



Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia de Materiais

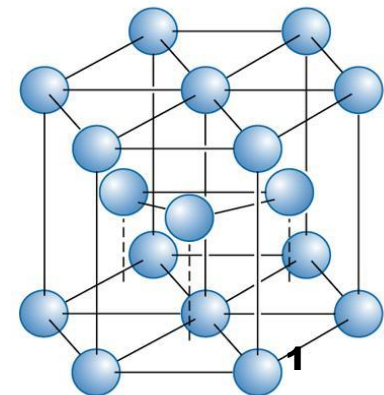


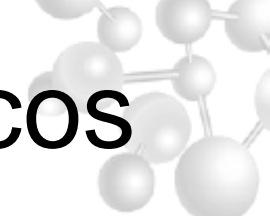
Ensaaios Mecânicos dos Materiais

Engenharia e Ciência dos Materiais I

Prof. Dr. Cassius O. F. T. Ruckert

Revisado por Prof. Dr. Eduardo Bellini Ferreira





Classificação dos ensaios mecânicos

- 1. Quanto à integridade:
 - i) **Destrutivos**: provocam inutilização parcial ou total da peça:
 - Tração, Dureza, Fadiga, Fluência, Torção, Flexão, Impacto, Tenacidade à Fratura
 - ii) **Não-destrutivos**: não comprometem a integridade da peça:
 - Raios-X, Raios γ , Ultrassom, Partículas Magnéticas, Líquidos Penetrantes, Microdureza, Tomografia

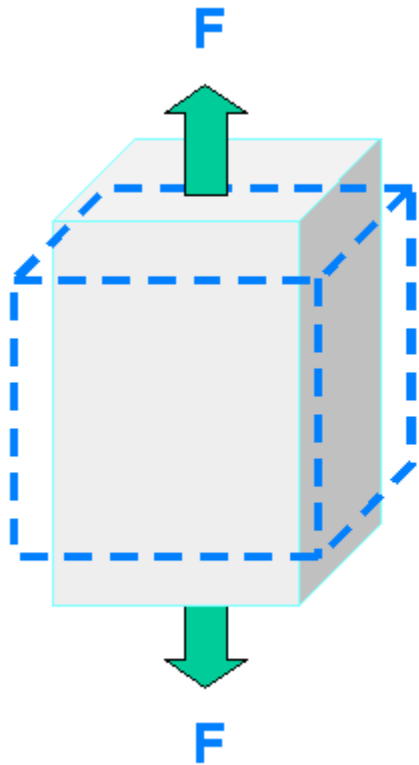
- 2. Quanto à velocidade:
 - i) **Estáticos**: carga aplicada lenta (estados de equilíbrio)
 - Tração, Compressão, Flexão, Dureza e Torção
 - ii) **Dinâmicos**: carga aplicada rapidamente ou ciclicamente:
 - Fadiga e Impacto
 - iii) **Carga Constante**: carga aplicada durante um longo período:
 - Fluência



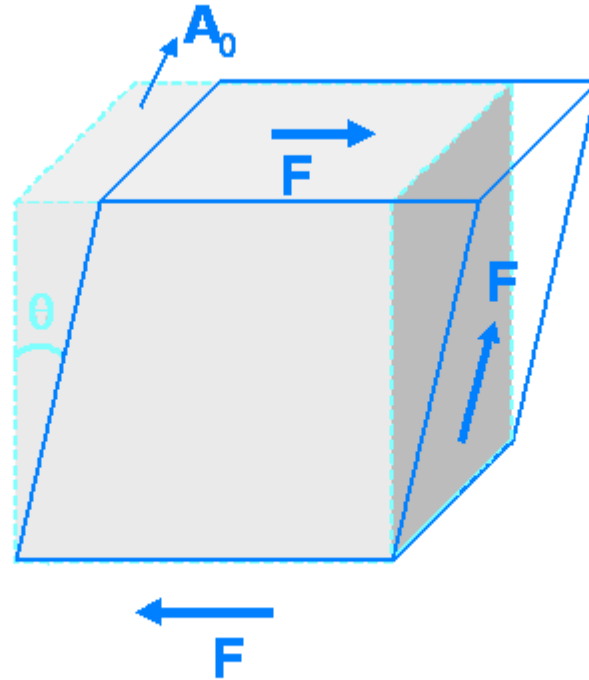
Propriedades Mecânicas de Metais

- Metais são muito utilizados em aplicações estruturais (suportam a carga da estrutura)
- O conhecimento de suas propriedades mecânicas é fundamental
- Um grande número de propriedades pode ser derivado de um único tipo de experimento, o ensaio de tração
- Neste tipo de ensaio um material é tracionado e se **deforma** até fraturar. Mede-se o valor da **força** e do **alongamento** a cada instante e gera-se uma curva tensão-deformação

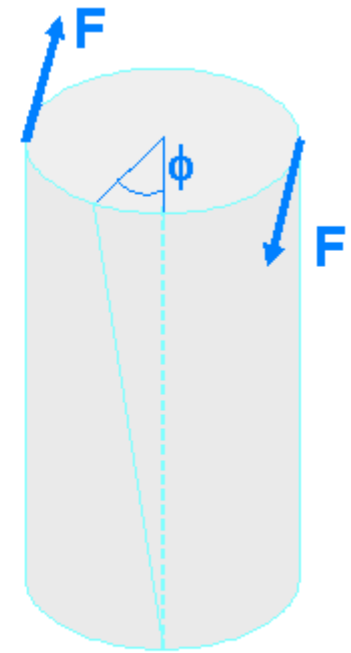
TIPOS DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES QUE UMA ESTRUTURA ESTA SUJEITA



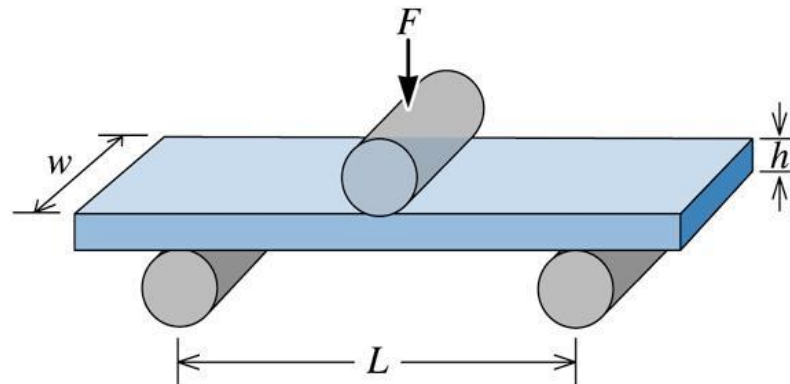
TRAÇÃO
ou
Compressão
se a carga for
aplicada no
sentido
inverso



CISALHAMENTO

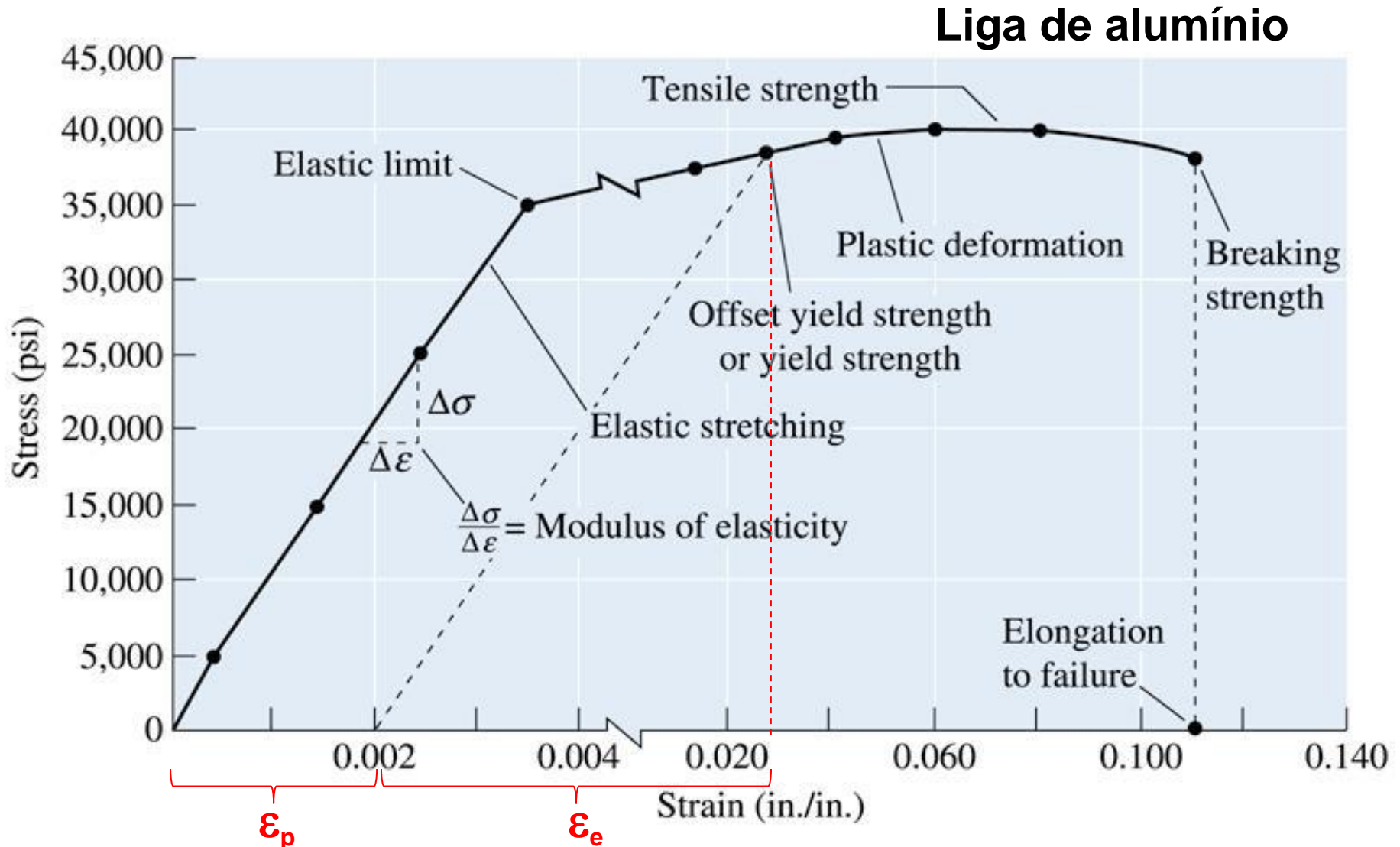


TORÇÃO



Flexão

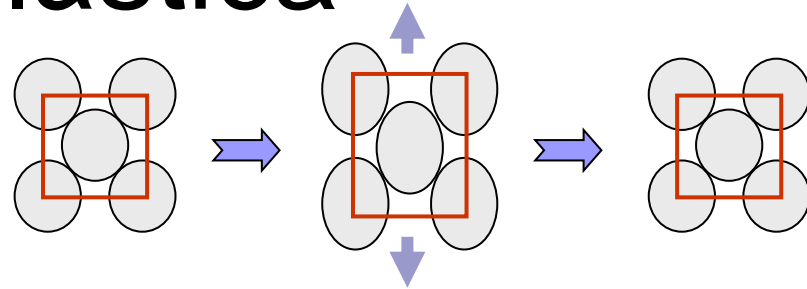
Curva Típica $\sigma \times \varepsilon$ (tração)



Deformação Elástica

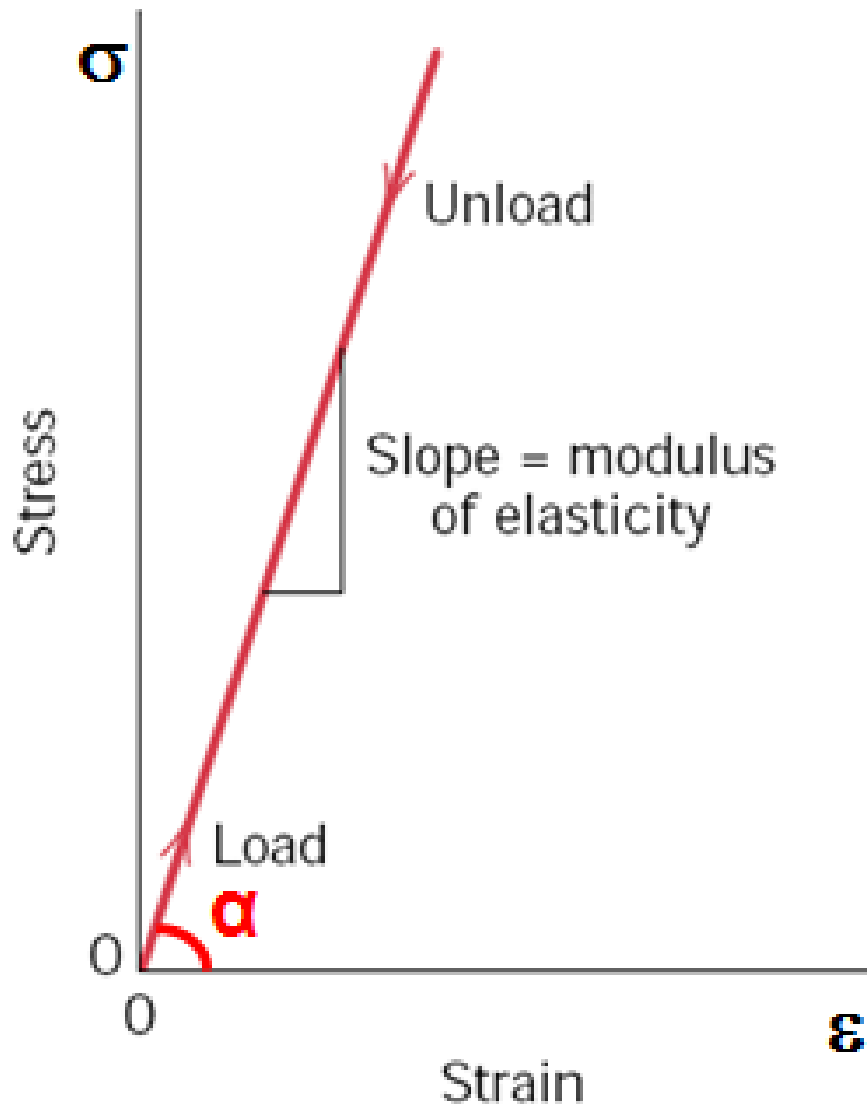
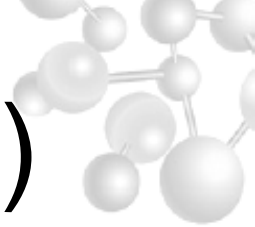


Características Principais:



- A deformação elástica é resultado de um pequeno alongamento ou contração das células cristalinas na direção da tensão aplicada: tração ou compressão (os átomos podem se deformar ou se afastar um pouco uns dos outros)
- A deformação não é permanente, o que significa que quando a carga é liberada, a peça retorna à sua forma original
- Enquanto tensão e deformação são proporcionais, o material obedece a **lei de Hooke** $\rightarrow \sigma = E \cdot \varepsilon$ (lembrar, para mola: $F = K \cdot X$)
- A curva tensão versus deformação é linear. A inclinação da reta resultante corresponde ao **módulo de elasticidade: E**

Módulo de Elasticidade (E)



$$\sigma = E \varepsilon$$

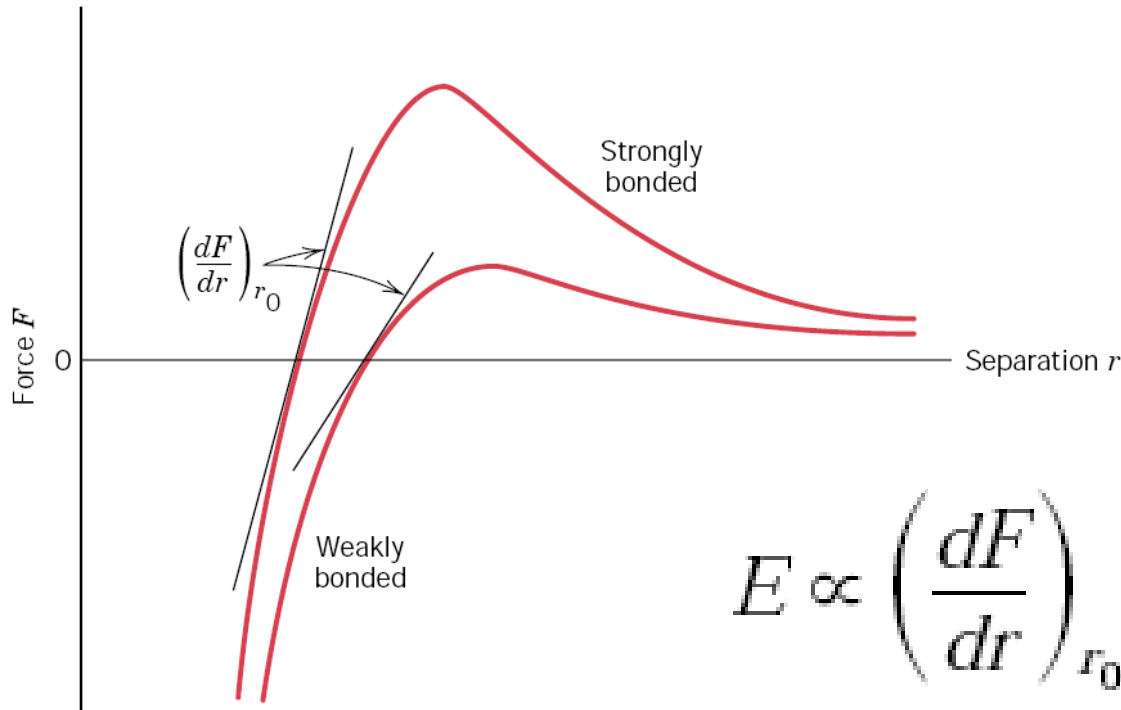
$$tg(\alpha) = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = E$$

E = módulo de elasticidade
ou Young (GPa)

σ = tensão (MPa)

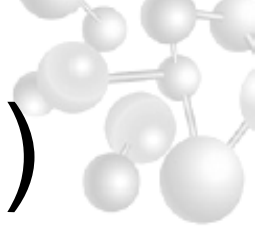
ε = deformação (mm/mm)

Módulo de Elasticidade (E)



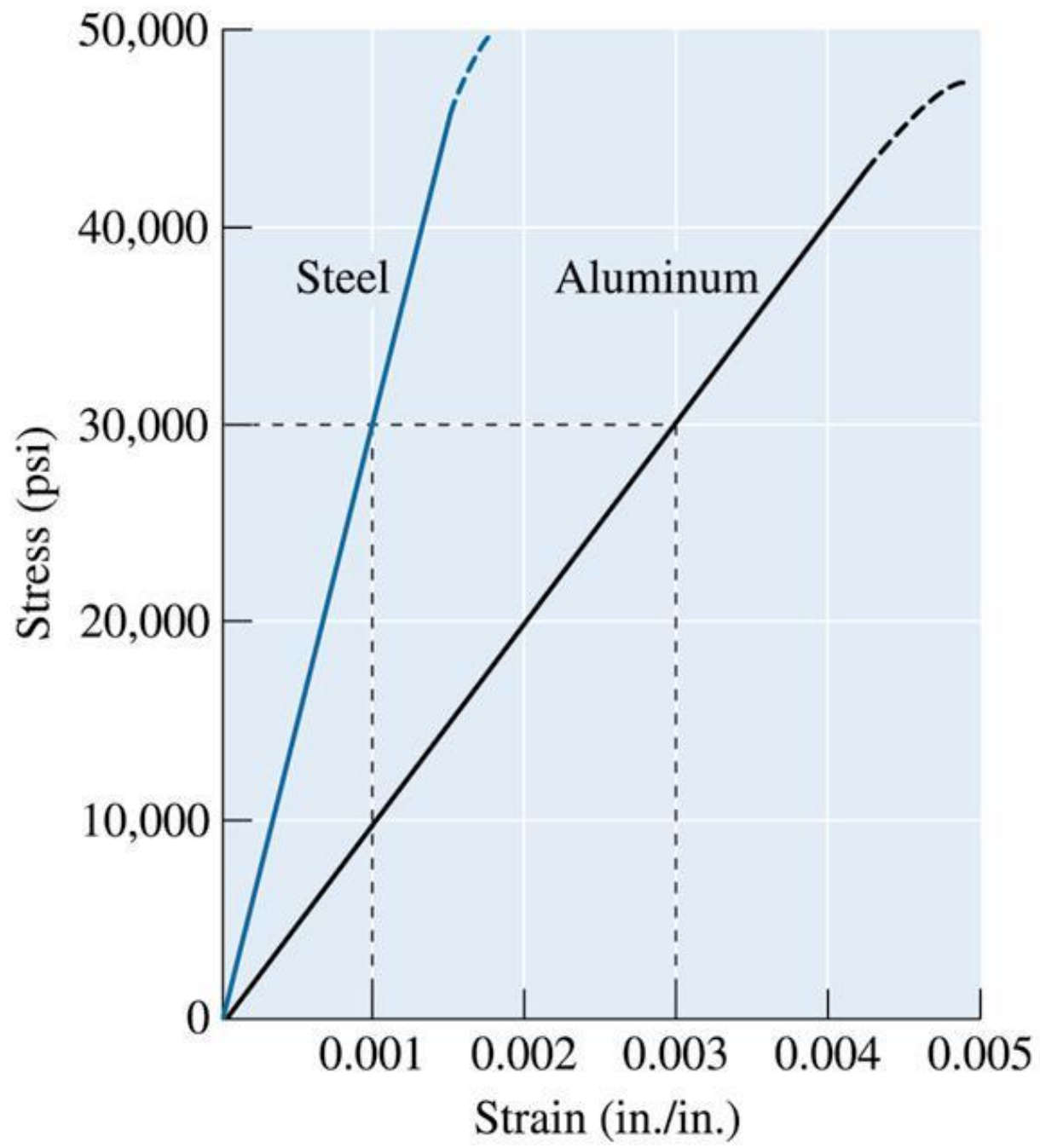
- Proporcional à inclinação da curva *força de ligação vs. distância interatômica* na posição de equilíbrio r_0

Módulo de Elasticidade (E)



Principais características:

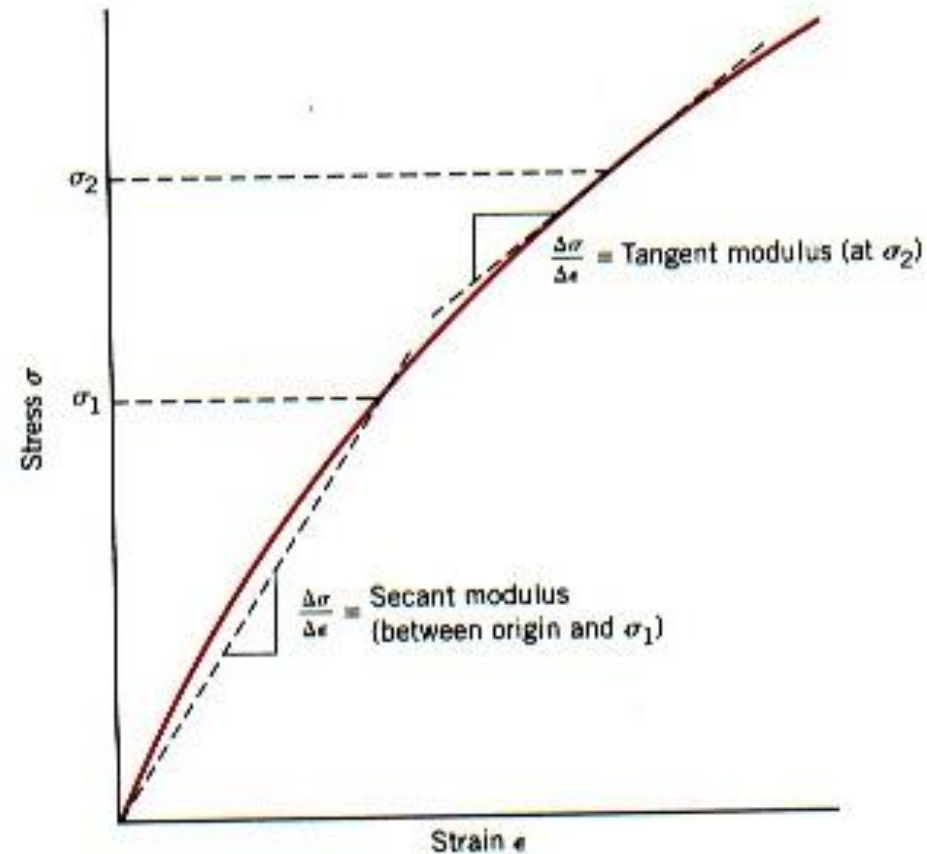
- Quanto maior o módulo elástico, mais rígido é o material ou menor será a deformação elástica para uma mesma carga aplicada;
- O módulo do aço (≈ 200 GPa) é cerca de 3 vezes maior que o de ligas de alumínio (≈ 70 GPa).
- O módulo de elasticidade corresponde à ***rigidez*** ou uma ***resistência*** do material à deformação elástica.
- O módulo de elasticidade está ligado diretamente às forças das ligações interatômicas.



Comportamento não-linear



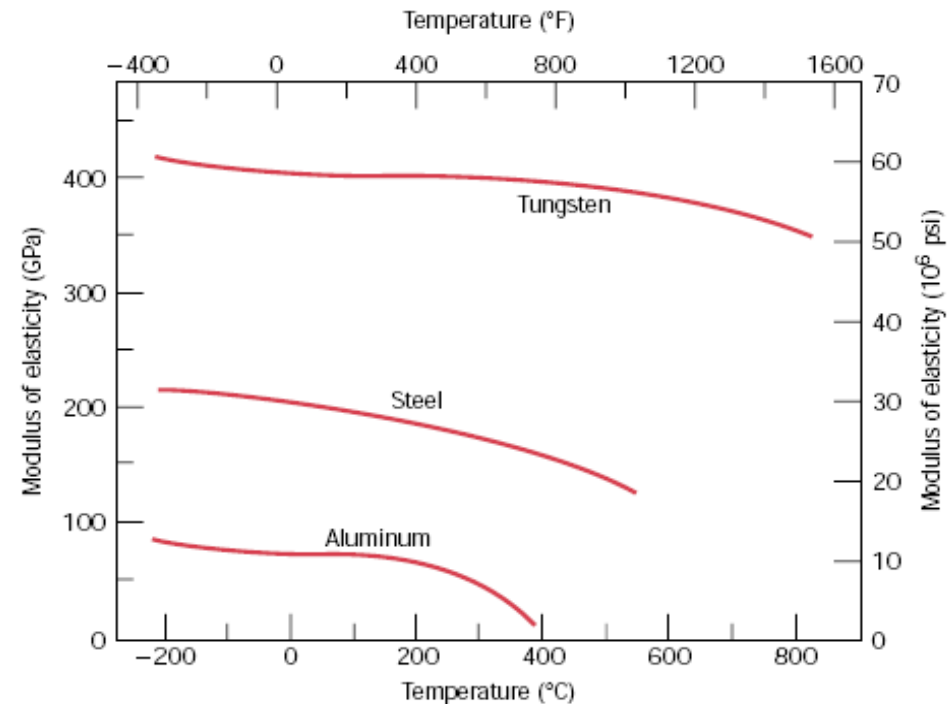
- Alguns metais (ex.: ferro fundido cinzento), concreto e muitos polímeros apresentam um comportamento não linear na parte elástica da curva tensão x deformação



Módulo de Elasticidade



- O módulo de elasticidade é dependente da temperatura
- E tende a diminuir com o aumento da temperatura



Valores típicos dos módulos de elasticidade a diferentes temperaturas.

	Módulo de Elasticidade, GPa.				
Material	20°C	205°C	427°C	538°C	649°C
Aço carbono	210	190	158	137	127
Ligas de Ti	116	98	75	71	
Ligas de Al	74	67	55		

Material

MÓDULO DE ELASTICIDADE OU YOUNG (E)

* Polímero termoplástico

** Polímero termofixo

*** Compósitos

GPa

10⁶ Psi

Polietileno alto peso molecular *

0,7

0,1

Resina Epóxi **

3,5

0,5

Acrílicos

3,5

0,5

Epóxi reforçado com fibra vidro ***

40

5,8

Magnésio

45

6,5

Alumínio

70

10

Latão

97

14

Titânio

107

15,5

Cobre

110

16

Níquel

207

30

Aço

207

30

Compostos grafite/epóxi ***

280

40,7

Tungstênio

407

59

Deformação Plástica



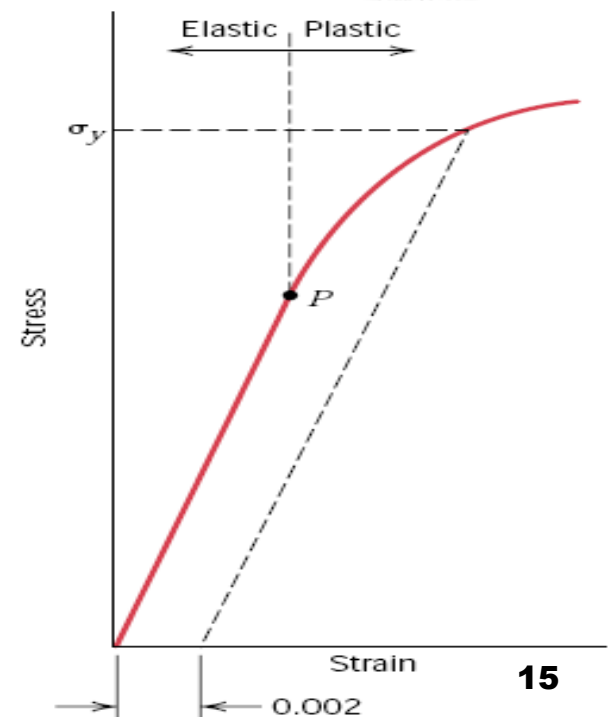
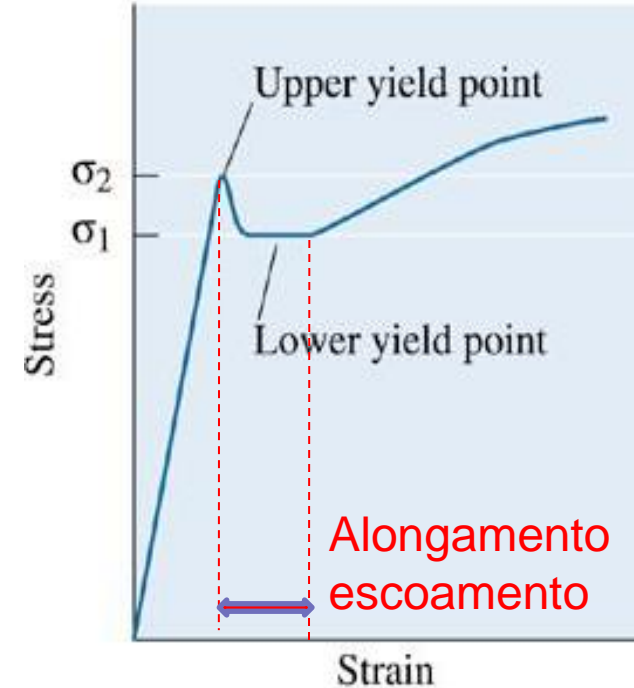
- Para a maioria dos materiais metálicos, o regime elástico persiste apenas até deformações de aproximadamente 0,2 a 0,5%.
- Além desse ponto a tensão não é mais proporcional à deformação (lei de Hooke) e ocorre uma deformação permanente não recuperável denominada deformação plástica;
- A deformação plástica resulta da quebra de ligações entre átomos; e formação de novas ligações em seguida;
- A deformação plástica ocorre mediante um processo de escorregamento (cisalhamento) de planos cristalinos uns sobre os outros na estrutura, através do movimento de discordâncias.

Limite de proporcionalidade e Tensão limite de escoamento

➤ O limite de proporcionalidade pode ser determinado como o ponto onde ocorre o afastamento da linearidade na curva tensão – deformação (**ponto P**).

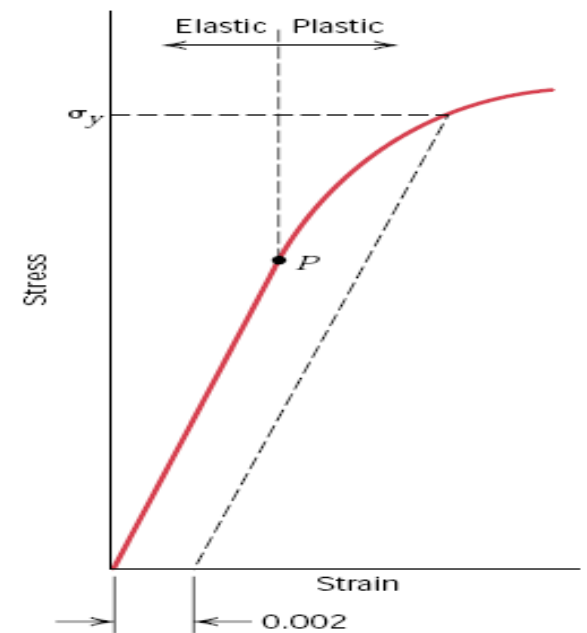
➤ A posição deste ponto pode não ser determinada com precisão. Por conseqüência é adotada uma convenção: uma linha reta é construída paralela à região elástica a partir de uma deformação de 0,002 ou 0,2%.

➤ A intersecção desta linha com a curva tensão – deformação é a **tensão limite de escoamento (σ_y)**



Limite de Escoamento

Quando não se observa nitidamente o fenômeno de escoamento, a tensão de escoamento corresponde à tensão necessária para promover **uma deformação permanente de 0,2% ou outro valor especificado** (Ver gráfico ao lado)



Quando não nítido, utiliza-se da convenção de um deformação padrão

Metais e ligas em geral : $n = 0,2 \%$ ($\epsilon = 0,002$)

Cobre e suas ligas: $n = 0,5 \%$ ($\epsilon = 0,005$)

Ligas metálicas duras: $n = 0,1 \%$ ($\epsilon = 0,001$)

Cerâmicos : $n = 0,1 \%$ ($\epsilon = 0,001$)

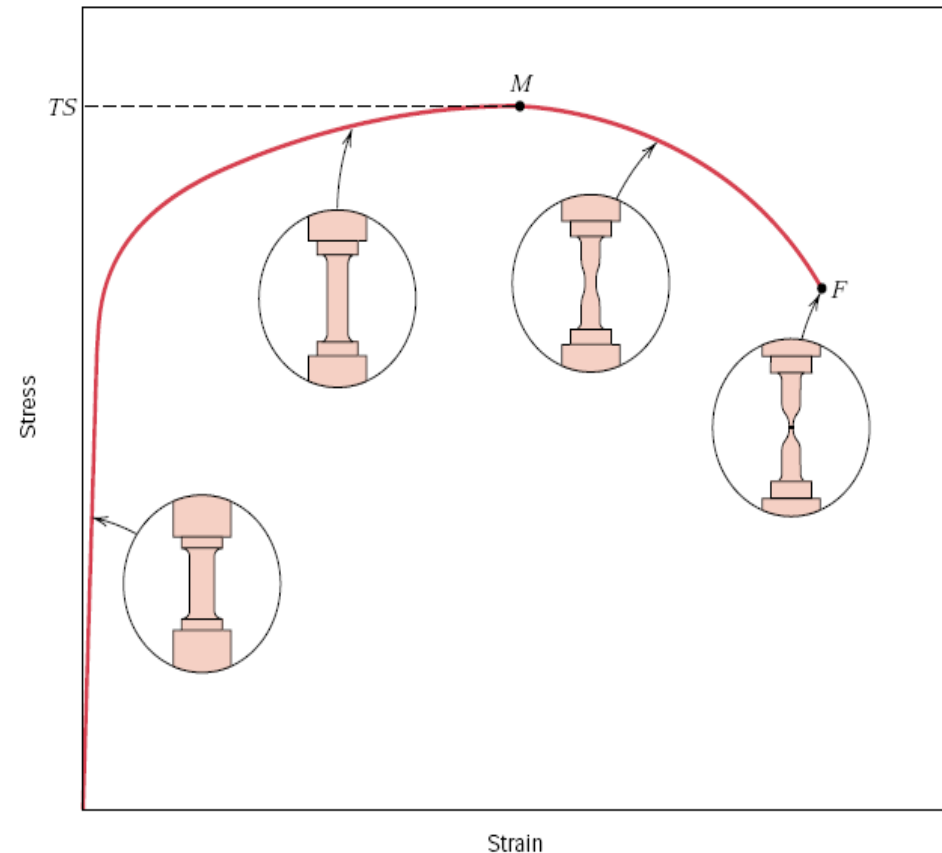
Polímeros: $n = 0,5 \%$ ($\epsilon = 0,005$)

Limite de resistência à tração



➤ Após o escoamento, a tensão necessária para continuar a deformação plástica aumenta até um valor máximo (**ponto M**) e então diminui até a fratura do material;

➤ Para um material de alta capacidade de deformação plástica, o diâmetro do CP decresce rapidamente ao ultrapassar o ponto M e assim a carga necessária para continuar a deformação diminui até a ruptura.



O limite de resistência à tração é a tensão no ponto máximo da curva tensão-deformação. É a máxima tensão que pode ser sustentada por uma estrutura que se encontra sob tração (**ponto M**).

Ductilidade



Definição: é uma medida da magnitude da deformação plástica que ocorre até a fratura

Ductilidade pode ser definida como:

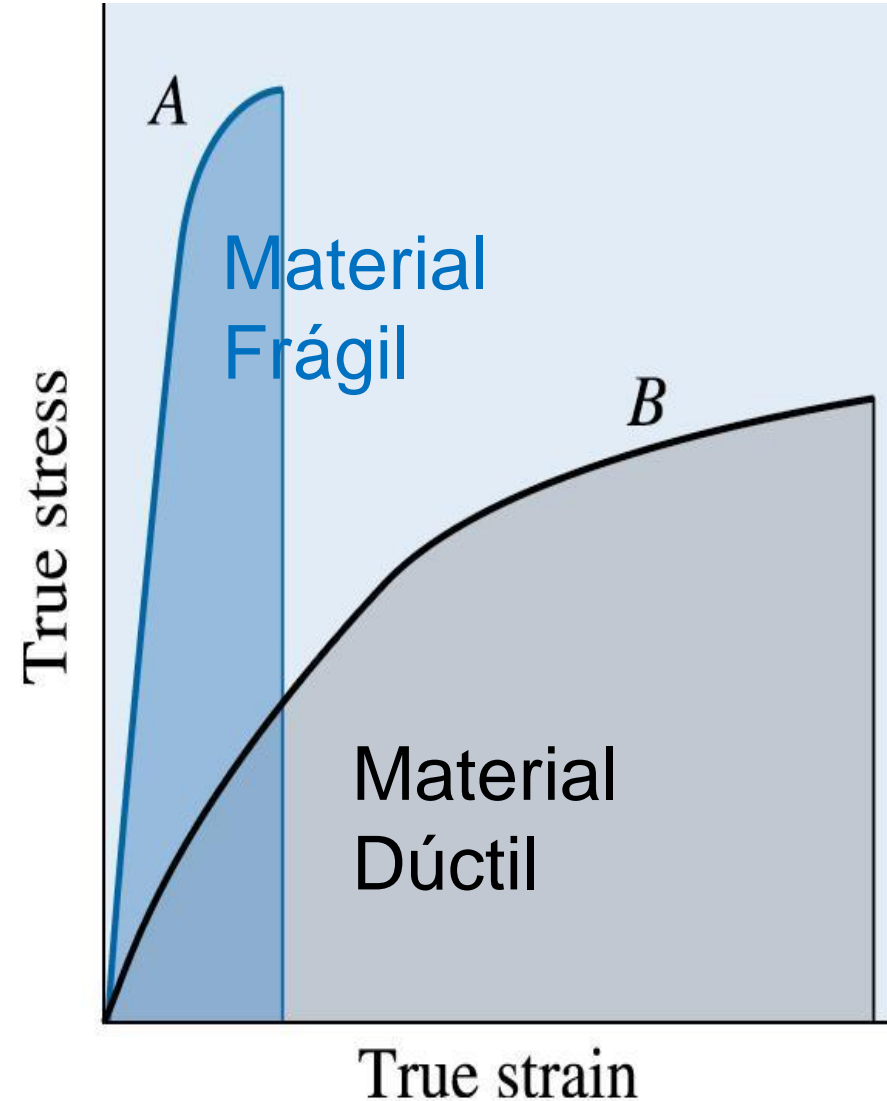
- Alongamento percentual $\%AL = 100 \times (L_f - L_0)/L_0$
 - onde L_f é o alongamento do CP na fratura
 - uma fração substancial da deformação se concentra na estrição, o que faz com que $\%AL$ dependa do comprimento do corpo de prova. Assim o valor de L_0 deve ser citado.

- Redução de área percentual $\%RA = 100 \times (A_0 - A_f)/A_0$
 - onde A_0 e A_f se referem à área da seção reta original e na fratura, respectivamente.
 - Independente de A_0 e L_0 e em geral é \neq de $AL\%$

Tenacidade



- Representa uma medida da habilidade de um material em absorver energia até a fratura;
- Pode ser determinada a partir da área sob a curva $\sigma \times \epsilon$;
- Para que um material seja muito tenaz, deve apresentar simultaneamente alta resistência e alta ductilidade.
- Materiais dúcteis são em geral mais tenazes que os frágeis.



Resiliência



É a capacidade de um material absorver energia sob tração quando ele é deformado elasticamente e devolvê-la quando relaxado (recuperar);

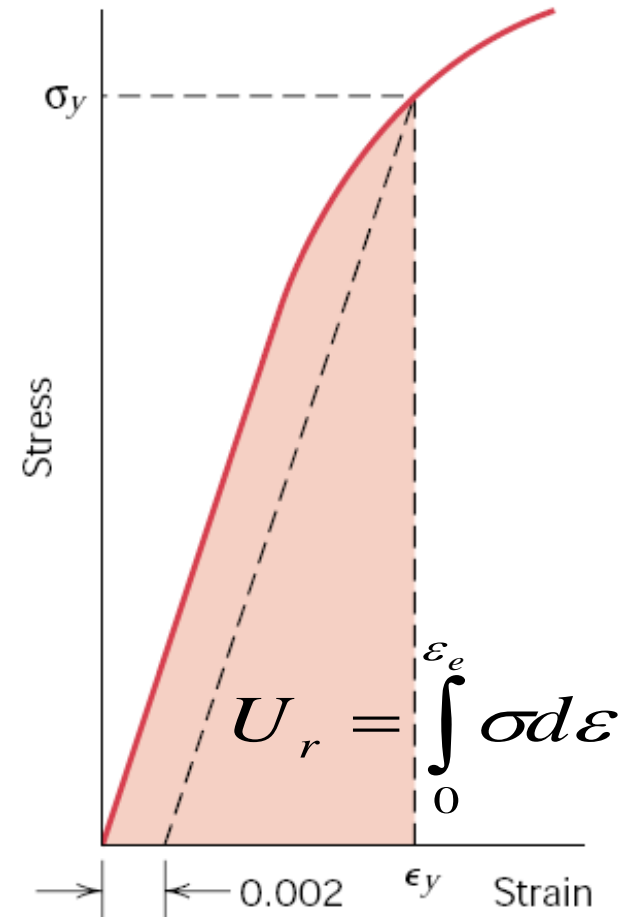
✓ O módulo de resiliência é dado pela área da curva tensão-deformação até o escoamento:

✓ Na região linear:

$$U_r = \sigma_y \epsilon_y / 2 = \sigma_y (\sigma_y / E) / 2 = \sigma_y^2 / 2E$$

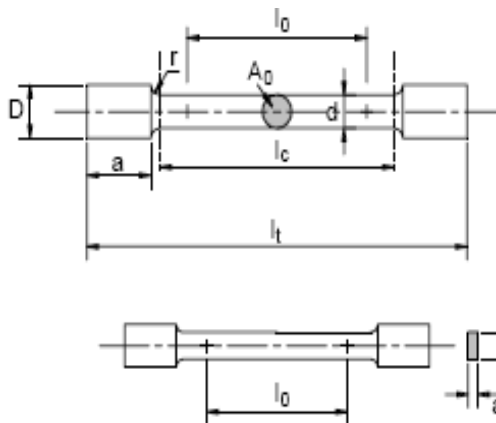
Ou seja, materiais de alta resiliência possuem alto limite de escoamento e baixo módulo de elasticidade.

Estes materiais são ideais para uso em molas.

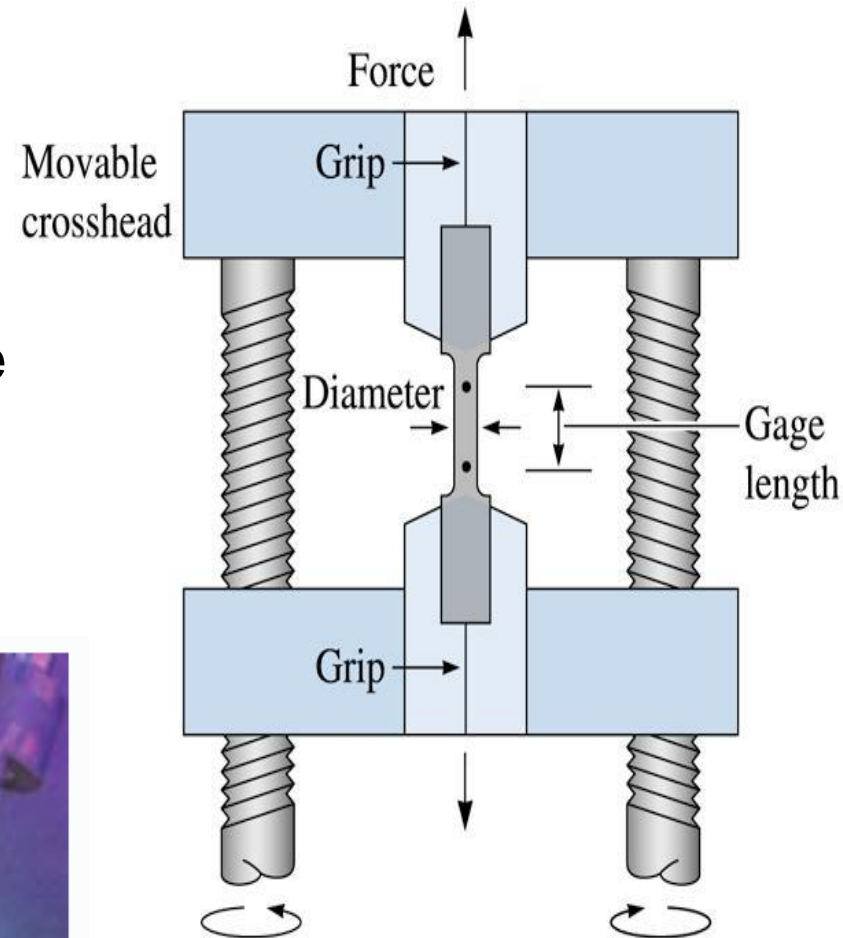


Ensaio de tração uniaxial

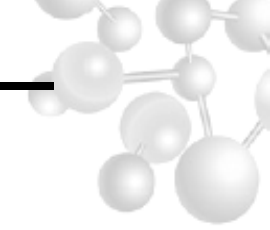
- O ensaio de tração consiste na aplicação de carga uniaxial crescente até a ruptura. Mede-se a variação do comprimento do CP como função da carga, resultando em dados quantitativos das características mecânicas dos materiais;
- Os corpos de prova (CP) geralmente possuem seção transversal circular ou retangular com proporções geométricas normalizadas.



l_0 - comprimento de referência
 l_c - comprimento da zona calibrada
 l_t - comprimento total



Ensaio de Tração: Curva Tensão – Deformação Convencional



- Tensão Convencional, nominal ou de Engenharia

$$\sigma_C = \frac{P}{A_0}$$

σ_C = tensão

P = carga aplicada

A_0 = seção transversal original

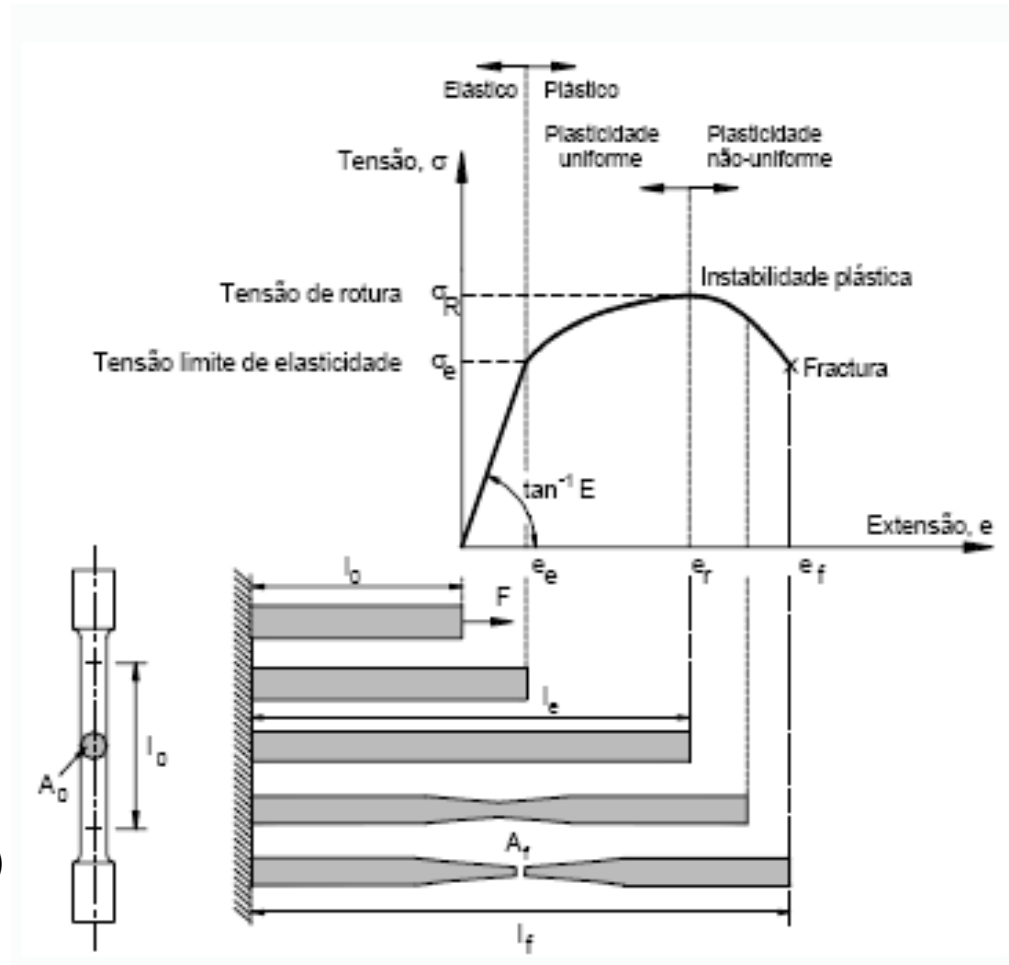
- Deformação Convencional, nominal ou de Engenharia

$$\varepsilon_C = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

ε_C = deformação (adimensional - mm/mm)

l_0 = comprimento inicial de referência (mm)

l = comprimento de referência para cada carga (mm)



Ensaio de Tração

$$1\text{kgf} = 0,454\text{ lb} = 9,807\text{N}$$

Tensão de escoamento

$$1\text{kgf/mm}^2 = 1422\text{ psi} = 9,807\text{ Mpa} = 9,807\text{ N/mm}^2$$

Tensão máxima ou limite de resistência à tração

Tensão de ruptura

TABLE 6-2 ■ *Units and conversion factors*

$$1\text{ pound (lb)} = 4.448\text{ Newtons (N)}$$

$$1\text{ psi} = \text{pounds per square inch}$$

$$1\text{ MPa} = \text{MegaPascal} = \text{MegaNewtons per square meter (MN/m}^2\text{)} \\ = \text{Newtons per square millimeter (N/mm}^2\text{)} = 1,000,000\text{ Pa}$$

$$1\text{ GPa} = 1000\text{ MPa} = \text{GigaPascal}$$

$$1\text{ ksi} = 1000\text{ psi} = 6.895\text{ MPa}$$

$$1\text{ psi} = 0.006895\text{ MPa}$$

$$1\text{ MPa} = 0.145\text{ ksi} = 145\text{ psi}$$

Alongamento

Estricção

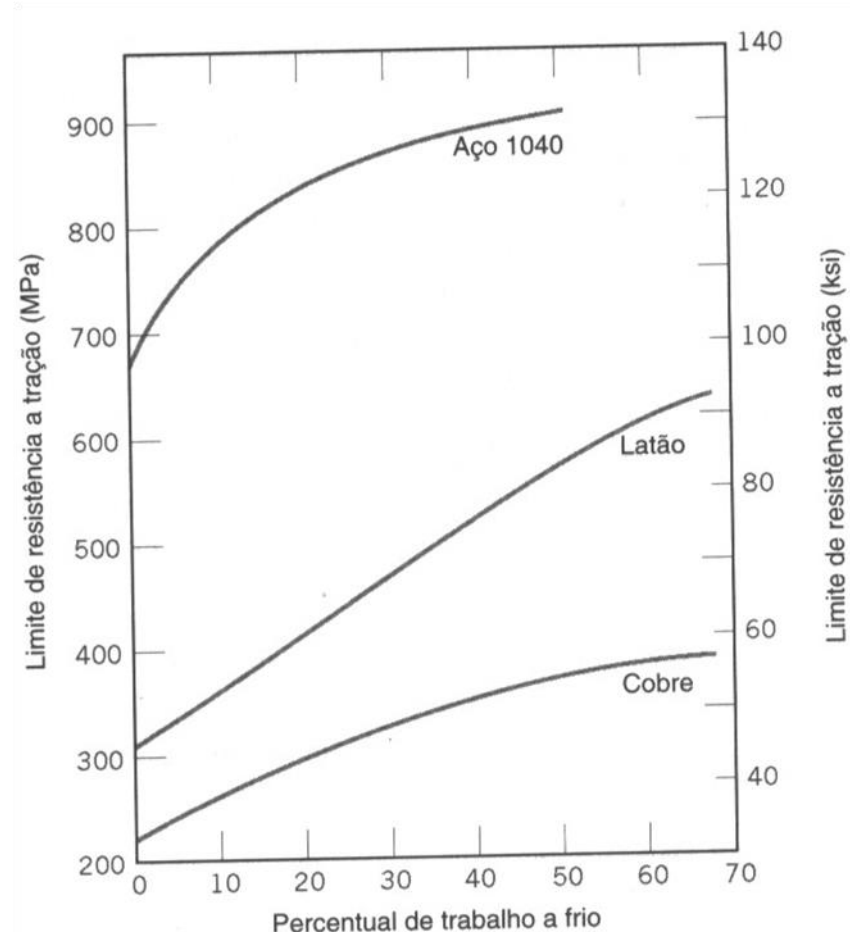
Módulo de elasticidade

Propriedades Mecânicas da metais e ligas

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

Encruamento

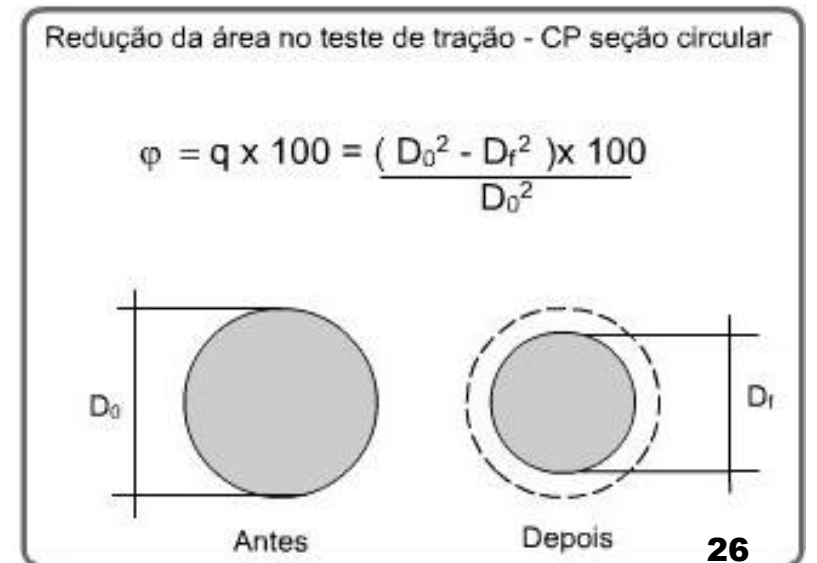
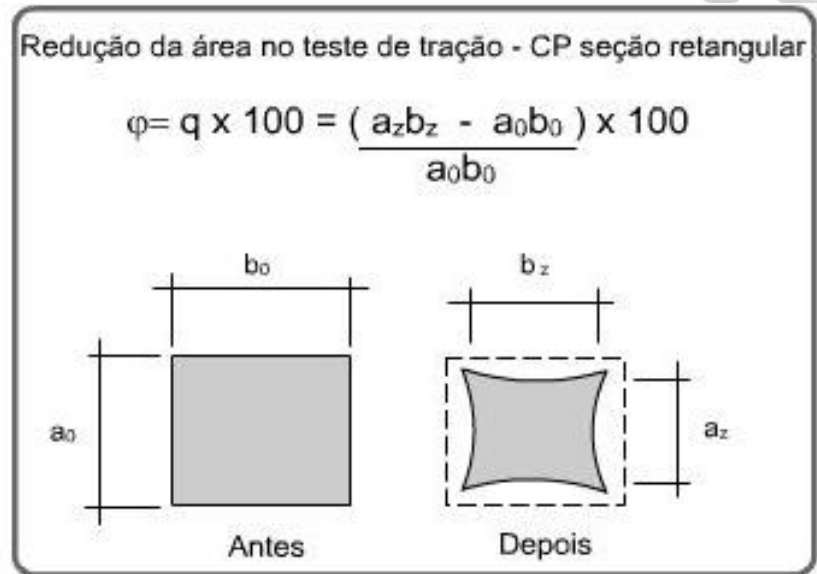
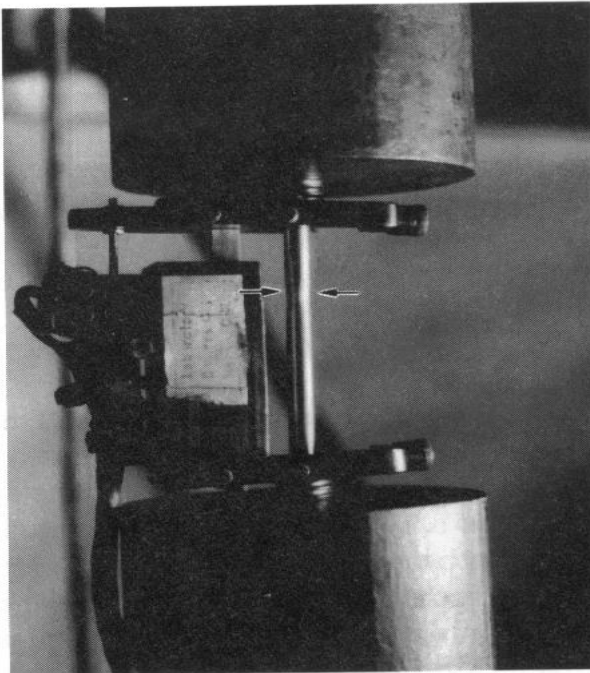
- A partir da tensão de escoamento, o material entra no campo de deformações permanentes, onde ocorre endurecimento por trabalho a frio (**encruamento**);
- Resulta da interação de discordâncias entre si e com obstáculos na microestrutura como solutos, precipitados, poros e contornos de grãos.
- É preciso uma energia cada vez maior para que ocorra essa movimentação.



Empescoçamento ou Estricção



- Região localizada em uma seção reduzida em que grande parte da deformação se concentra;
- Ocorre quando o aumento da dureza por encruamento é menor que a tensão aplicada e o material sofre uma grande deformação.

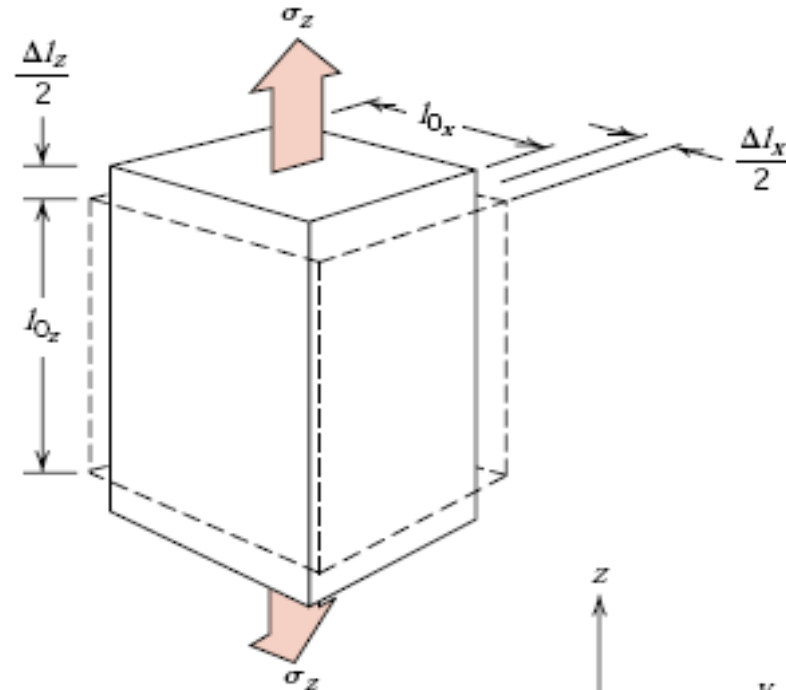


Coeficiente de Poisson

- É o coeficiente que mede a rigidez do material na direção perpendicular à direção da carga de tração uniaxial aplicada.
- No ensaio de tração é o quociente entre a deformação lateral (ϵ_x) e a deformação na direção da tensão (ϵ_z), para materiais isotrópicos:

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

- Para materiais isotrópicos, o módulo de elasticidade está relacionado com o coeficiente de Poisson

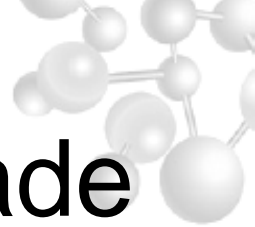


$$\frac{\epsilon_z}{2} = \frac{\Delta l_z/2}{l_{0z}}$$
$$-\frac{\epsilon_x}{2} = \frac{\Delta l_x/2}{l_{0x}}$$

Relação entre G e E:

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

Valores de módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson



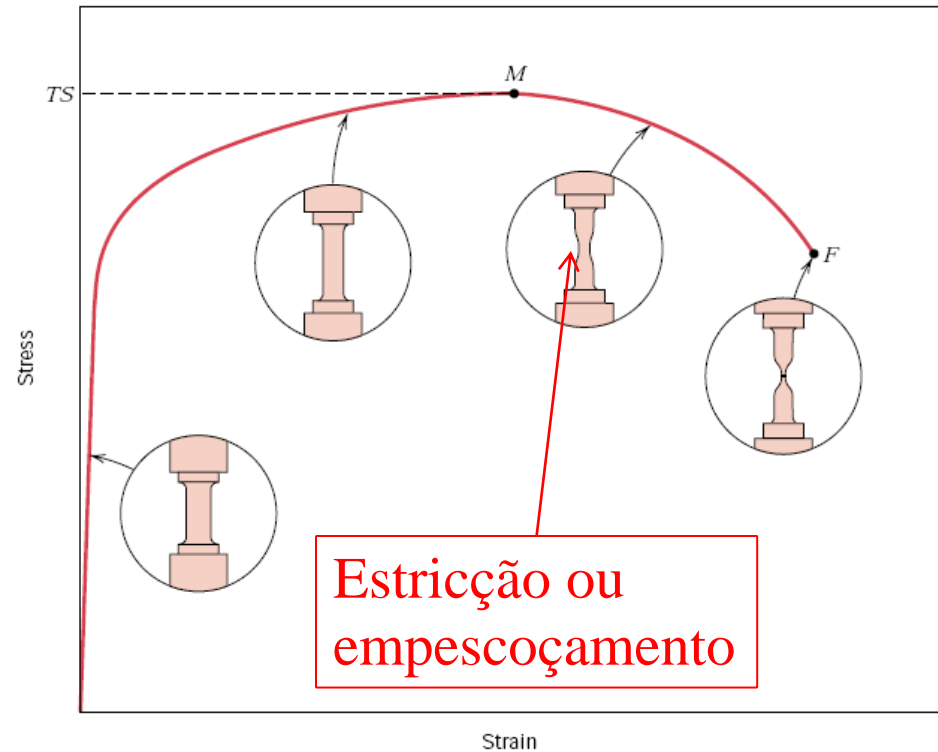
<i>Material</i>	<i>Modulus of Elasticity</i>		<i>Shear Modulus</i>		<i>Poisson's Ratio</i>
	<i>GPa</i>	<i>10⁶ psi</i>	<i>GPa</i>	<i>10⁶ psi</i>	
Metal Alloys					
Tungsten	407	59	160	23.2	0.28
Steel	207	30	83	12.0	0.30
Nickel	207	30	76	11.0	0.31
Titanium	107	15.5	45	6.5	0.34
Copper	110	16	46	6.7	0.34
Brass	97	14	37	5.4	0.34
Aluminum	69	10	25	3.6	0.33
Magnesium	45	6.5	17	2.5	0.35

Normalmente ν varia entre 0,25 a 0,35

Tensão Verdadeira e Deformação Verdadeira



- Na curva tensão-deformação convencional, após o ponto máximo (ponto M) o material aumenta em resistência devido ao encruamento, mas a área da seção reta está diminuindo devido ao empescoçamento;
- Isso resulta em uma redução na capacidade do corpo em suportar carga;
- A tensão calculada nessa carga é baseada na área da seção original e não leva em conta o pescoço.



Tensão Verdadeira e Deformação Verdadeira

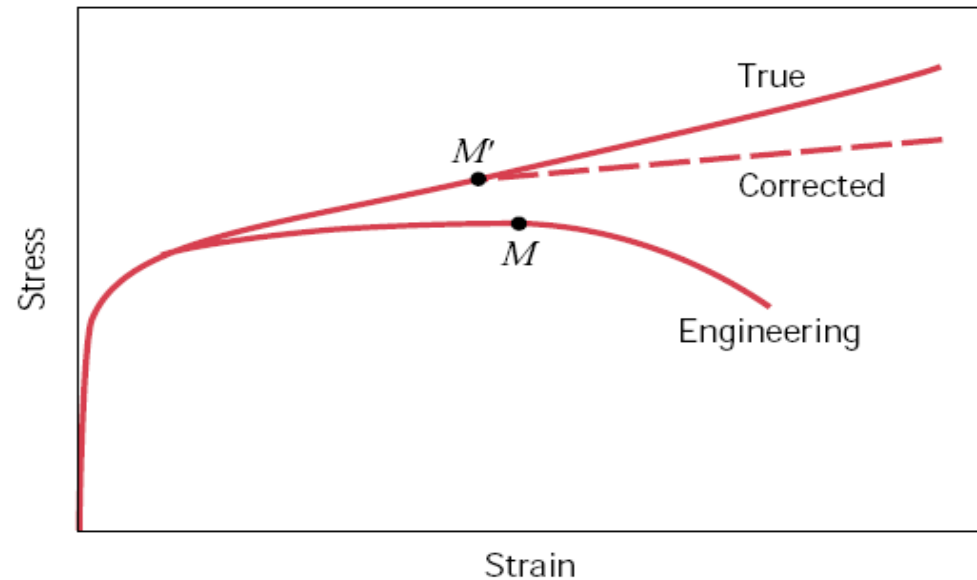


- A Tensão Verdadeira é definida como sendo a carga P dividido sobre a área instantânea, ou seja, área do pescoço após o limite de resistência à tração

$$\sigma_V = \frac{P}{A_i}$$

- A Deformação Verdadeira é definida pela expressão

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



Relações entre Tensões e Deformações Reais e Convencionais



■ Deformação

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta l}{l_o} = \frac{l}{l_o} - 1$$

$$\frac{l}{l_o} = 1 + \varepsilon_c$$

$$\varepsilon_r = \ln \frac{l}{l_o} = \ln(1 + \varepsilon_c)$$

■ Tensão

Volume constante durante o ensaio :

$$A_o \cdot l_o = A \cdot l$$

$$\ln \frac{A_o}{A} = \ln \frac{l}{l_o} = \ln(1 + \varepsilon_c)$$

$$A = \frac{A_o}{1 + \varepsilon_c}$$

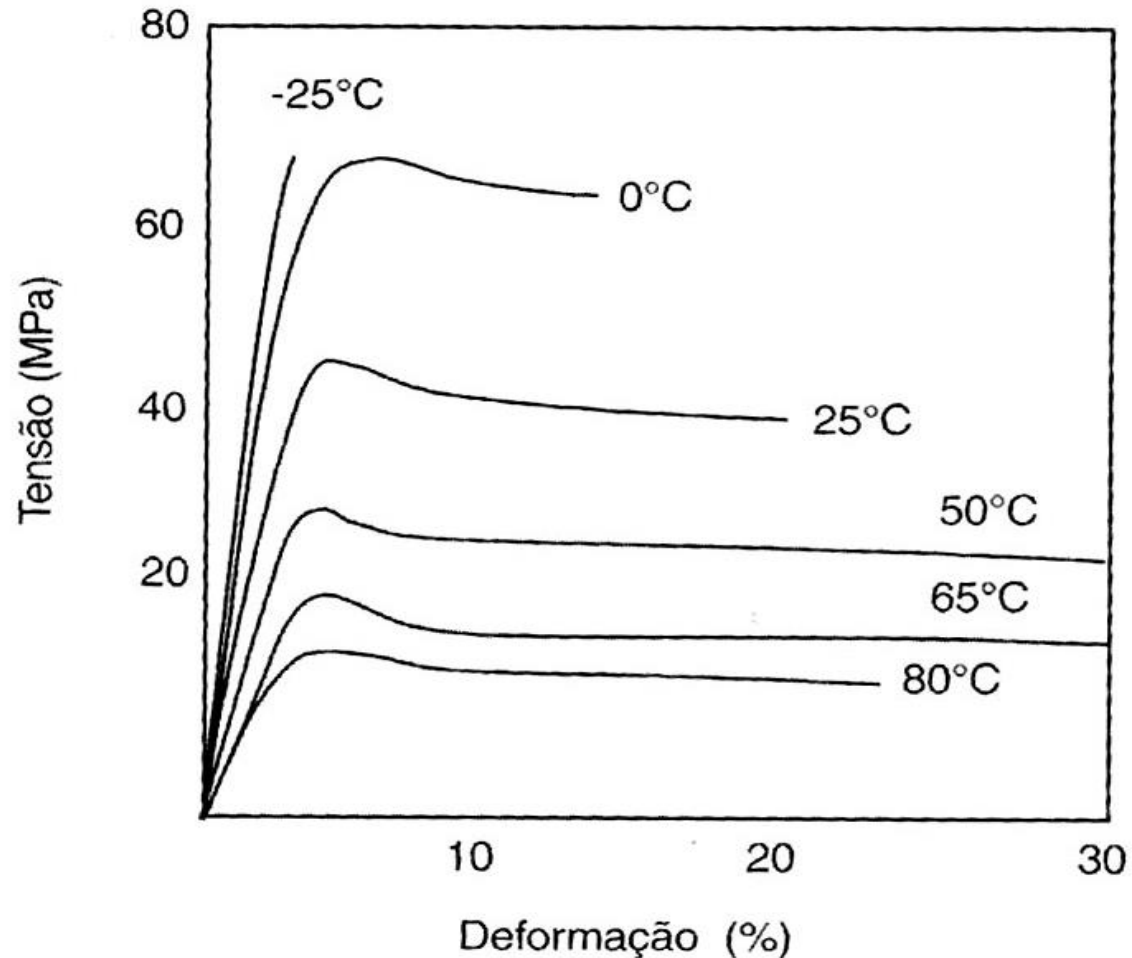
$$\sigma_r = \frac{P}{A} = \frac{P}{A_o} (1 + \varepsilon_c)$$

$$\sigma_r = \sigma_c (1 + \varepsilon_c)$$

Efeito da temperatura



- A temperatura pode influenciar significativamente as propriedades mecânicas levantadas pelo ensaio de tração
- Em geral, a resistência diminui e a ductilidade aumenta conforme o aumento de temperatura



Bibliografia



- ❑ Ciência e Engenharia de Materiais – uma Introdução, Willian D. **Callister**, Jr. LTC 5. edição.
- ❑ The Science and Engineering of Materials, 4th ed Donald R. **Askeland** – Pradeep P. Phulé.
- ❑ **Dieter**, G.E. Metalurgia Mecânica 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.
- ❑ Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos, Fundamentos teóricos e práticos. 5^o. Edição. Sérgio Augusto de **Souza**
- ❑ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8M-01A (2001)**. Standard test methods of tension testing of metallic materials. Metric. Philadelphia.