

ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS I

Aula 4

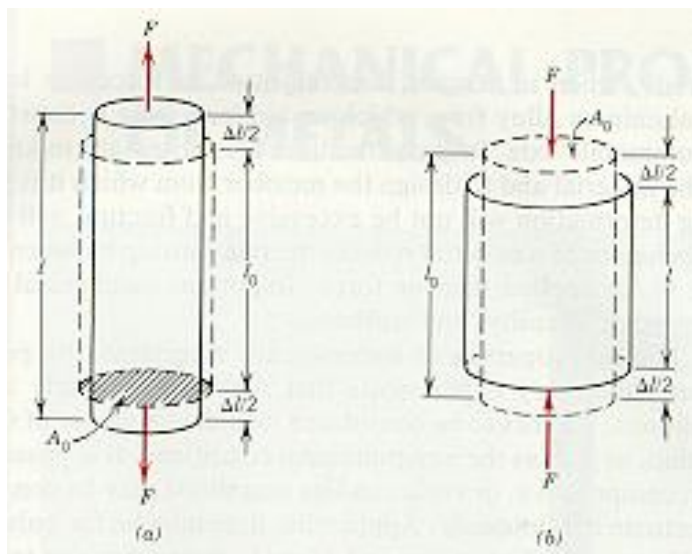
Conteúdo: Propriedades Mecânicas dos Metais

Introdução

- O comportamento mecânico de uma material reflete a relação entre a sua resposta ou deformação a uma carga ou força aplicada.
- Algumas propriedades mecânicas importantes são a resistência, a dureza, a ductilidade e a rigidez.
- Usamos ensaios de laboratório para aferir suas propriedades.
- Diversos ensaios são possíveis. Eles são normatizados (ex: ASTM).

Conceitos de Tensão e Deformação

Ensaio uniaxiais



Tração

Compressão

- **Tensão de Engenharia:**

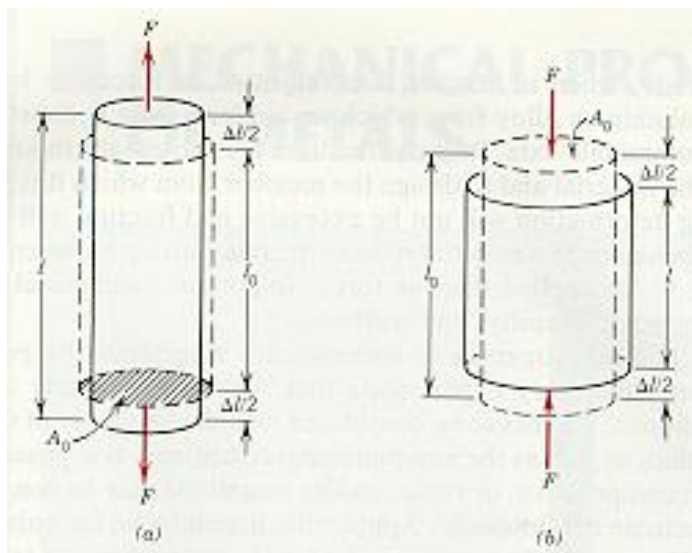
$$\sigma = \frac{F}{A_0} [MPa]$$

- **Deformação de Engenharia:**

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} \text{ Adimensional}$$

Conceitos de Tensão e Deformação

Ensaio uniaxiais



Tração

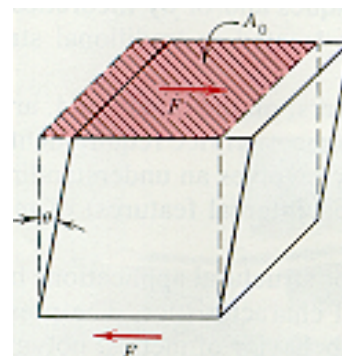
Compressão

- Tensão de Engenharia:**

$$\sigma = \frac{F}{A_0} [MPa]$$

- Deformação de Engenharia:**

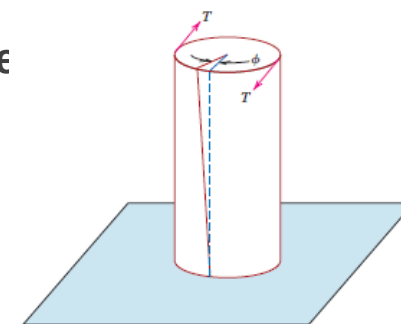
$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} \text{ Adimensional}$$



- Tensão e deformação de cisalhamento**

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

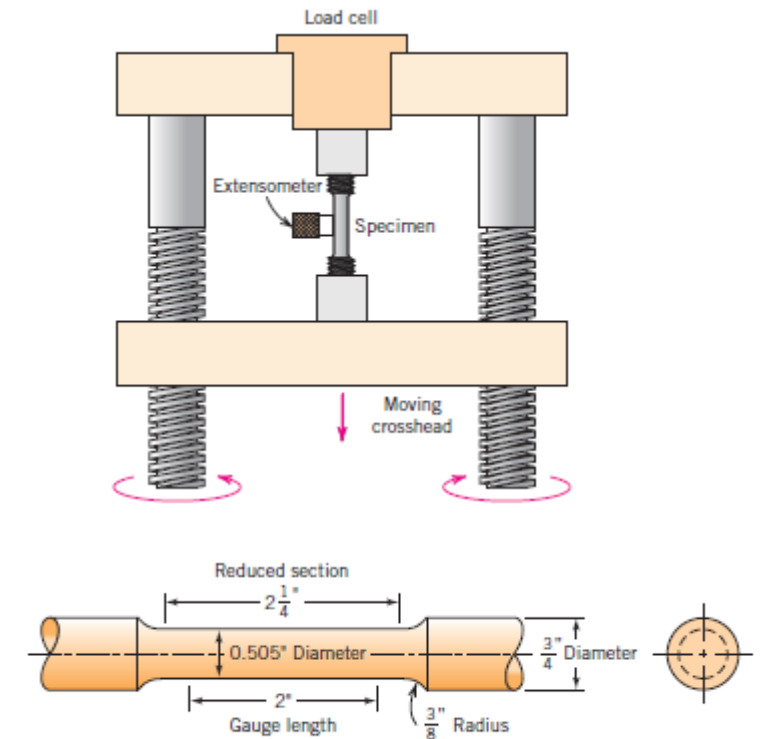
$$\varepsilon = \tan \theta$$



- Ensaio de torção (+ comum)**

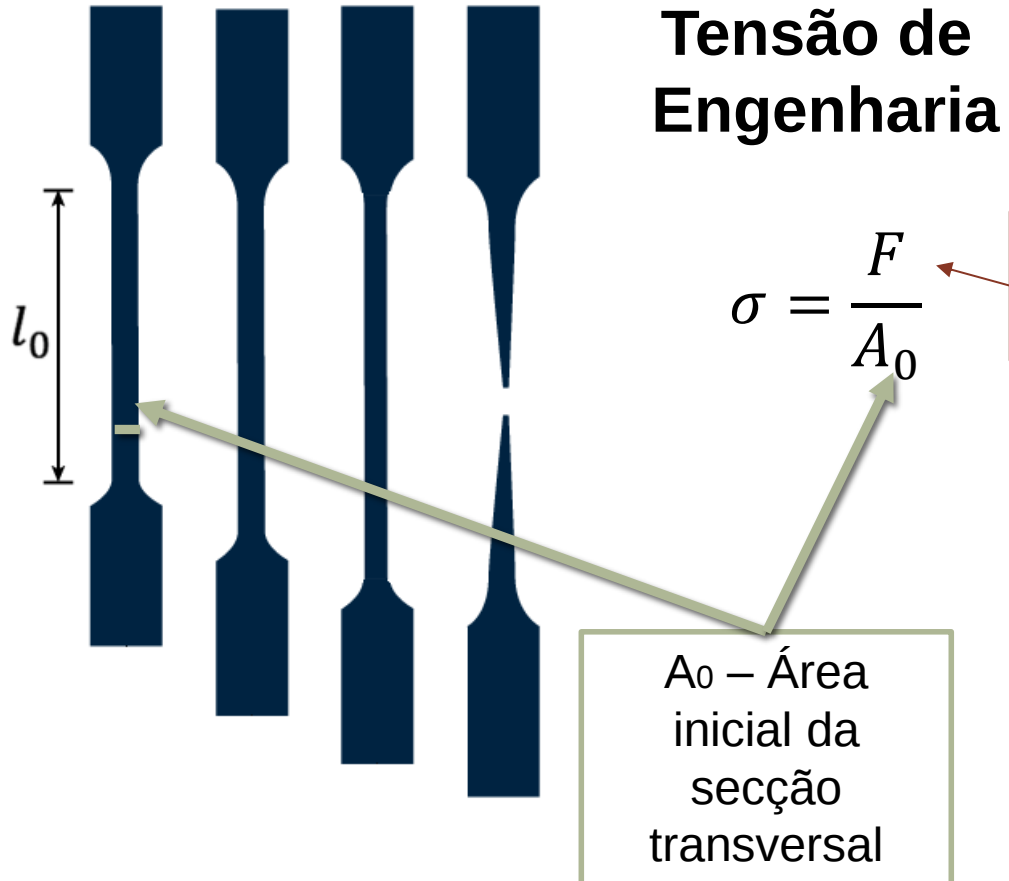
Ensaio de Tração

Ensaio para determinar a evolução da resistência do material com a deformação imposta



Ensaio de Tração

- Ensaio para determinar a evolução da resistência do material com a deformação imposta



Deformação de Engenharia

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

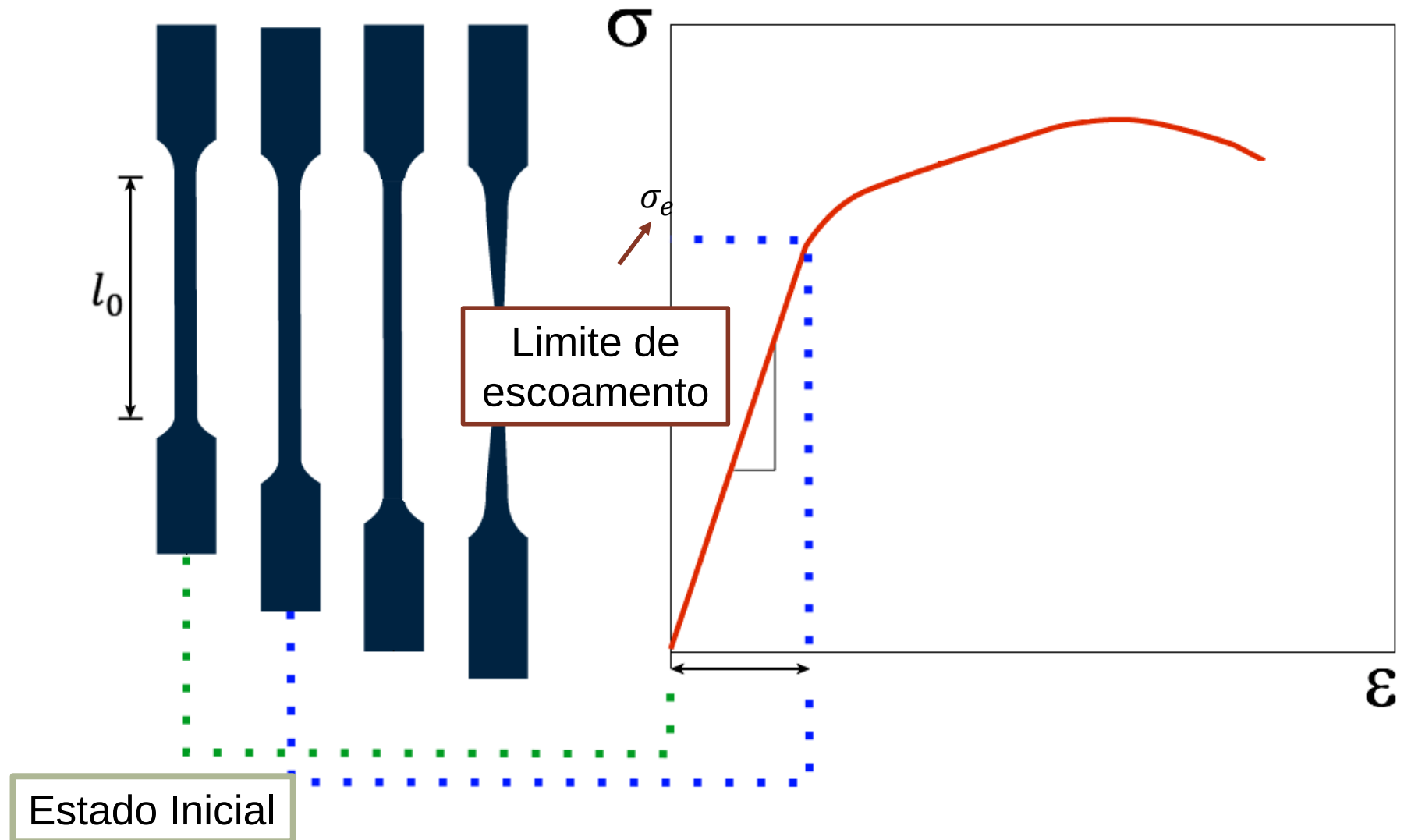
$\Delta l = l_i - l_0$

variação do comp.

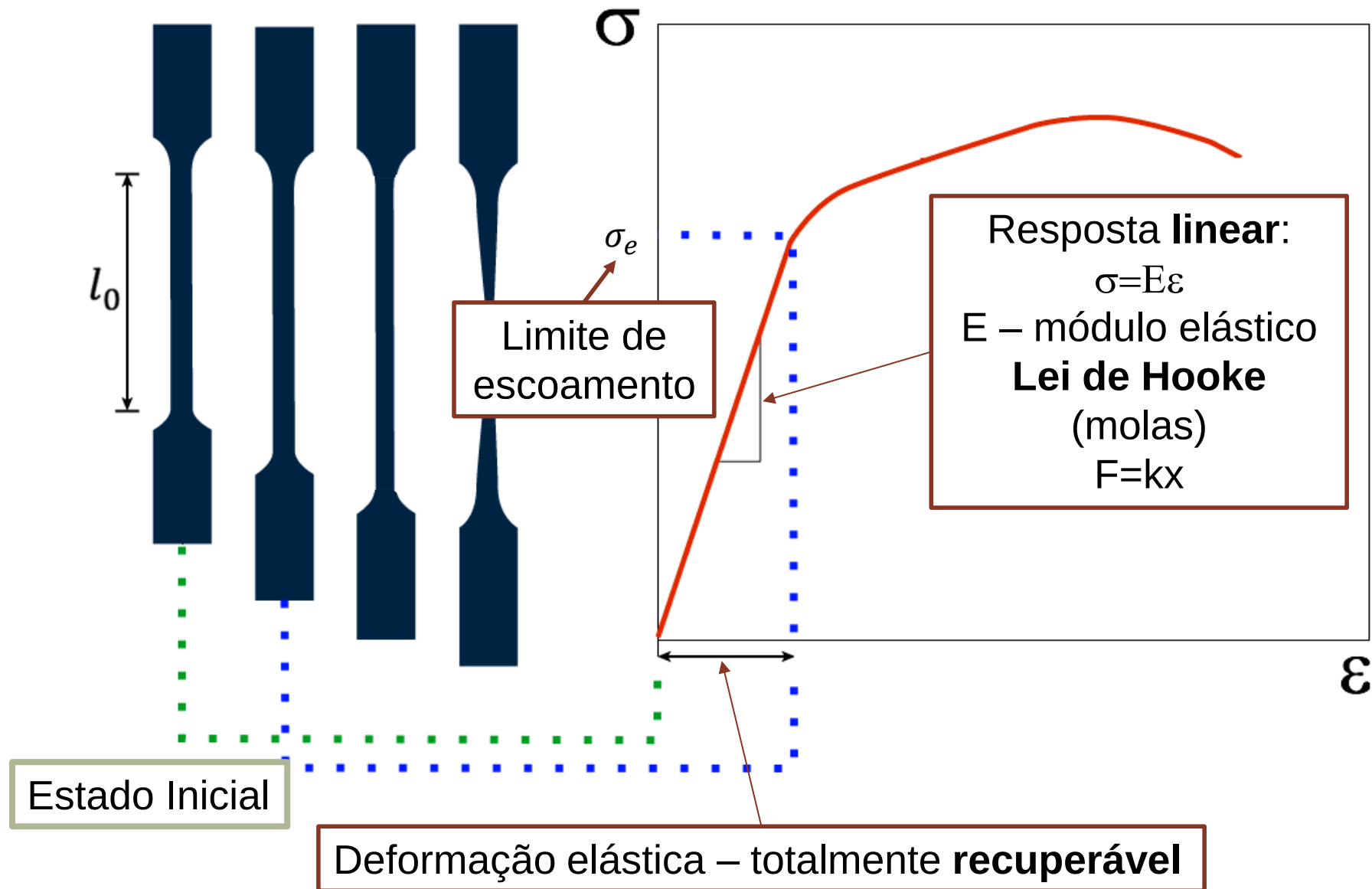
Comp. Inicial

Δl representa o alongamento de deformação ou a variação no comprimento em um dado instante, em relação ao comprimento original

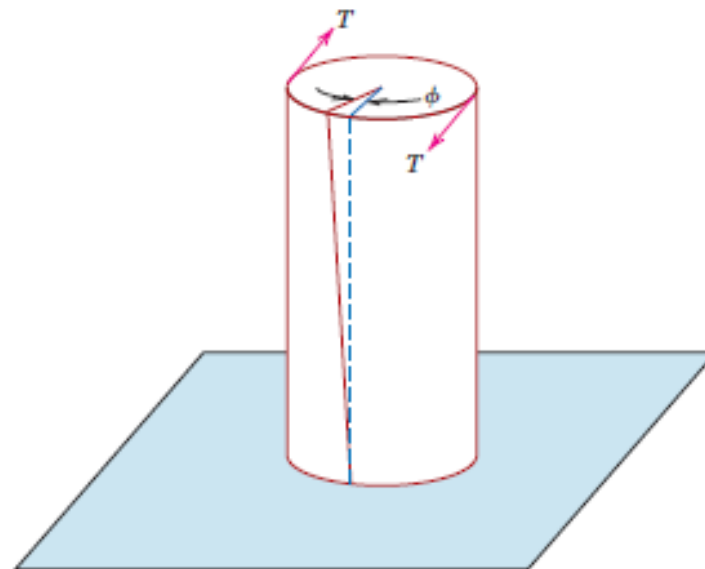
Deformação Elástica



Regime elástico



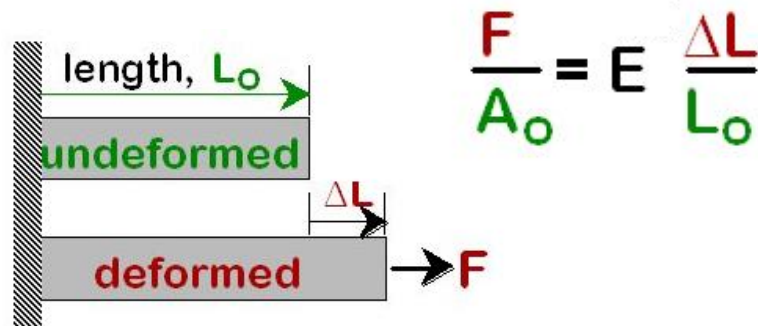
Módulo de Elasticidade



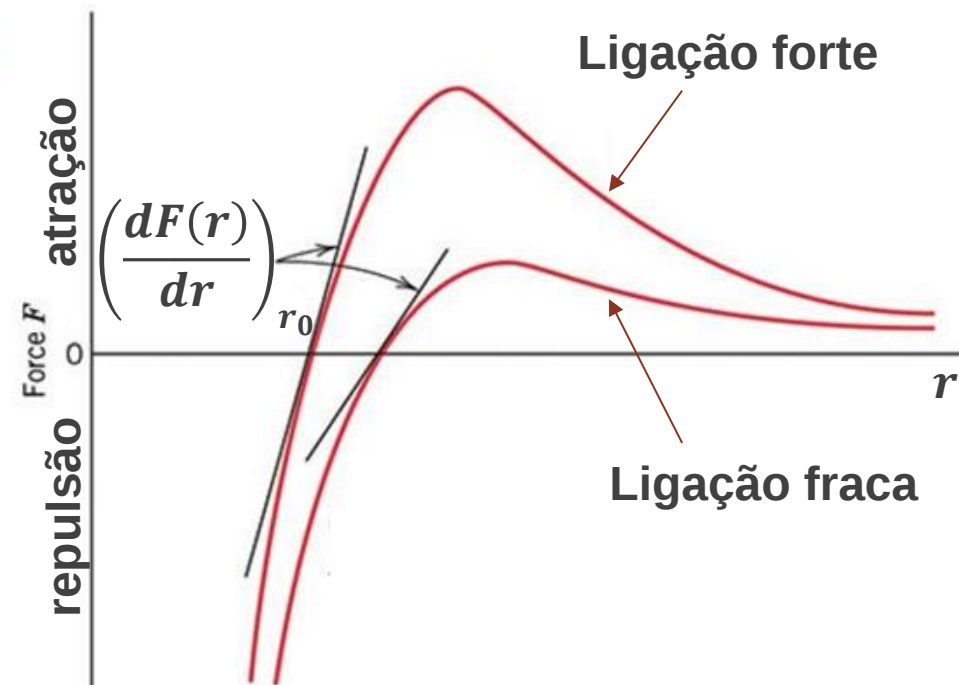
$$\tau = G\gamma$$

G = módulo de cisalhamento

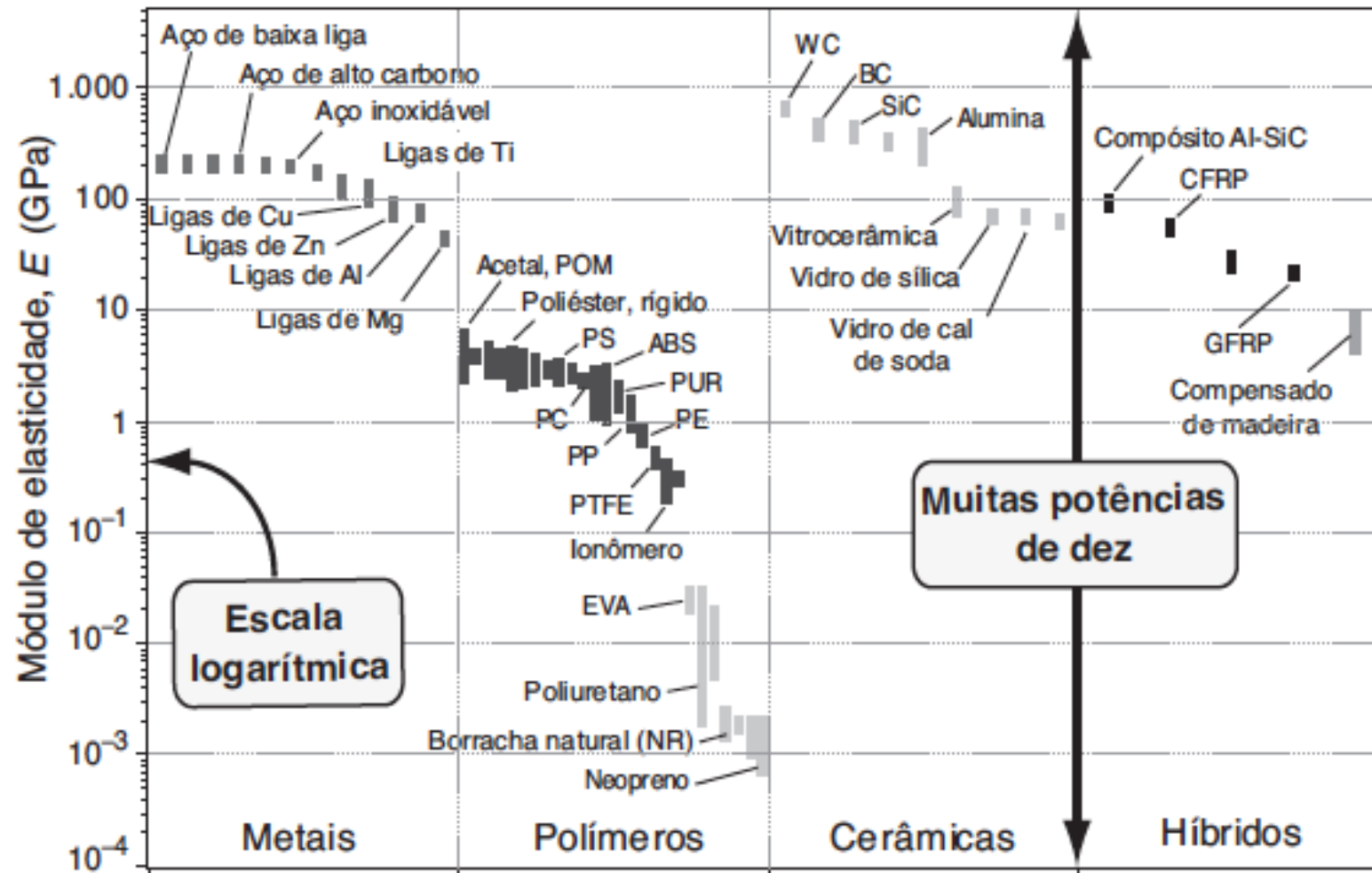
Força de ligação x Módulo de Elasticidade

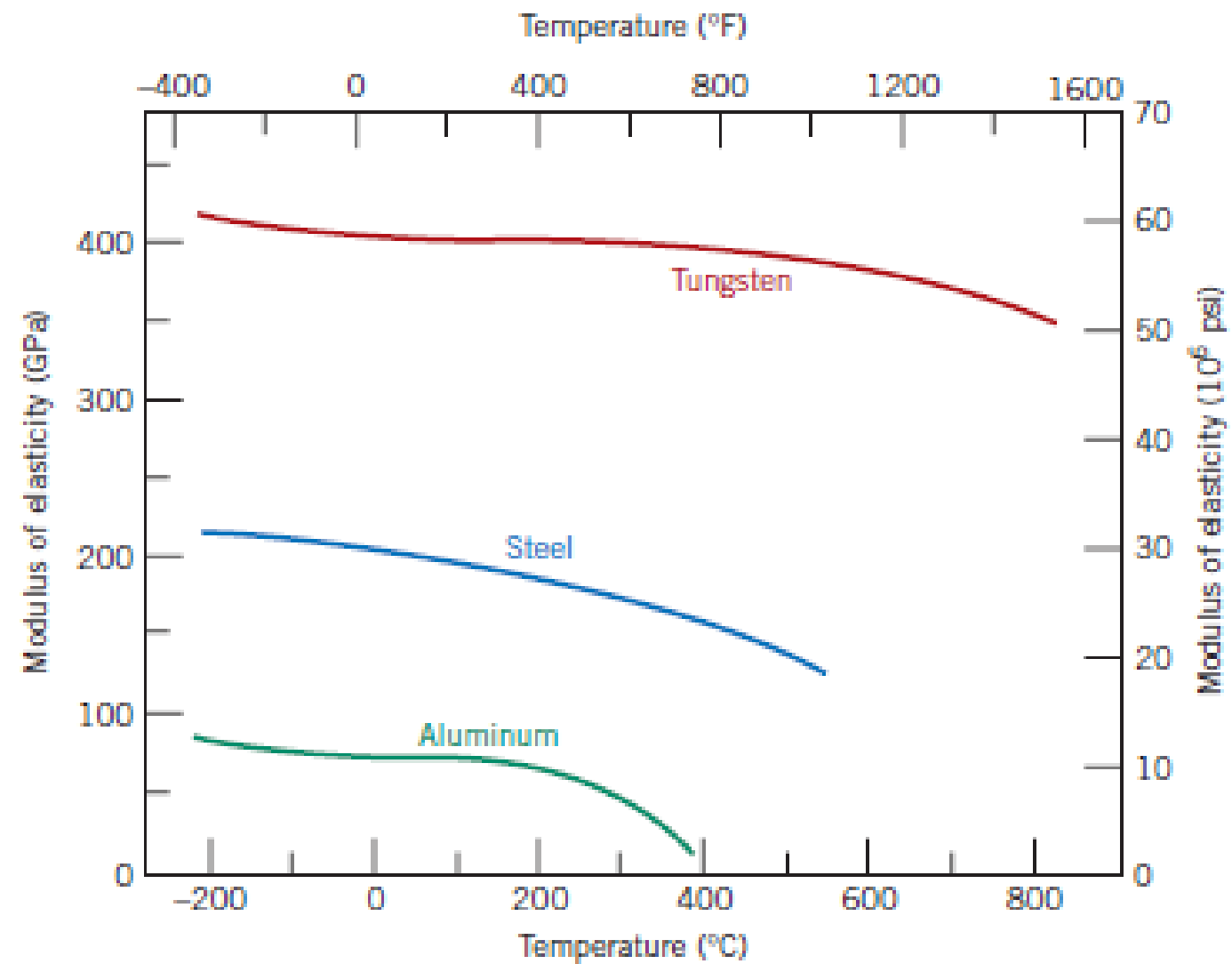


$$E \propto \left(\frac{dF(r)}{dr} \right)_{r_0}$$

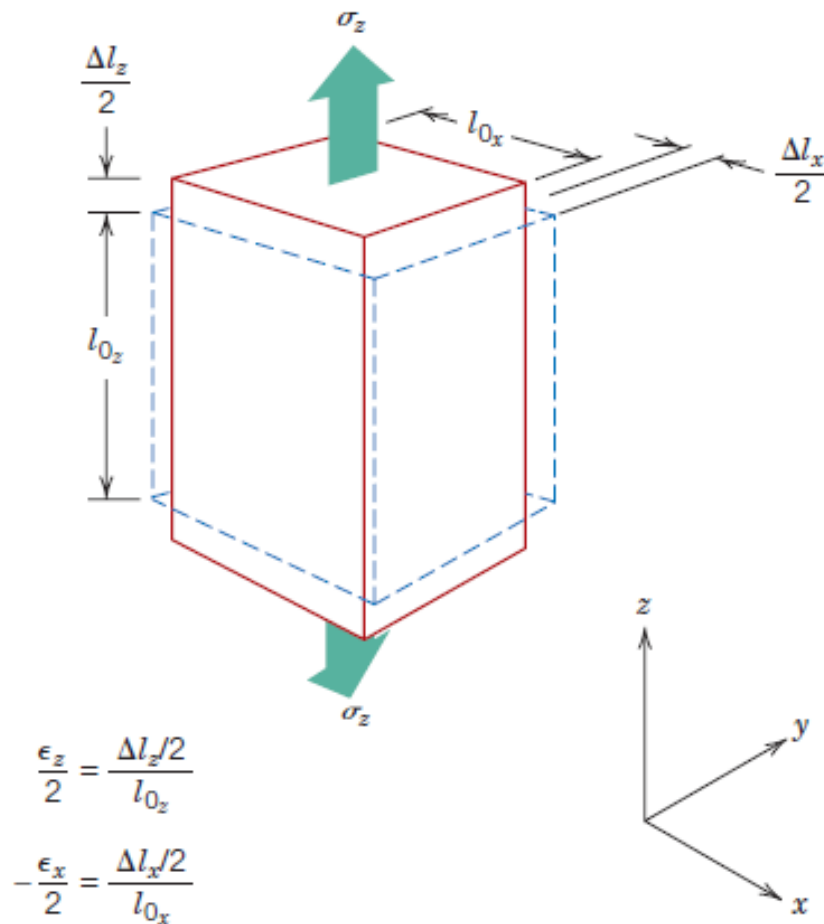


Módulo de Elasticidade





Outras Propriedades Elásticas



Coeficiente de Poisson:

Se o material for isotrópico:

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

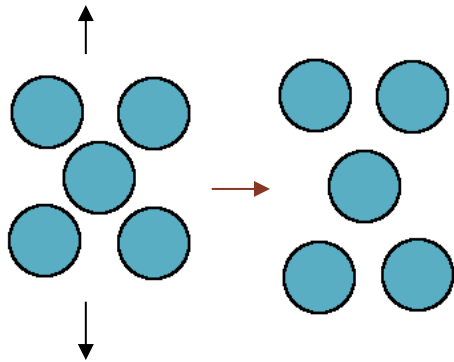
$$E = 2G(1 + \nu)$$

Anelasticidade

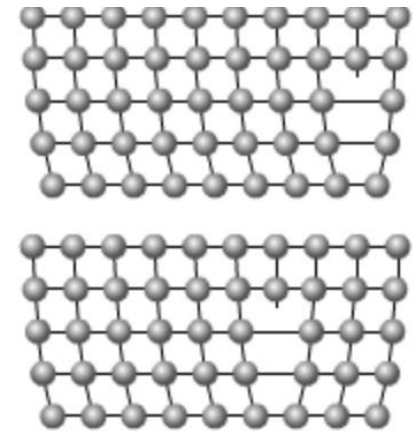
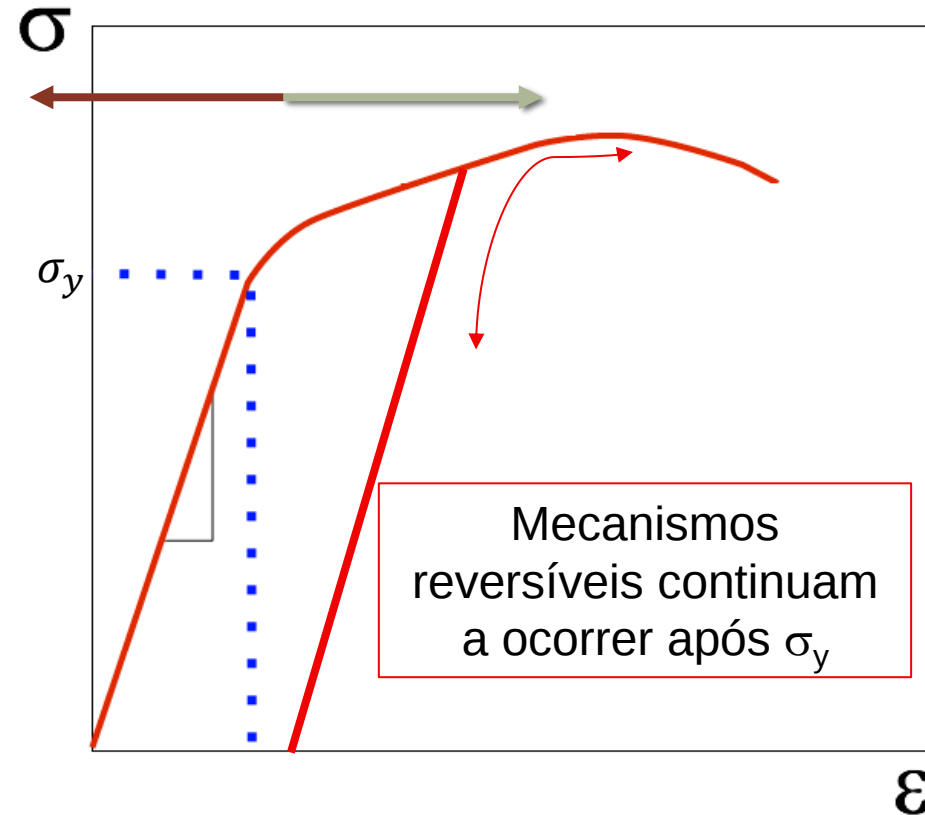
- Até aqui, assumimos que a deformação elástica é independente do tempo, isto é, quando uma tensão é aplicada no regime elástico, a deformação é instantânea.
- O mesmo vale na recuperação da deformação, após a remoção da tensão.
- Porém, existe um tempo o qual o material leva para acomodar a deformação. Esse comportamento no qual a deformação elástica é dependente do tempo é chamada de Anelasticidade.
- Para metais esse tempo é geralmente próximo de zero em temperatura ambiente. Por isso na maior parte dos casos é desconsiderado.
- Porém, esse efeito é bastante pronunciado em polímeros.

Deformação Plástica

Mecanismos irreversíveis começam a operar!

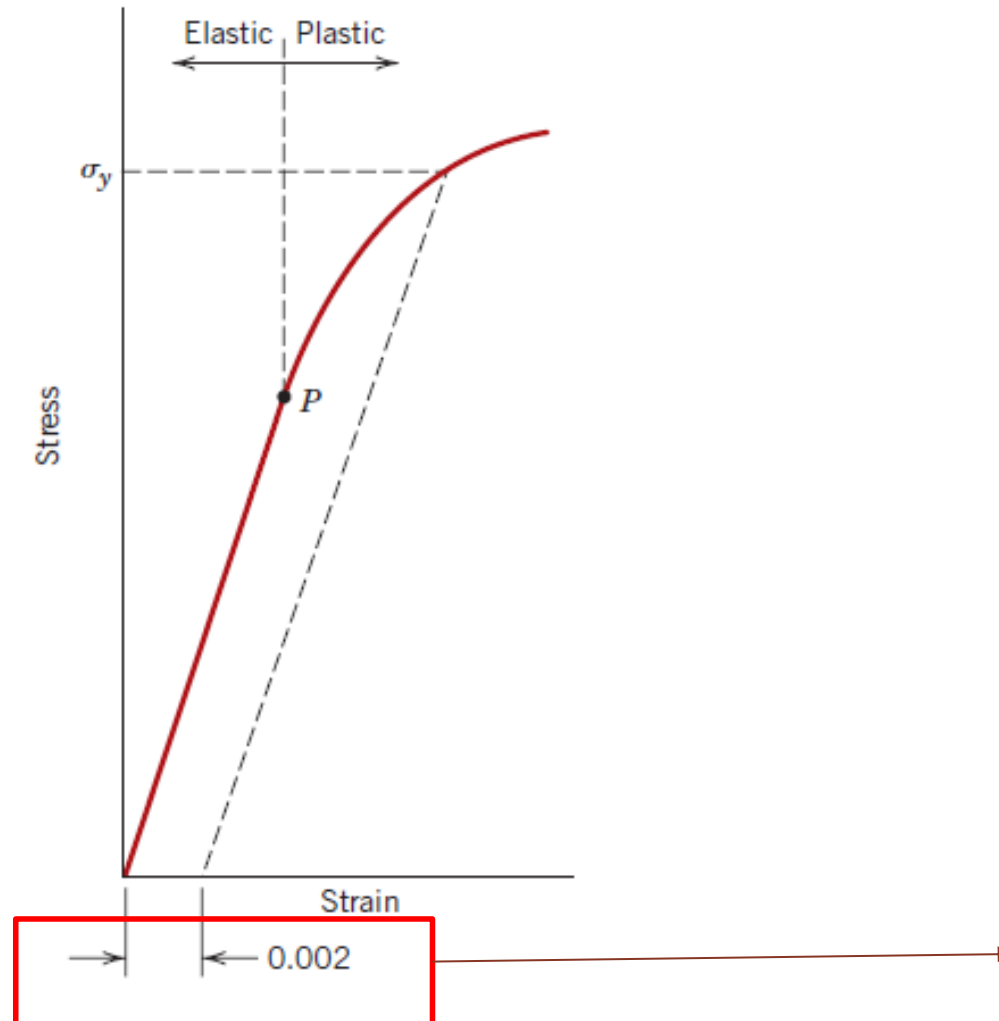


Mecanismos reversíveis



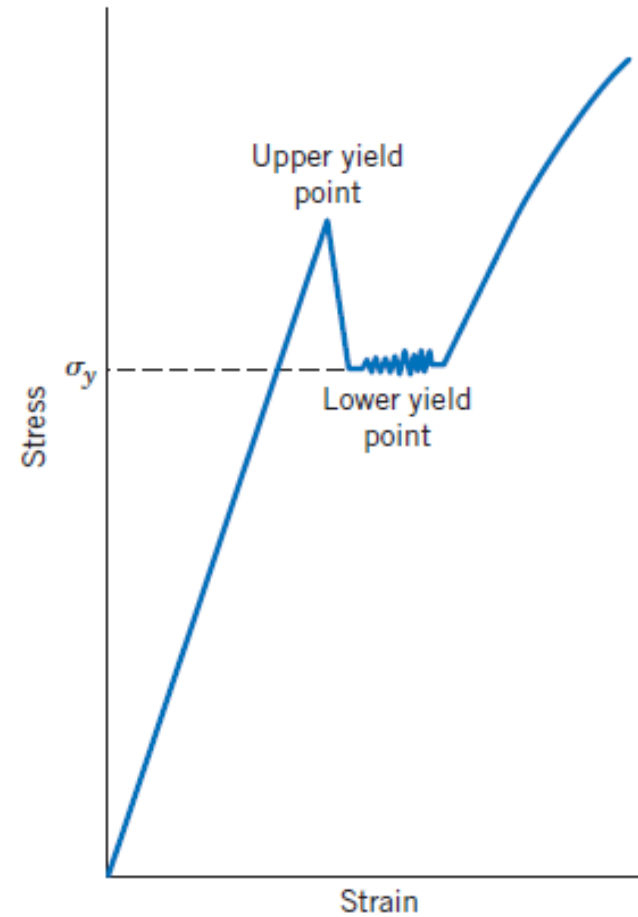
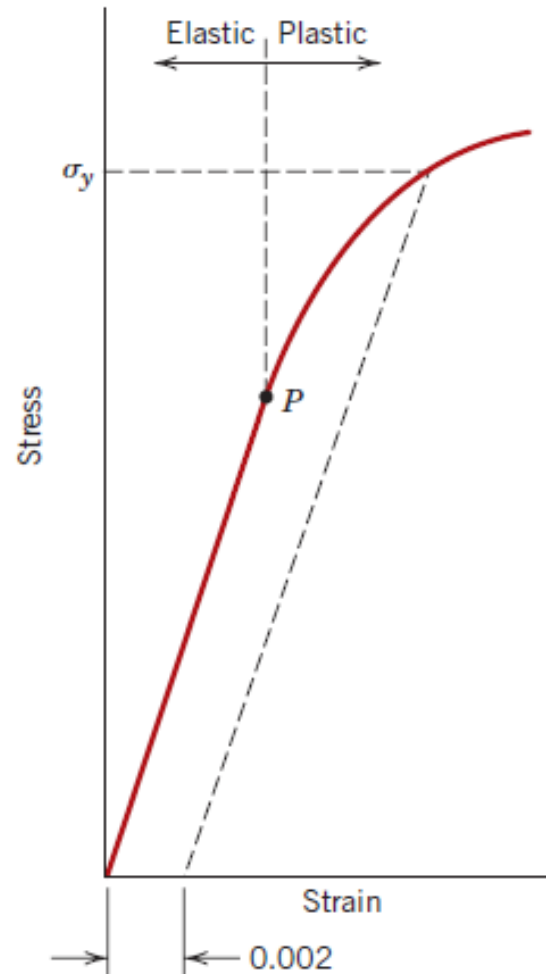
Mecanismos irreversíveis

O Limite de Escoamento

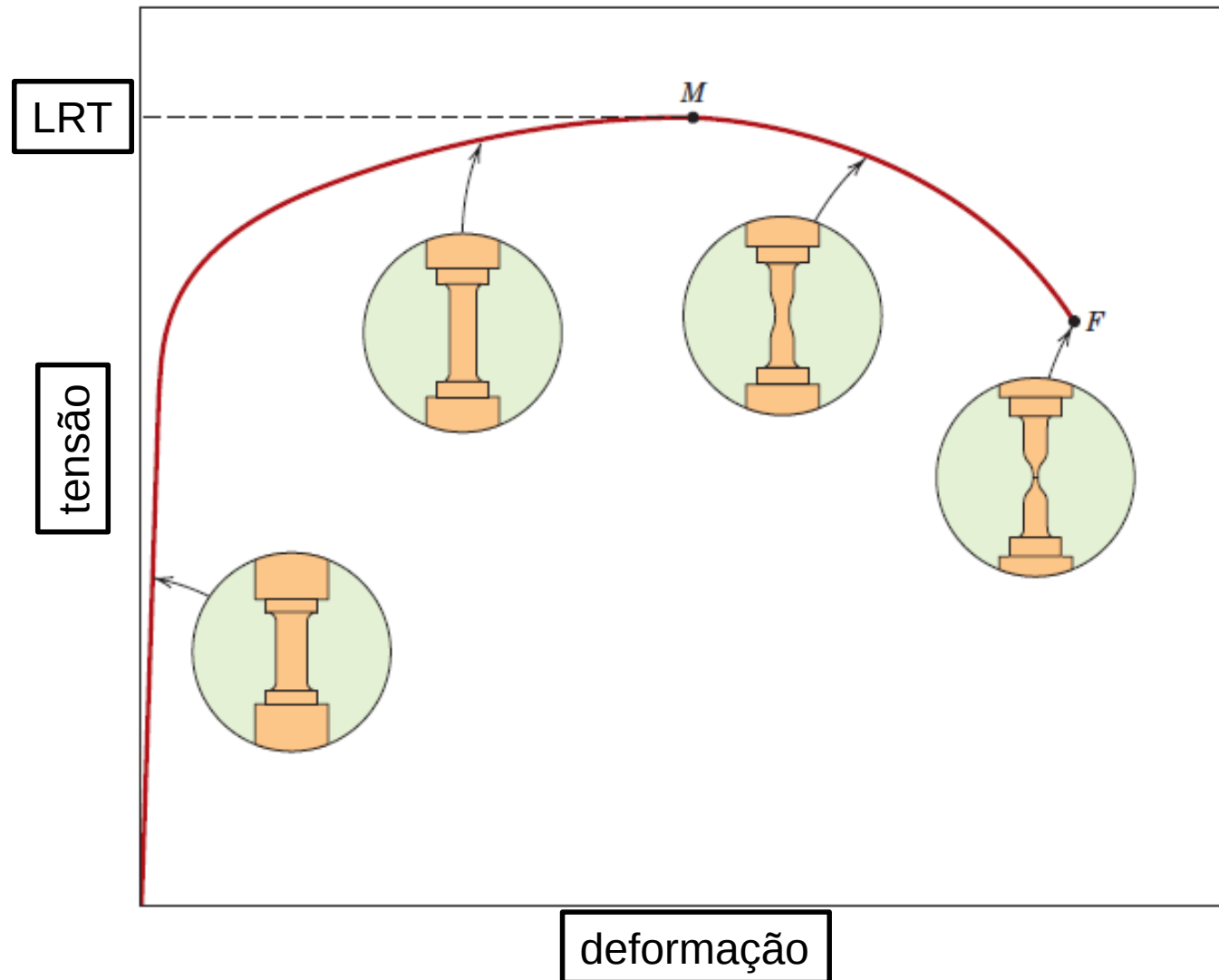


Na maioria dos casos usa-se a tensão necessária para gerar 0,2% de deformação para definir o limite de escoamento (σ_y).

O Limite de Escoamento

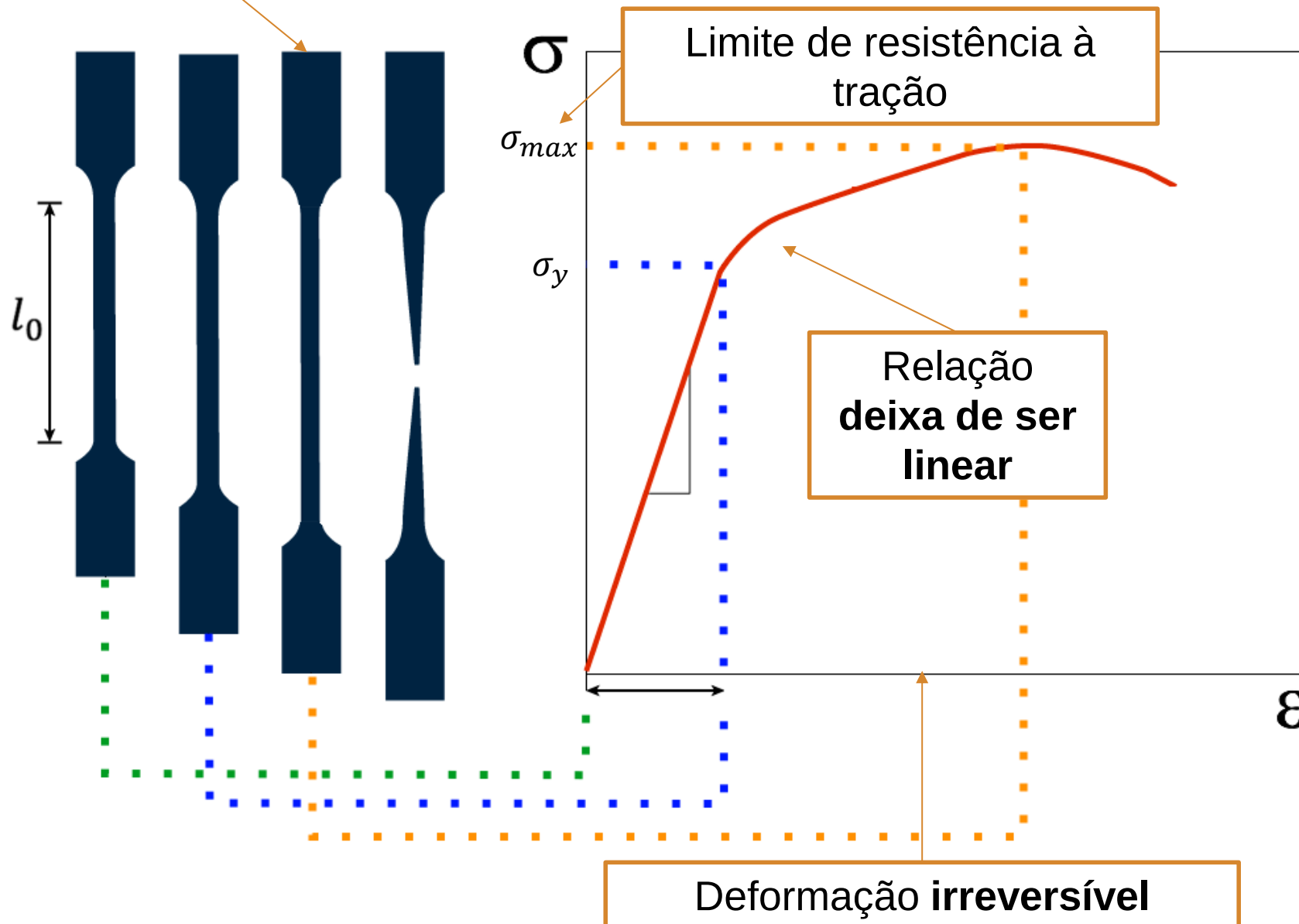


O Limite de Resistência à Tração



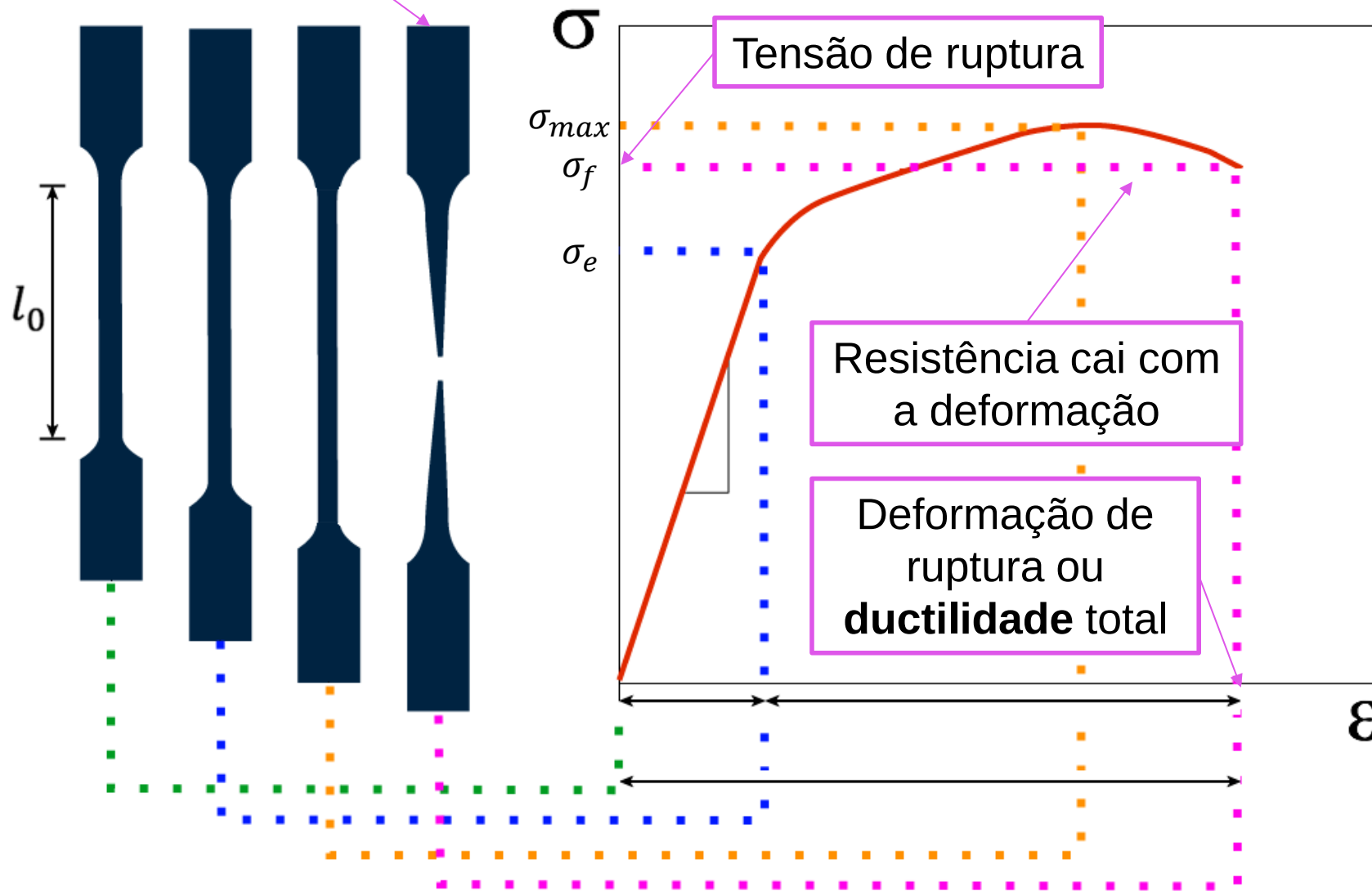
Deformação é **homogênea** e não gera variação de volume

Regime plástico uniforme

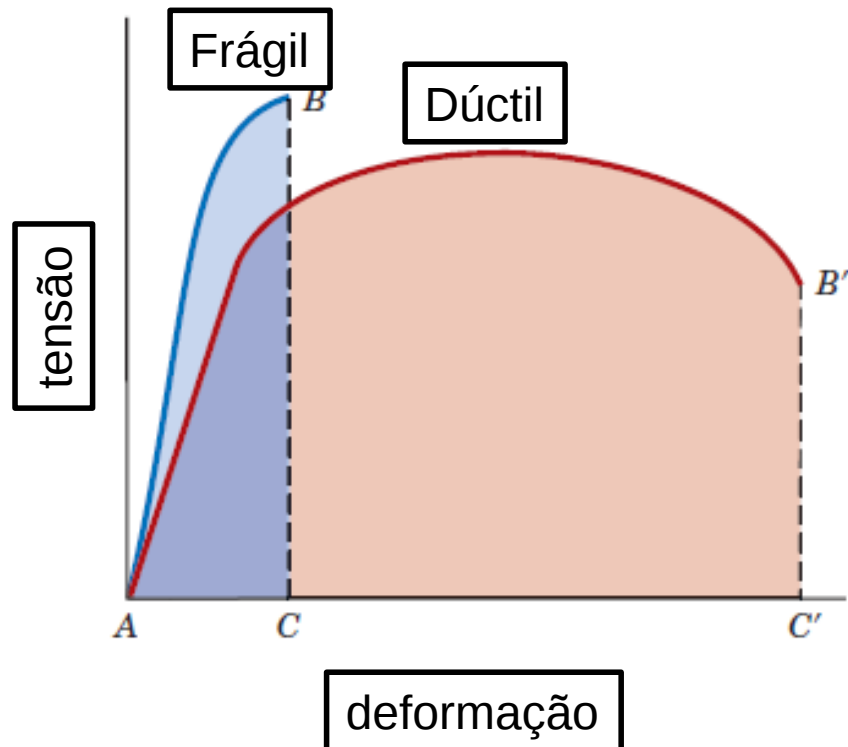


Deformação não é mais homogênea
– formação de **empescoçamento**

Regime plástico não uniforme



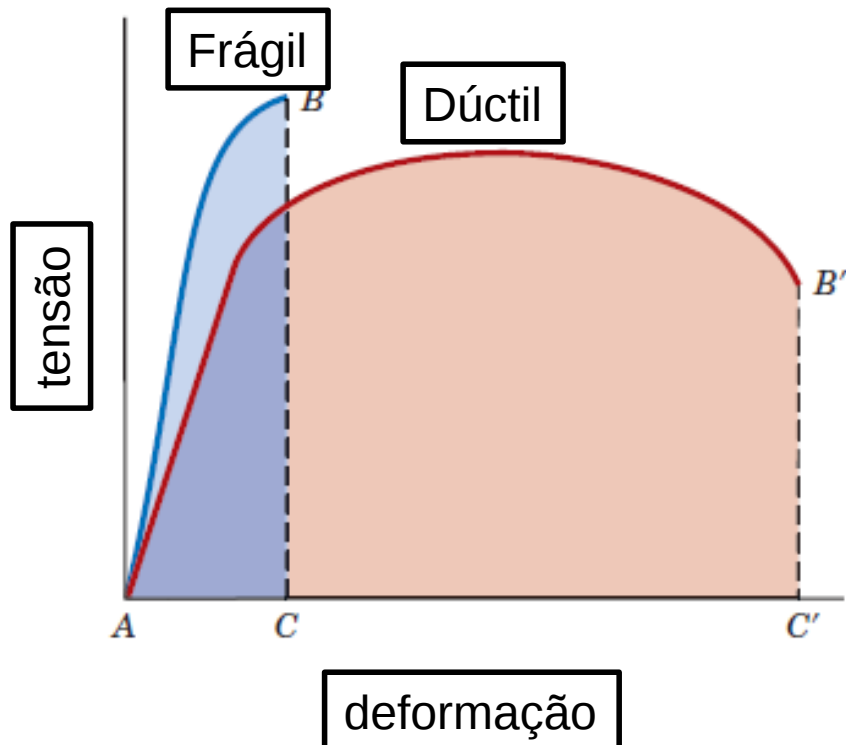
Ductilidade



- **Ductilidade** é a propriedade mecânica que representa uma medida do grau de deformação plástica que foi suportado até o momento da fratura.
- Um material que experimenta uma deformação plástica muito pequena ou mesmo nenhuma deformação plástica até o momento da sua fratura é chamado de **frágil**.
- Materiais que apresentam bastante deformação plástica até a fratura são **dúcteis**.

Ductilidade

- A **Ductilidade** pode ser expressa quantitativamente ou como **alongamento percentual (Al%)** ou como **redução percentual na área (RA%)**.



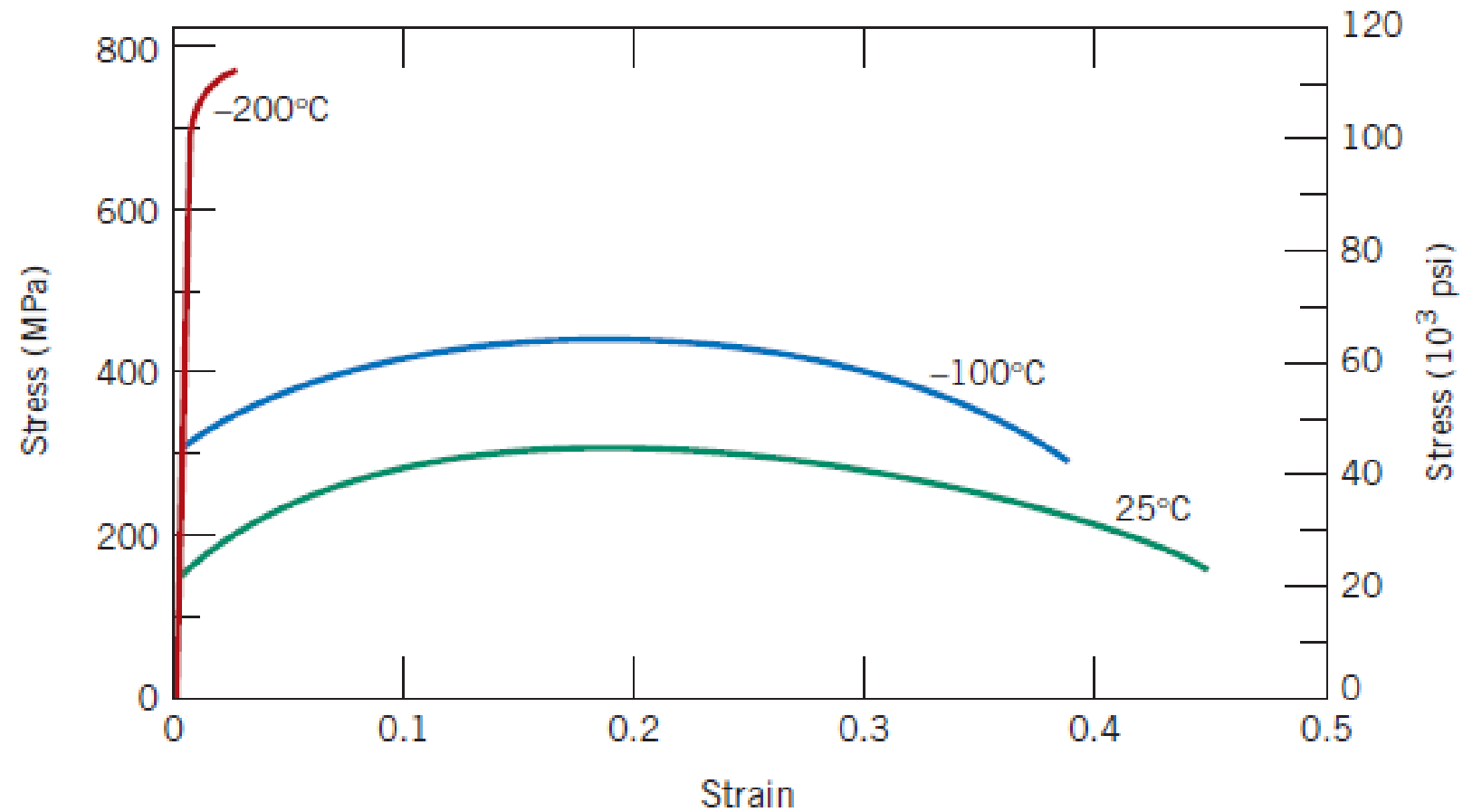
$$Al\% = \left(\frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \times 100\%$$

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

Valores Típicos de Propriedades Mecânicas (Tamb)

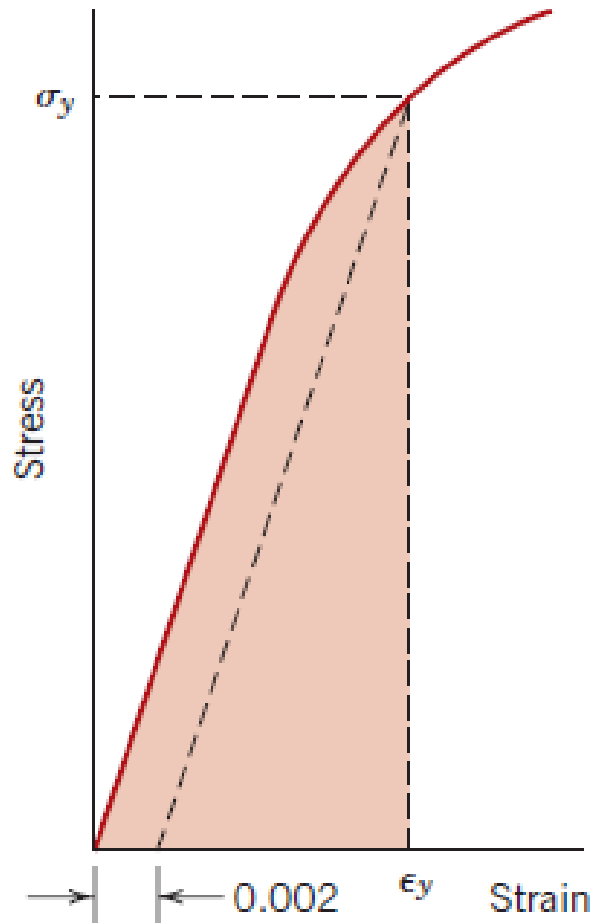
<i>Metal Alloy</i>	<i>Yield Strength, MPa (ksi)</i>	<i>Tensile Strength, MPa (ksi)</i>	<i>Ductility, %EL [in 50 mm (2 in.)]</i>
Aluminum	35 (5)	90 (13)	40
Copper	69 (10)	200 (29)	45
Brass (70Cu–30Zn)	75 (11)	300 (44)	68
Iron	130 (19)	262 (38)	45
Nickel	138 (20)	480 (70)	40
Steel (1020)	180 (26)	380 (55)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

Influência da Temperatura



Ferro

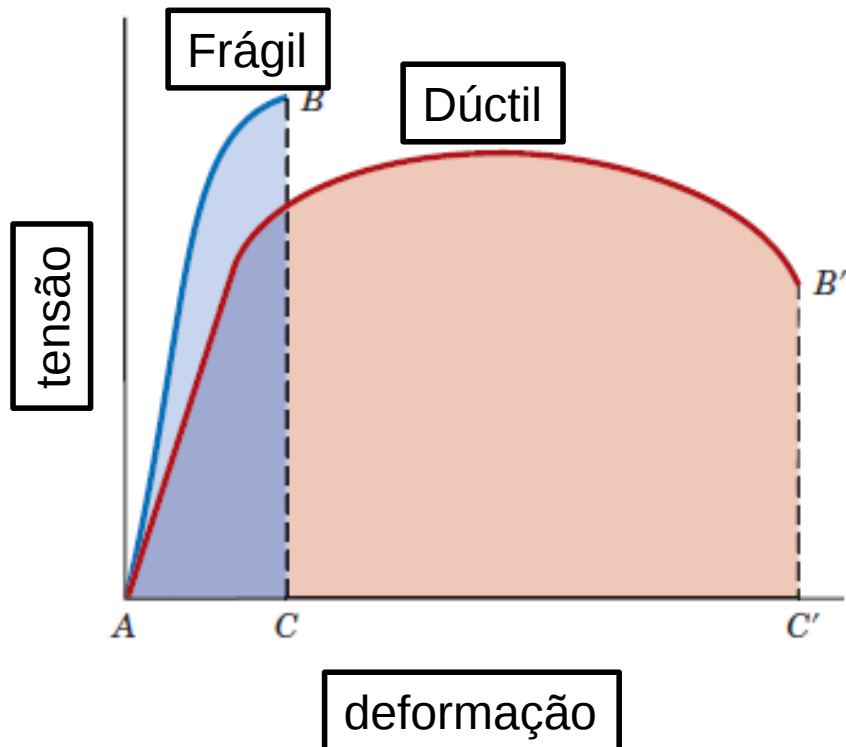
Resiliência



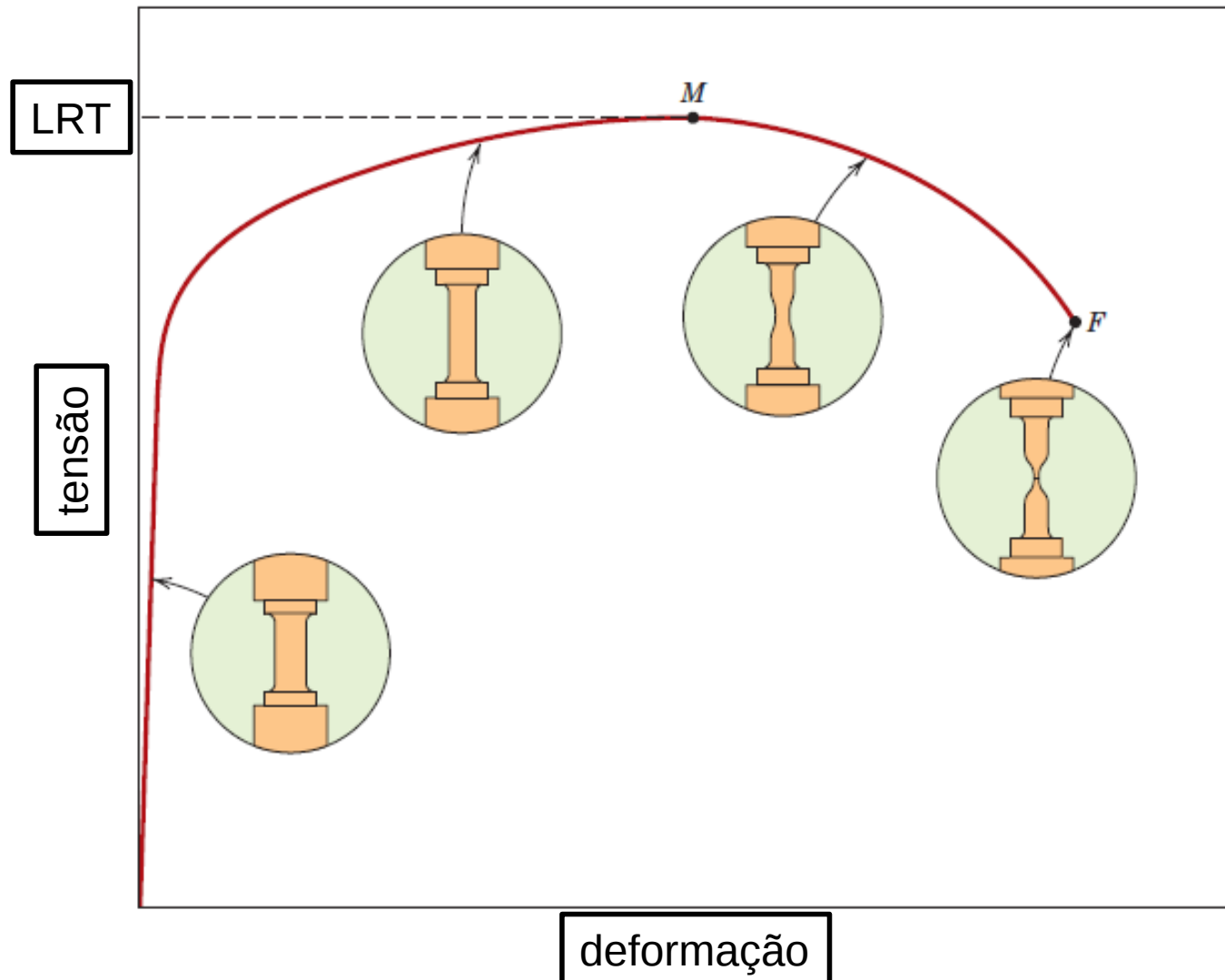
- Capacidade de um material absorver energia quando ele é deformado elasticamente e, com a remoção da carga, permitir a recuperação dessa energia.
- O módulo de resiliência U_r é a área sob a curva tensão x deformação até o limite de escoamento (área ao lado).

Tenacidade

- **Tenacidade** é um termo usado em vários contextos
- Representa uma medida da **habilidade de um material absorver energia até sua fratura**.
- Em ensaios de tração, a tenacidade é dada pela área sob a curva tensão-deformação. A unidade é dada em J/m^3 .



O Ensaio de Tração



Quando a curva de tensão x deformação de Engenharia passa do ponto “M”, o metal parece ficar menos resistente.

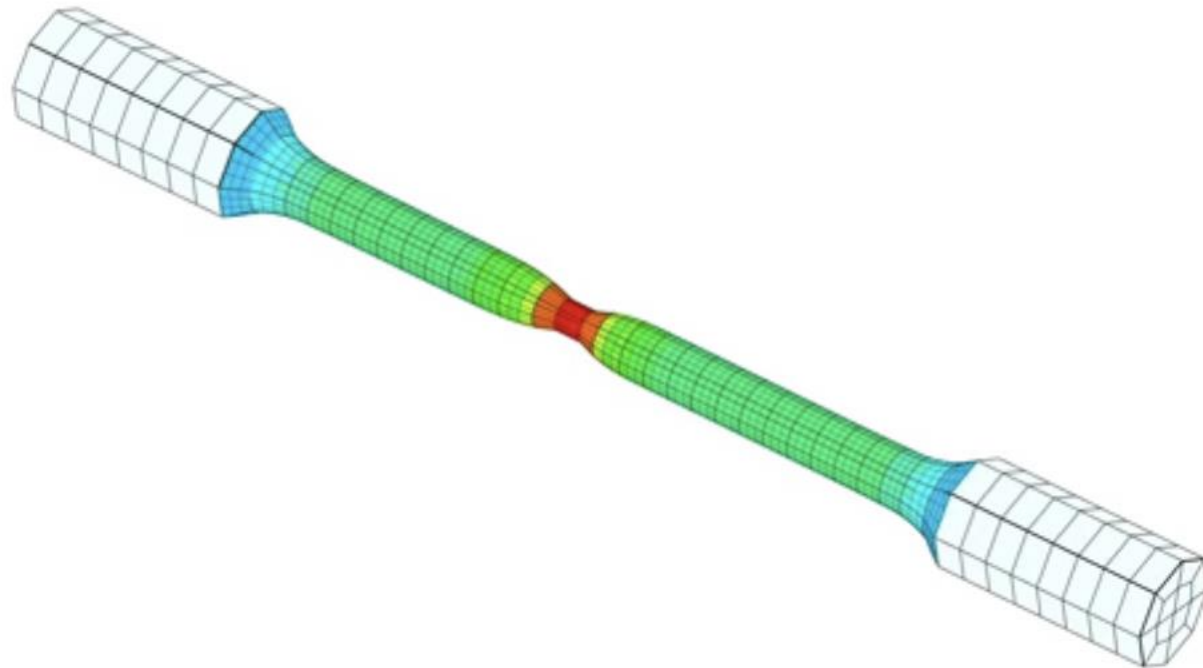
Será que isso realmente ocorre?

O Ensaio de Tração

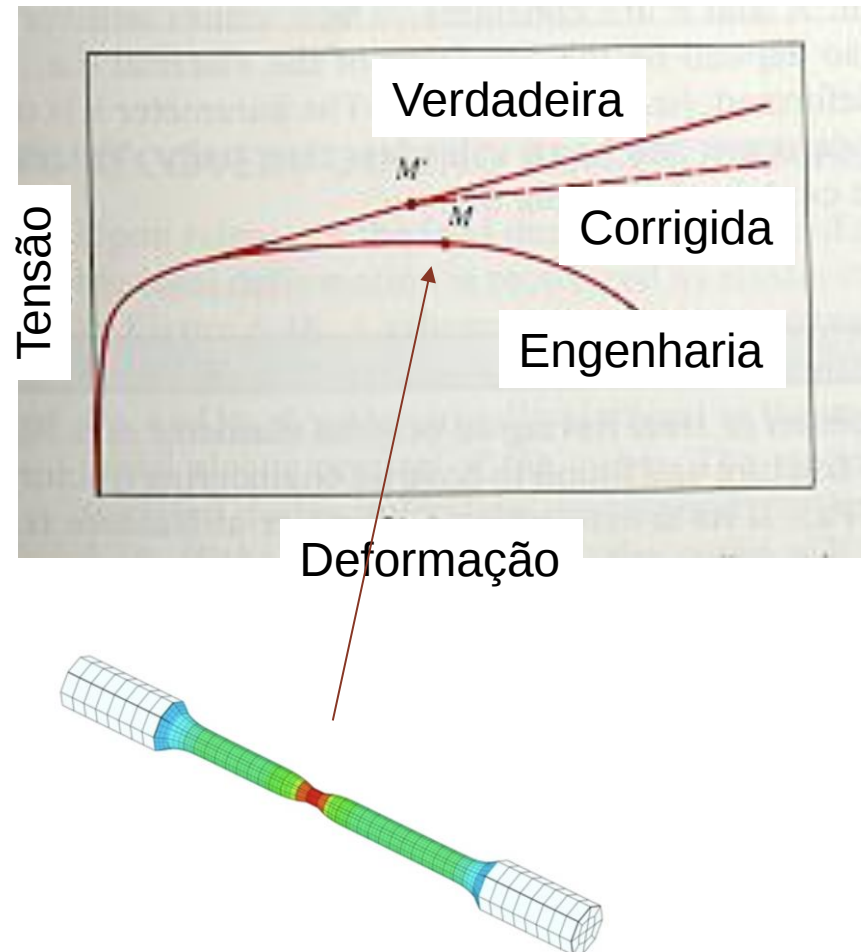


O Ensaio de Tração

- Na verdade, quando o empescoçamento ocorre, localmente, a tensão continua a subir

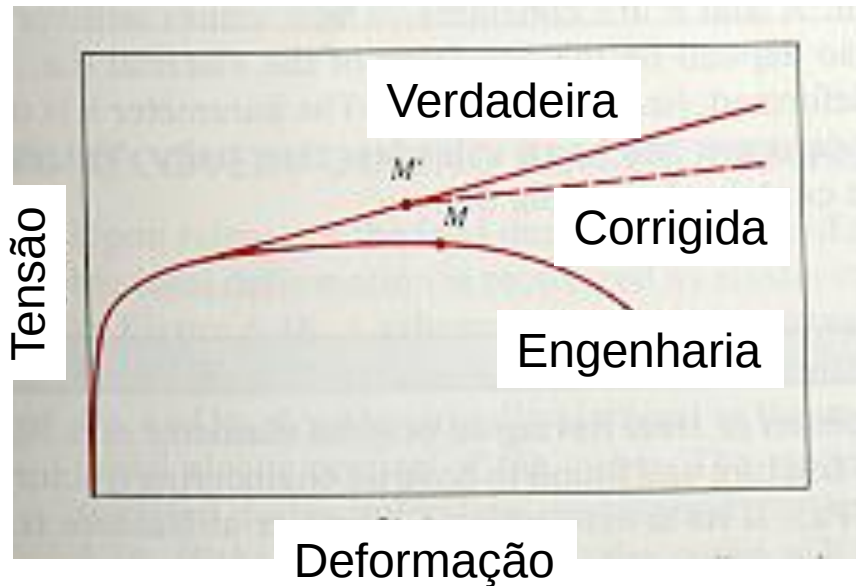


Tensão Verdadeira e Deformação Verdadeira



- Curva tensão de engenharia - deformação de engenharia
 - A partir do ponto M - tensão cai
 - Induz o pensamento que o material está ficando mais fraco
 - Não é verdade, o material está ficando mais resistente!
- A tensão de engenharia considera em toda a curva **a área inicial do corpo-de-prova**
 - Ela não é mantida constante
 - Após o ponto M, reduz-se rapidamente na região do pescoço
- Algumas vezes, faz mais sentido utilizar um esquema baseado na tensão verdadeira-deformação verdadeira.

Tensão Verdadeira e Deformação Verdadeira



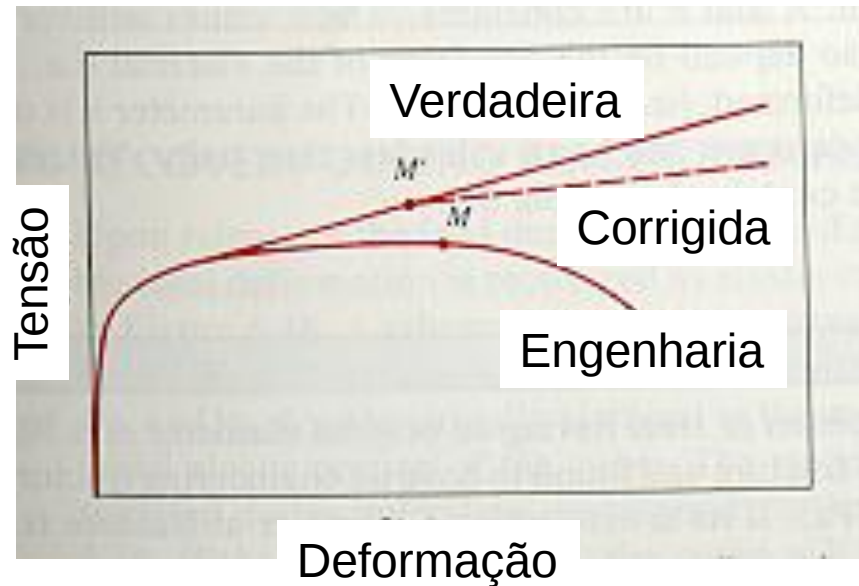
- Tensão verdadeira:

$$\sigma_v = \frac{F}{A_i}$$

- Deformação verdadeira:

$$\epsilon_v = \ln \frac{l_i}{l_0}$$

Tensão Verdadeira e Deformação Verdadeira



- Se não ocorre variação de volume durante a deformação:

$$A_i l_i = A_0 l_0$$

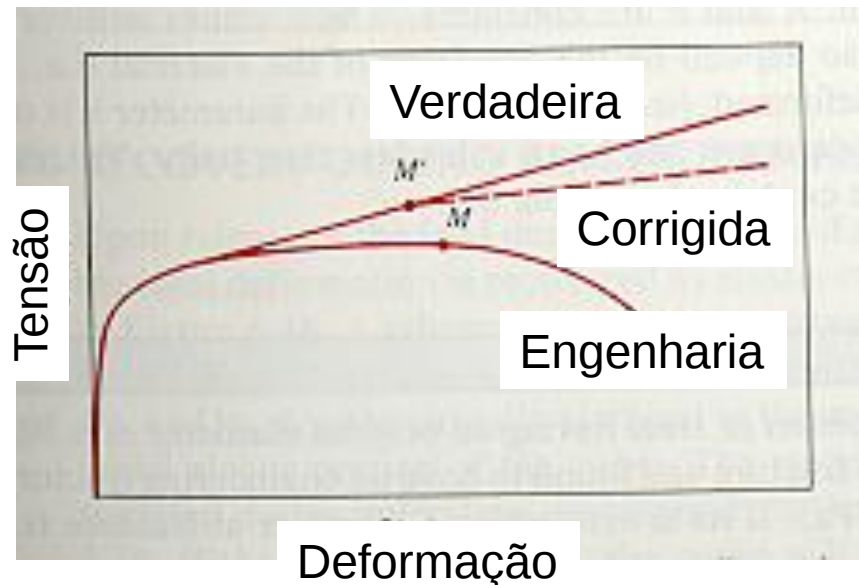
- Com base nisso, as tensões e deformações verdadeiras são relacionadas de acordo com as expressões:

$$\sigma_v = \sigma(1 + \varepsilon)$$

$$\epsilon_v = \ln(1 + \varepsilon)$$

- A relação acima é válida apenas até o ponto M, pois acima desta, por causa do empescoamento, a deformação passa a ocorrer em somente um local da amostra

Relação Tensão-Deformação no Regime Plástico



- Para alguns metais e ligas (eq. de Hollomon):

$$\sigma_v = k\epsilon_v^n$$

Onde K e n são constantes .

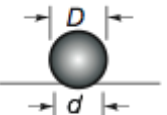
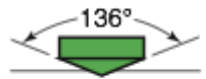
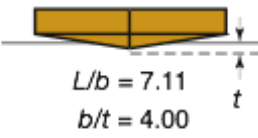
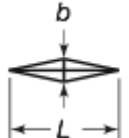
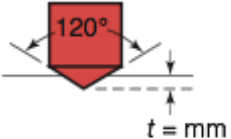
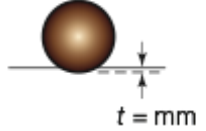
- Válido do início da deformação plástica até o de início do pescoço
- O parâmetro n é o **coeficiente de encruamento** e possui valor entre 0 e 1. O coeficiente de encruamento é uma medida da capacidade do material encruar (ou seja, a capacidade do material aumenta sua resistência quando deformado).

Relação Tensão-Deformação no Regime Plástico

$$\sigma_v = k\epsilon_v^n$$

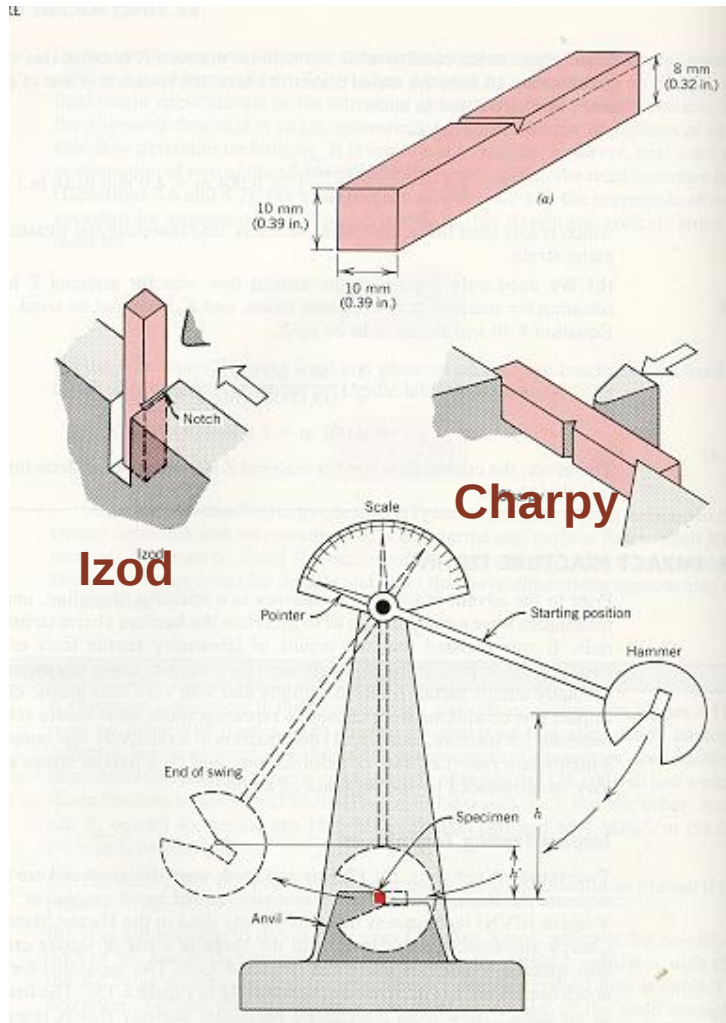
<i>Material</i>	<i>n</i>	<i>K</i>	
		<i>MPa</i>	<i>psi</i>
Low-carbon steel (annealed)	0.21	600	87,000
4340 steel alloy (tempered @ 315°C)	0.12	2650	385,000
304 stainless steel (annealed)	0.44	1400	205,000
Copper (annealed)	0.44	530	76,500
Naval brass (annealed)	0.21	585	85,000
2024 aluminum alloy (heat-treated—T3)	0.17	780	113,000
AZ-31B magnesium alloy (annealed)	0.16	450	66,000

Ensaio de Dureza

Test	Indenter	Shape of indentation		Load, P	Hardness number
		Side view	Top view		
Brinell	10-mm steel or tungsten carbide ball			500 kg 1500 kg 3000 kg	$HB = \frac{2P}{(\pi D)(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Diamond pyramid			1-120 kg	$HV = \frac{1.854P}{L^2}$
Knoop	Diamond pyramid			25 g-5 kg	$HK = \frac{14.2P}{L^2}$
Rockwell					
A } C } D }	Diamond cone			60 kg 150 kg 100 kg	$\left. \begin{matrix} HRA \\ HRC \\ HRD \end{matrix} \right\} = 100 - 500t$
B } F } G }	$\frac{1}{16}$ -in. diameter steel ball			100 kg 60 kg 150 kg	$\left. \begin{matrix} HRB \\ HRF \\ HRG \end{matrix} \right\} = 130 - 500t$
E	$\frac{1}{8}$ -in. diameter steel ball			100 kg	HRE

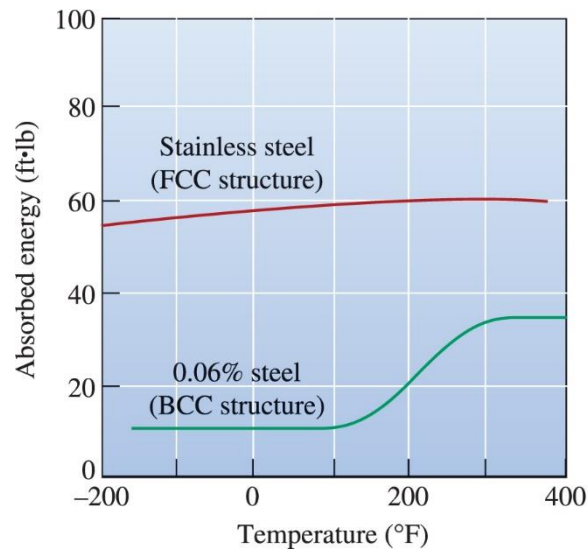
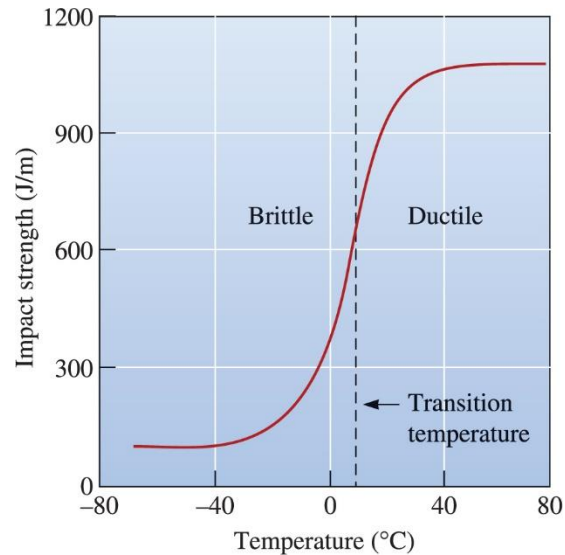
- Uma propriedade mecânica importante é a **dureza**, que consiste em uma medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada (por exemplo, uma pequena impressão ou riscos).
- Os ensaios consistem na penetração de um pequeno indentador contra a superfície do material a ser testado, sob condições controladas de carga e taxa de aplicação, a profundidade ou o tamanho da impressão resultante é medida, a qual é relacionada a um número índice de dureza.
- Ensaio não-destrutivo, simples e barato.

Ensaio de Impacto



- Dois ensaios padrões o **Charpy** e o **Izod**.
- São utilizados para medir a **energia de impacto**, algumas vezes chamada de **tenacidade ao entalhe**.
- Nos dois ensaios, o corpo-de-prova possui o formato de uma barra com seção reta quadrada , na qual é usinada um entalhe na em forma de “V”.
- A carga é aplicada por meio de um martelo de pêndulo balanceado, na forma de um impacto instantâneo.
- A absorção de energia (em **J**) é calculada com base na diferença de altura do martelo quando solto e na altura que ele chega após o impacto. Está relacionado a **tenacidade** do material.
- Os resultados dos ensaios de impacto são de natureza **qualitativa**.

Ensaio de Impacto



- Uma das principais funções dos ensaios **Charpy** e **Izod** é determinar se um material experimenta ou não uma **transição de dútil para frágil** com a diminuição da temperatura e, se esse for o caso, das faixas de temperatura ao longo das quais isso acontece.
- Os metais com estrutura cristalina **CFC** e a maioria dos metais com estrutura **HC** **não** experimentam **transição dútil-frágil**.
- A transição dútil-frágil é tipicamente experimentada em metais com estrutura cristalina **CCC**.