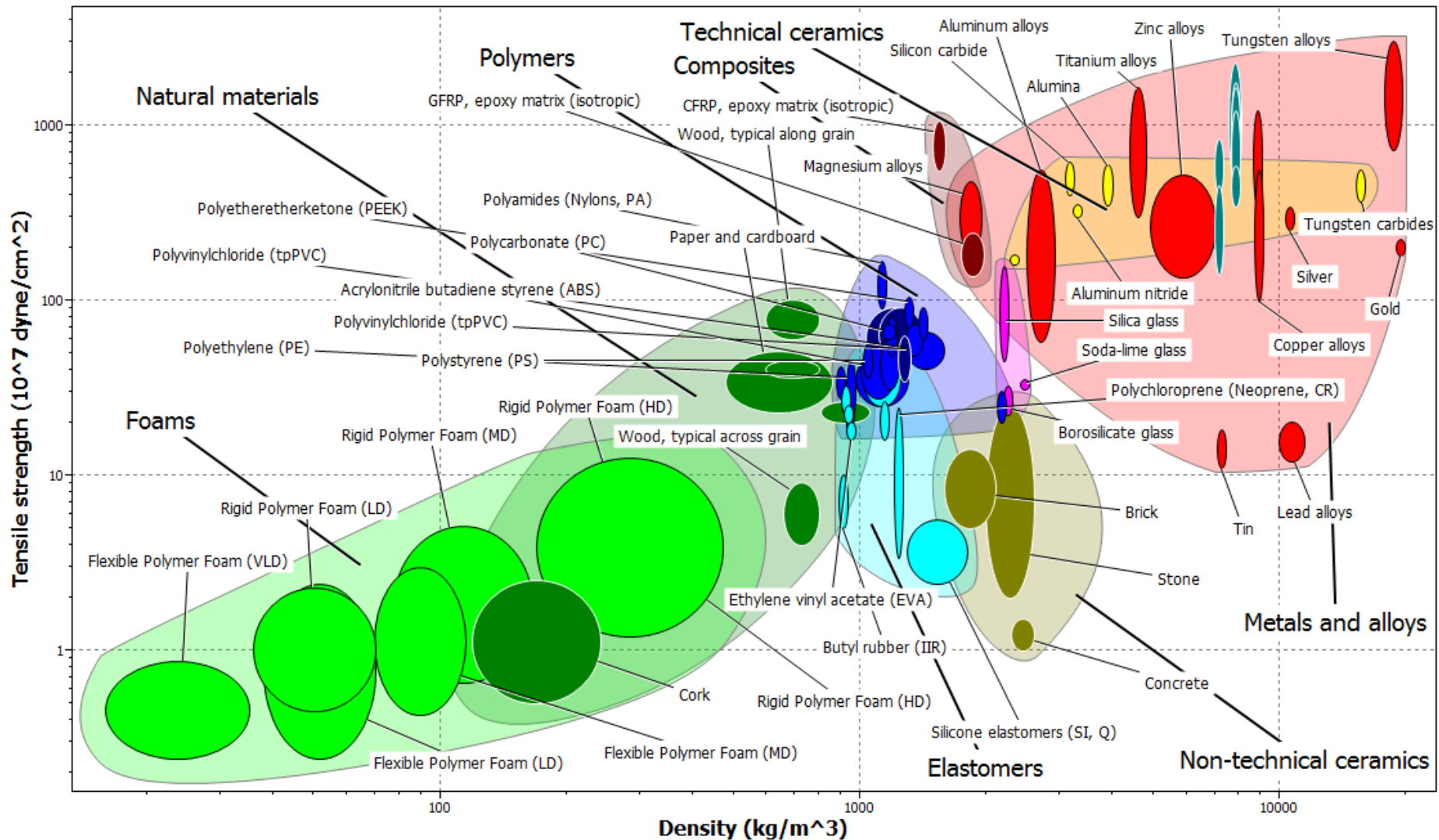
Alumínio AA1100 (min. 99% Al, 0,12% Cu)



- Não é apenas a **temperatura** que tem um efeito sobre a deformação plástica e, portanto, sobre as propriedades mecânicas. O **tempo** e a **forma de aplicação das solicitações mecânicas** também tem um efeito muito importante sobre as propriedades mecânicas dos materiais.
- De acordo com a forma de aplicação das solicitações mecânicas, com a temperatura e com o tempo pelo qual tais solicitações são aplicadas, os materiais podem se deformar de forma irreversível mesmo quando submetidos a tensões inferiores à tensão limite de escoamento determinada no ensaio mecânico de tração.
- Generalizando...
  - $T \nearrow \ggg$  tensão para início de deformação permanente  $LE \searrow$
  - $T \nearrow \ggg$  deformação  $\varepsilon$  (ductilidade)  $\nearrow$
  - Tempo elevado, esforço cíclico e tensão (*mesmo abaixo de LE*)  $\nearrow \ggg$  tempo de vida  $\searrow$   
(*tempo vida = tempo de uso antes do material falhar*)
    - Em materiais metálicos, o material pode ir endurecendo por efeito de encruamento
    - Em materiais frágeis, como os cerâmicas, trincas são produzidas e se propagam
  - Velocidade elevada de aplicação de tensão e temperatura  $\searrow \ggg$  energia absorvida no impacto  $\searrow$  (*ou seja, em baixas temperaturas, há uma tendência do materiais se comportarem de forma frágil*).
  - Velocidade elevada de aplicação de tensão e temperatura  $\nearrow \ggg$  energia absorvida no impacto  $\nearrow$  (*ou seja, em altas temperaturas, há uma tendência do materiais se comportarem de forma dúctil*).

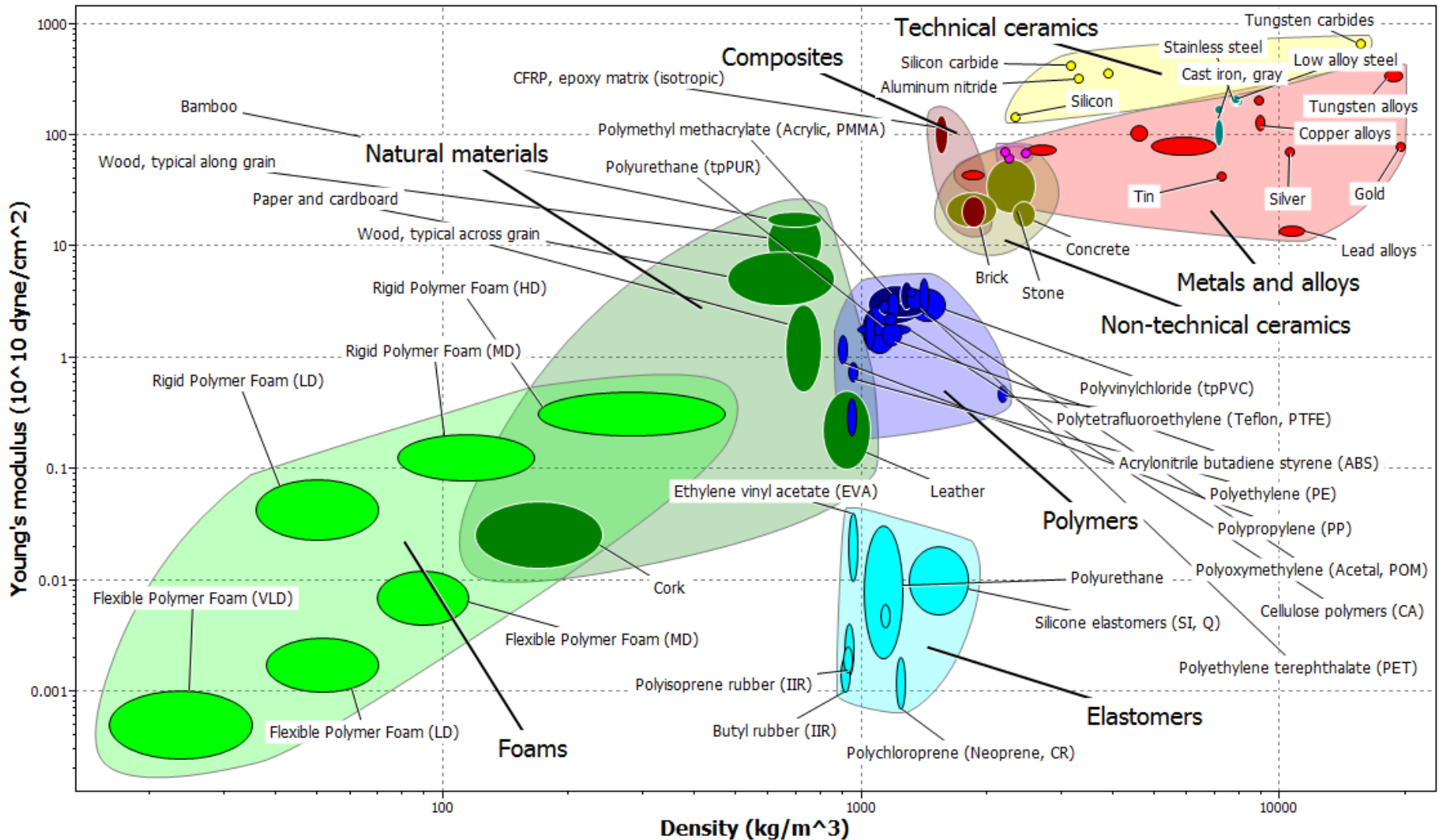
- Ensaio específicos existem para determinar propriedades específicas. Alguns exemplos desses ensaios são os seguintes:
  - Aplicação de cargas estáticas, por tempos elevados e temperaturas iguais ou superiores à ambiente : ensaios de fluência.
  - Aplicação de cargas estáticas, por tempos curtos: ensaio de dureza.
  - Aplicação de cargas cíclicas, com ou sem variação de temperatura, por tempos longos: ensaios de fadiga.
  - Aplicação de cargas cíclicas, com ou sem variação de temperatura, por tempos curtos : ensaios termo-mecânicos.
  - Velocidade de aplicação de carga muito elevada, com variação de temperatura: ensaios de impacto.
- *O pequeno número de créditos do curso PMT 3100 não permite que tratemos completamente do efeito do tempo e da temperatura nas propriedades mecânicas, e, conseqüentemente, não será feita a discussão de todos esses ensaios...*

Exemplo de informações disponíveis em bases de dados atuais  
**Limite de Resistência à Tração (Tensile Strength) x Densidade**



\*Polymers: Thermoplastics and thermosets

Exemplo de informações disponíveis em bases de dados atuais  
**Módulo de Elasticidade (Young Modulus) x Densidade**



\*Polymers: Thermoplastics and thermosets

## 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.

## ...finalizando : Propriedades Mecânicas I

- Ao final do estudo dos conteúdos desta Unidade você deve ser capaz de:
  - definir o que se entende por deformação elástica e deformação plástica.
  - definir as formas de aplicação de tensão: tração, compressão, cisalhamento, torção, flexão.
  - definir tensão e deformação para esforços de tração simples e de cisalhamento simples.
  - esquematizar um ensaio de tração, bem como a curva de tensão de engenharia – deformação de engenharia que dele resulta.
  - obter as informações contidas em uma curva de tensão de engenharia – deformação de engenharia : módulo de elasticidade; limite de proporcionalidade e/ou limite de escoamento; limite de resistência; ductilidade; resiliência; tenacidade.
  - construir, a partir dos dados de uma curva de tensão de engenharia – deformação de engenharia, a respectiva curva de tensão real – deformação real.
  - classificar ao menos de forma preliminar, a partir de uma curva de tensão de engenharia – deformação de engenharia, um material como sendo um material de comportamento mecânico frágil, moderadamente dúctil ou dúctil; no caso de polímeros, ser capaz de classificar o polímero como frágil, dúctil ou elastômero.
  - esquematizar o comportamento de deformação elástica e plástica em polímeros parcialmente cristalinos.
  - esquematizar um ensaio de flexão e calcular a tensão de ruptura à flexão de um material frágil a partir da carga de ruptura, das dimensões do corpo de prova e das características do ensaio.
  - discutir brevemente o efeito da temperatura nas propriedades mecânicas dos materiais.

## Referências

- **Callister, W.D.** Materials Science and Engineering: An Introduction. 7<sup>th</sup> Ed. Wiley. 2007. Cap.6 ; Cap.12, item 12.9 .
  - Obs.: outras edições do livro do Callister existentes nas bibliotecas da EP, em inglês ou português, também cobrem o conteúdo apresentado nesta Unidade.
- **Askeland, D.R.; Phulé, P.P.** Ciência e Engenharia dos Materiais. Cengage Learning. 2008. Cap. 6, itens 6.1-6.6 .
- **Shackelford, J.F.** Ciência dos Materiais. 6<sup>a</sup> Ed. Pearson. 2008. Cap. 6, itens 6.1-6.3 .