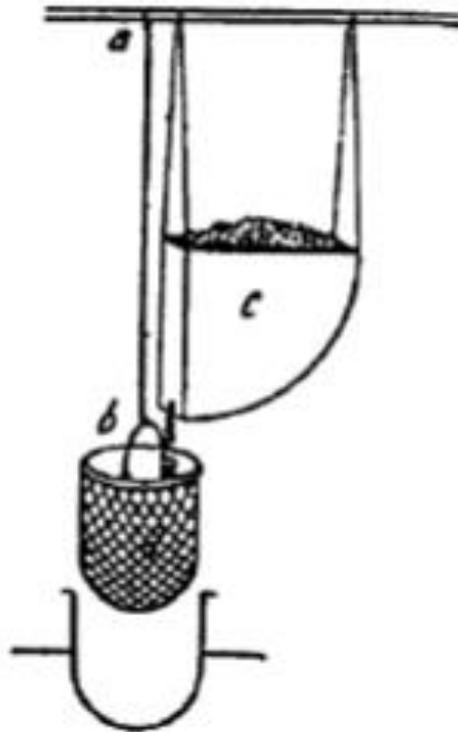


TRAÇÃO

ENSAIO DE TRAÇÃO

Leonardo Da Vinci (1452-1519)

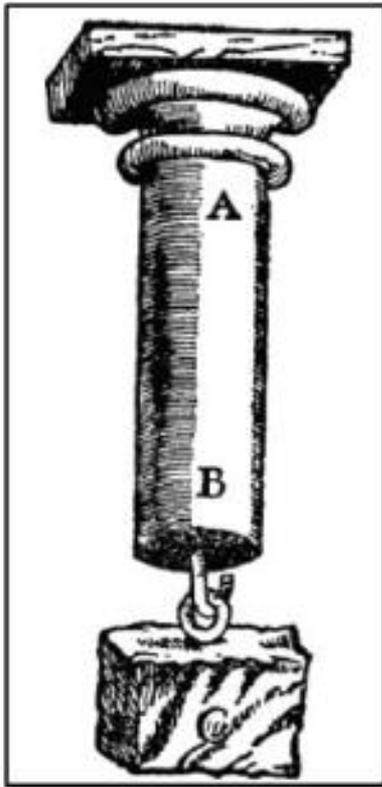


Testar as propriedades dos fios de ouro que laminava: a probabilidade de um arame metálico apresentar trincas era diretamente proporcional ao seu comprimento

Esquema do ensaio de tração idealizado por Leonardo Da Vinci.

ENSAIO DE TRAÇÃO

Galileu Galilei (1564-1642)



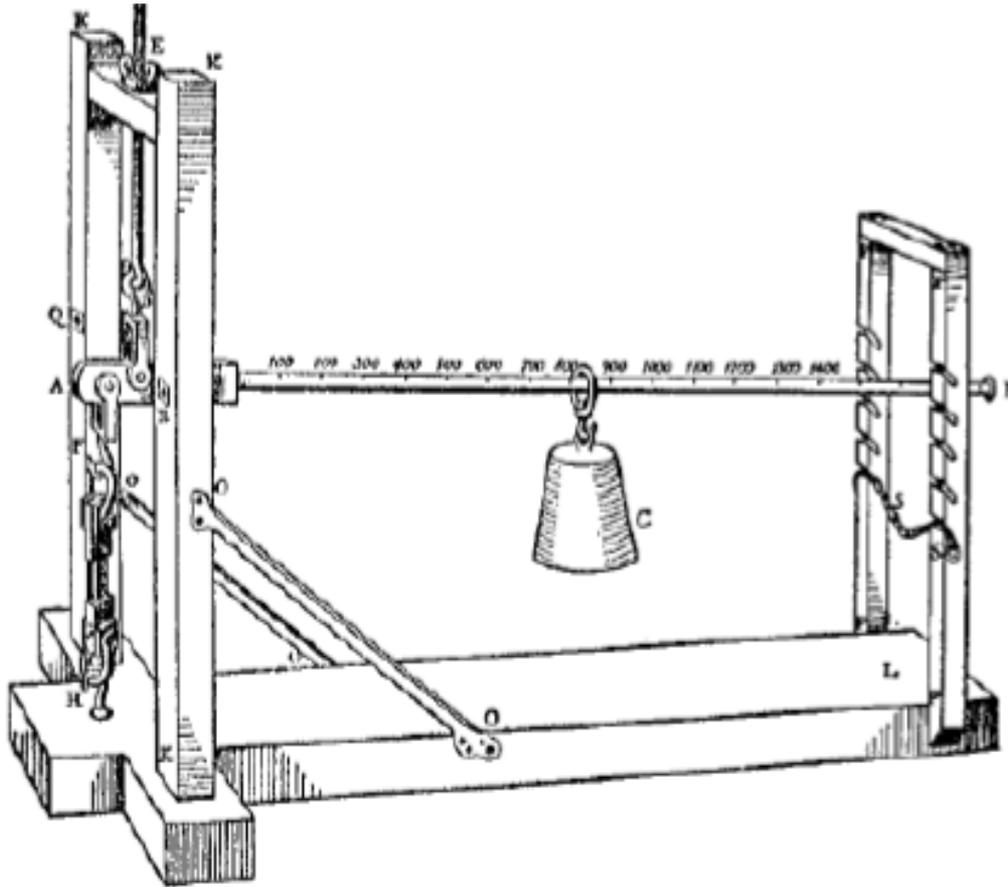
A resistência à tração de uma barra era proporcional à área da secção transversal e independente do comprimento: “Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno à due nuove Scienze” (1638).

Ilustração de Galileu para o ensaio de tração.

ENSAIO DE TRAÇÃO

P. Van Musschenbroek (1692-1761)

Máquina de tração de Musschenbroek.



“Physicae
Experimentales et
Geometricae”,
publicado em 1729

RESISTÊNCIA MECÂNICA

Cabo em tração simples

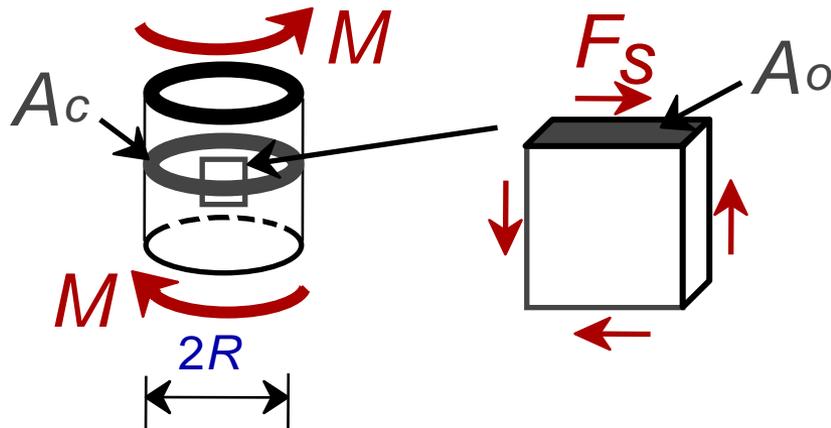


A_0 = cross sectional area (when unloaded)

DISPOSITIVO DE TELEFÉRICO



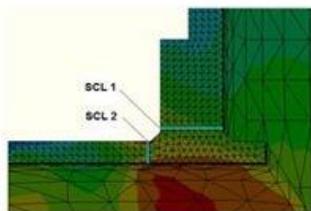
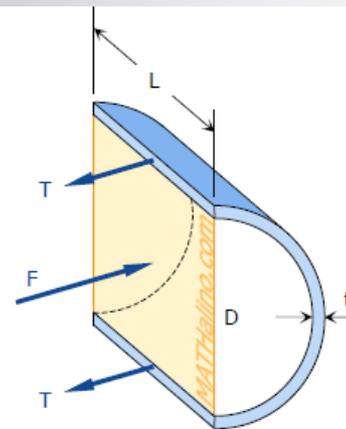
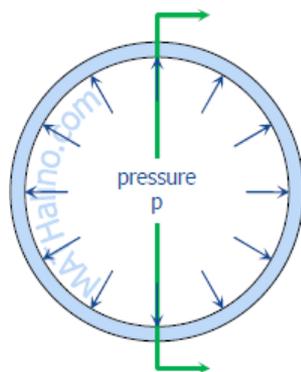
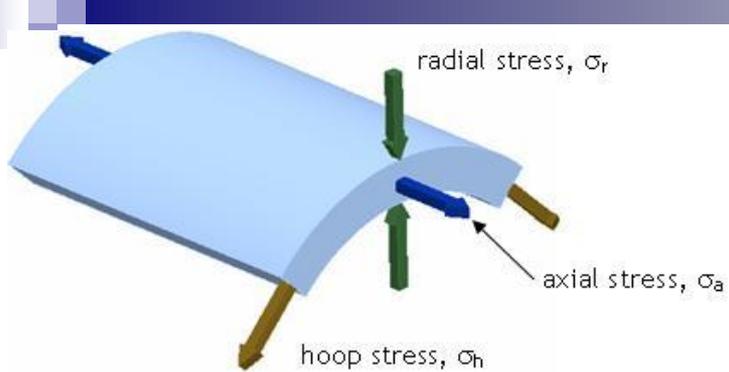
Eixo: torção pura/fadiga torcional



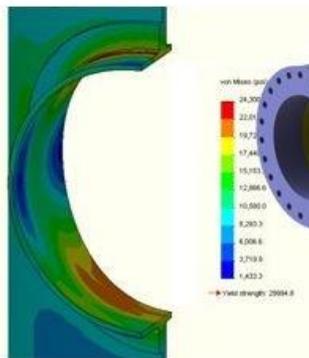
(Fonte: Callister)

CASO REAL:

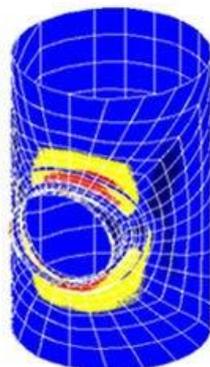
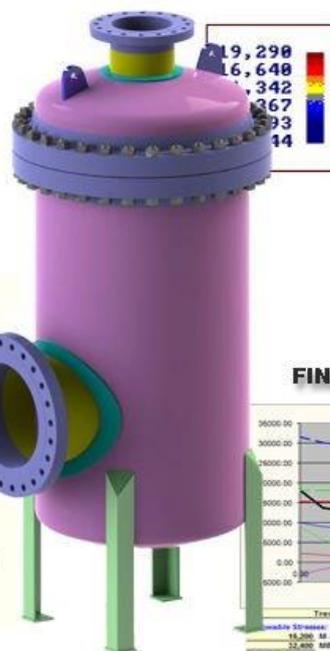
- **TRAÇÃO;**
- **CORROSÃO;**
- **FRAGILIZAÇÃO(T↓);**
- **VIBRAÇÃO;**
- **FADIGA.**



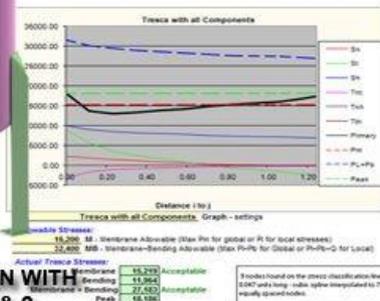
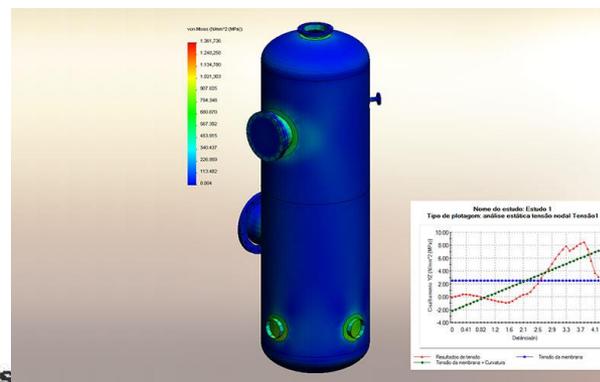
STRESS LINEARIZATION



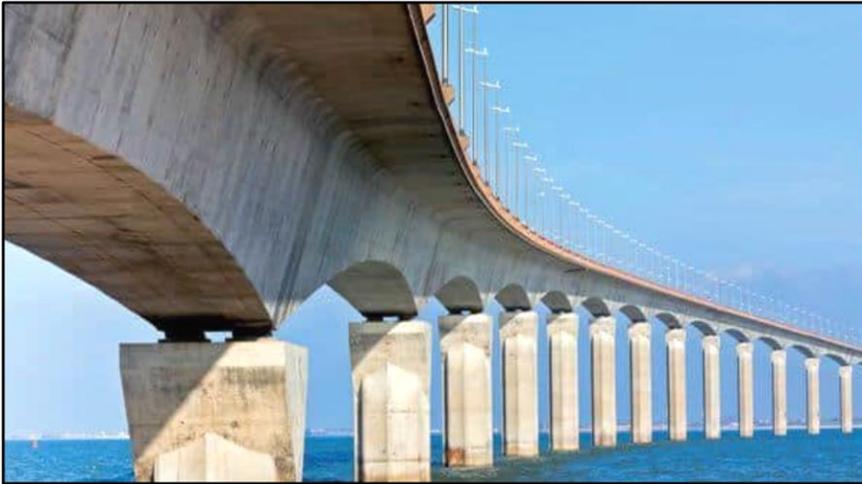
STRESS RESULT



FINITE ELEMENT ANALYSIS



PRESSURE VESSEL DESIGN WITH ASME CODE VIII DIV. 1 & 2



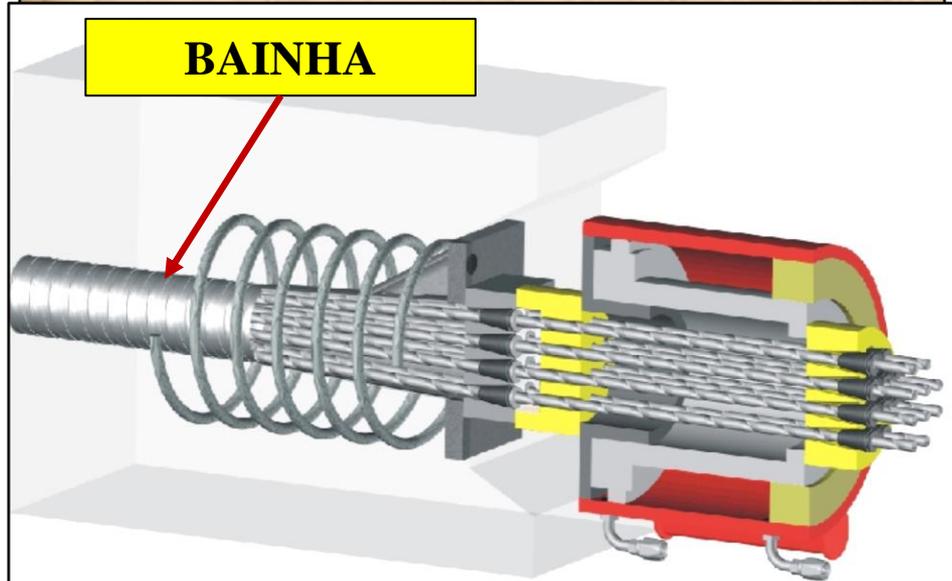
CONCRETO PRÉ-MOLDADO



**BARRAS DE
PROTENSÃO**



BAINHA



Ensaio de Tração: Procedimentos Normalizados

Os Ensaio Mecânicos podem ser realizados em:

- **Produtos acabados:** os ensaios têm maior significado pois procuram simular as condições de funcionamento do mesmo. Mas na prática isso nem sempre é realizável;
- **Corpos de prova:** Avalia a propriedades dos materiais independentemente das estruturas em que serão utilizados. Estas propriedades (Ex. limite de elasticidade, de resistência, alongamento, etc.) são afetadas pelo comprimento do corpo de prova, pelo seu formato, pela velocidade de aplicação da carga e pelas imprecisões do método de análise dos resultados do ensaio.



Para padronizar: Utilizam-se as **NORMAS**

Mesmo recorrendo às Normas, na fase de projeto das estruturas utiliza-se um fator multiplicativo chamado **coeficiente de segurança**, o qual leva em consideração as incertezas (provenientes da determinação das propriedades dos materiais e das teóricas de cálculos das estruturas).

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - American Society for Testing and Materials

DIN - Deutsches Institut für Normung

AFNOR - Association Française de Normalisation

BSI - British Standards Institution

ASME - American Society of Mechanical Engineer

ISO - International Organization for Standardization

JIS - Japanese Industrial Standards

SAE - Society of Automotive Engineers

COPANT - Comissão Panamericana de Normas Técnicas

Normas industriais.

Cisalhamento

Uma **tensão cisalhante** causa uma **deformação cisalhante**, de forma análoga a uma tração.

Tensão cisalhante

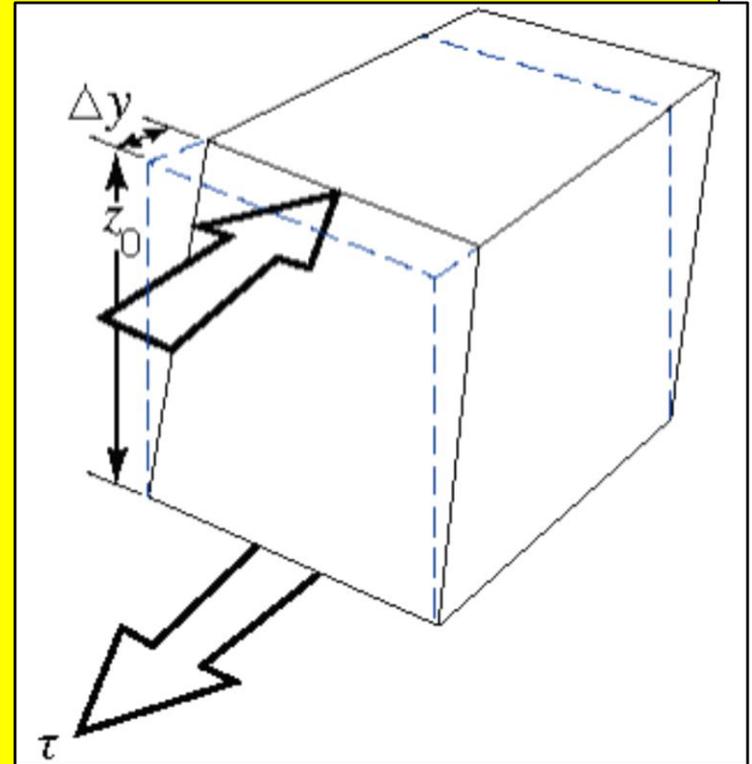
- $\tau = F/A_0$
- onde A_0 é a área **paralela** a aplicação da força.

Deformação cisalhante

- $\gamma = \tan \alpha = \Delta y/z_0$
- onde α é o ângulo de deformação

Módulo de cisalhamento G

$$\tau = G \gamma$$



Coeficiente de Poisson

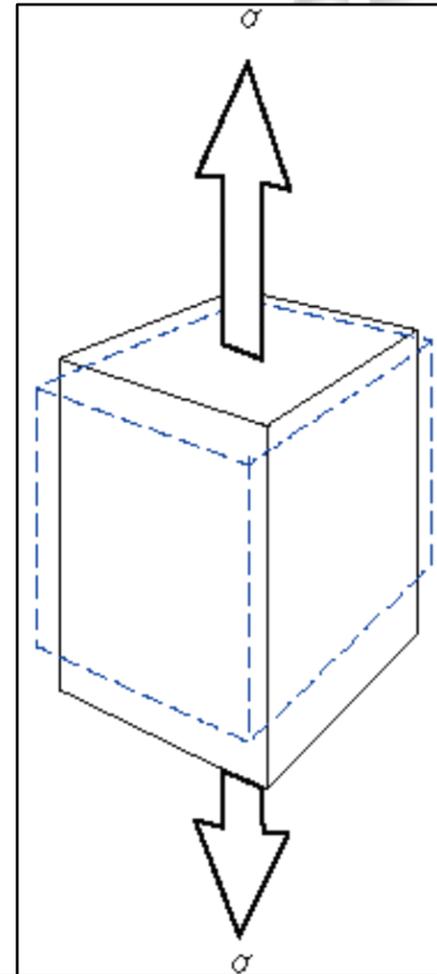
- Quando ocorre alongamento ao longo de uma direção, ocorre contração no plano perpendicular.
- A Relação entre as deformações é dada pelo **coeficiente de Poisson ν** .

$$\nu = - \varepsilon_x / \varepsilon_z = - \varepsilon_y / \varepsilon_z$$

- O sinal negativo apenas indica que uma extensão gera uma contração e vice-versa
- Os valores de ν para **diversos metais estão entre 0,25 e 0,35 (max 0,50)**

Para a maioria dos metais **$G \approx 0,4E$**

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



O coeficiente de Poisson (materiais isotropicos) pode ser usado para estabelecer uma relação entre o módulo de elasticidade e o módulo de cisalhamento de um material.

DEFINIÇÕES



- Força de tração

- Força de compressão

- Cisalhamento

Tensão

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

Deformação

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

Módulo de Elasticidade

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

Tensão

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

Deformação

$$\gamma = \tan \theta$$

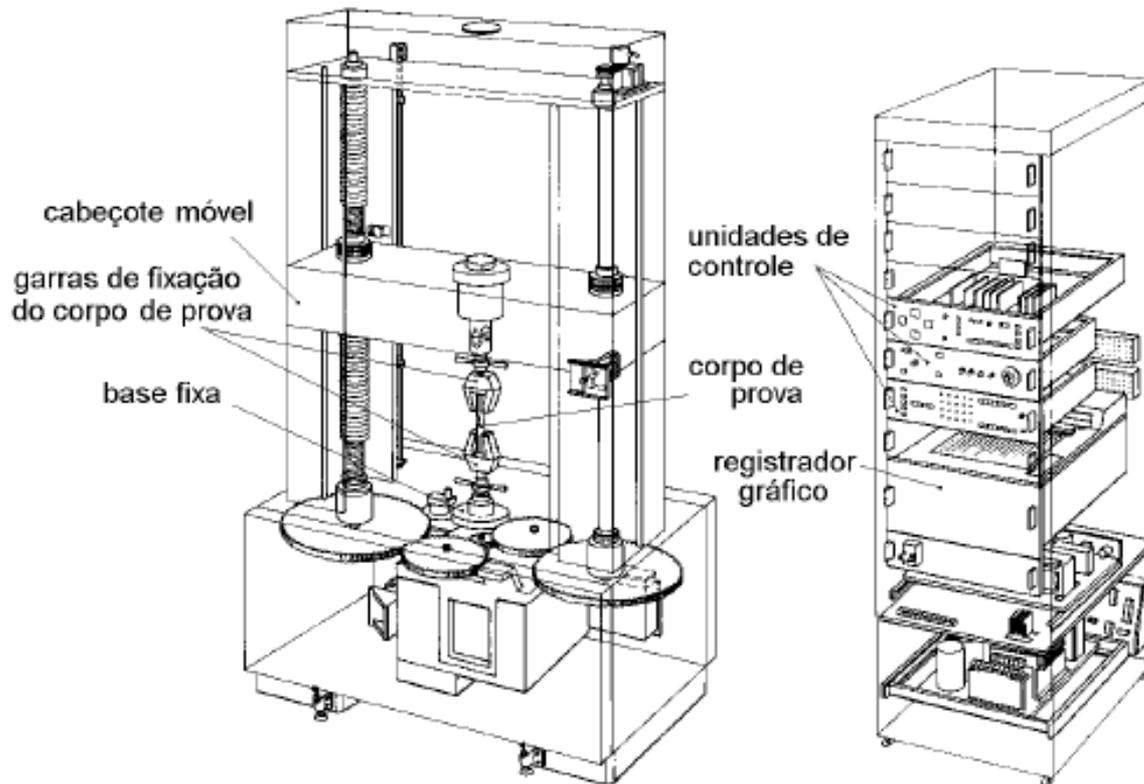
Módulo de cisalhamento

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

Razão de Poisson :
$$\nu = -\frac{\frac{\Delta A}{A_0}}{2 \cdot \frac{\Delta l}{l_0}}$$

Equipamento para o ensaio de tração

O ensaio de tração geralmente é realizado na máquina universal, que tem este nome porque se presta à realização de diversos tipos de ensaios.

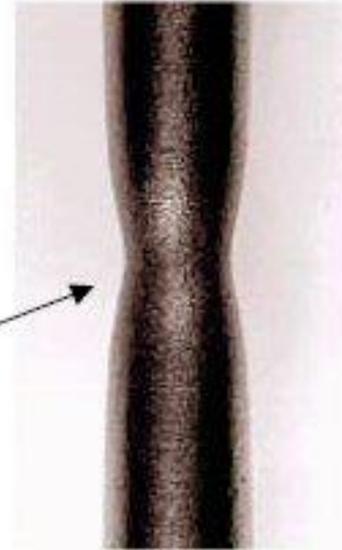
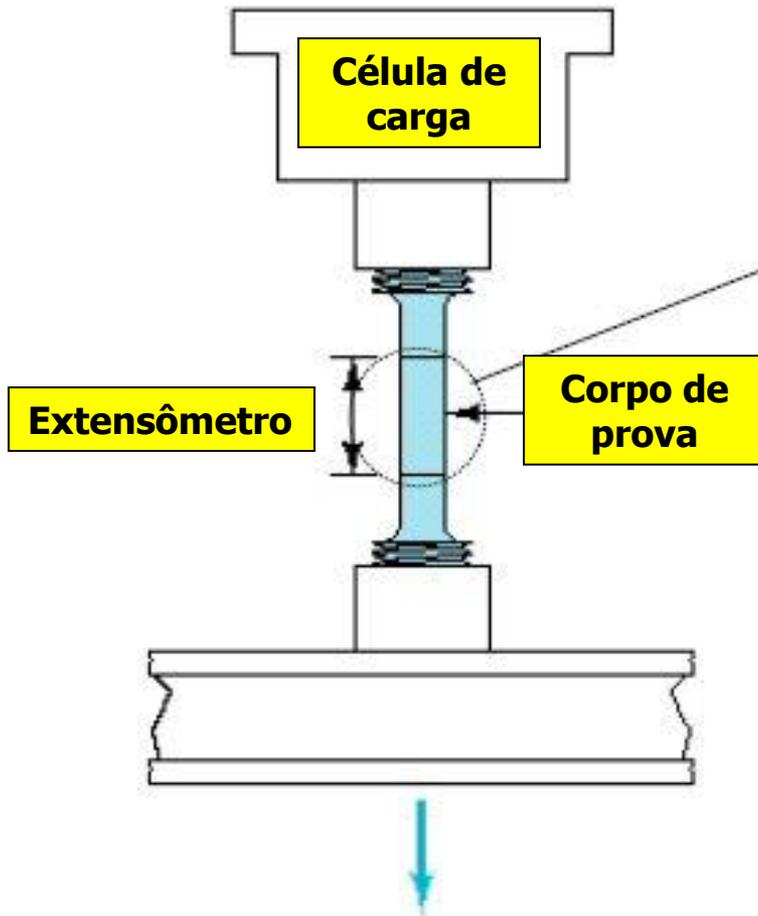


A máquina de tração

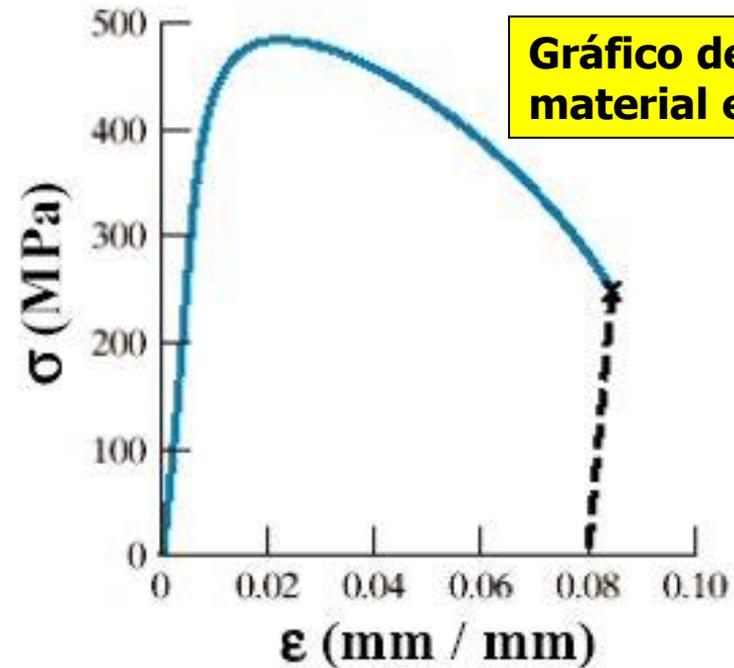
- É hidráulica ou eletromecânica, e está ligada a um dinamômetro ou célula de carga que mede a força aplicada ao corpo de prova;
- Possui um registrador gráfico que vai traçando o diagrama de força e deformação, em papel milimetrado, à medida em que o ensaio é realizado.

Máquina Universal de Ensaio: Tração, Compressão.

ENSAIO DE TRAÇÃO

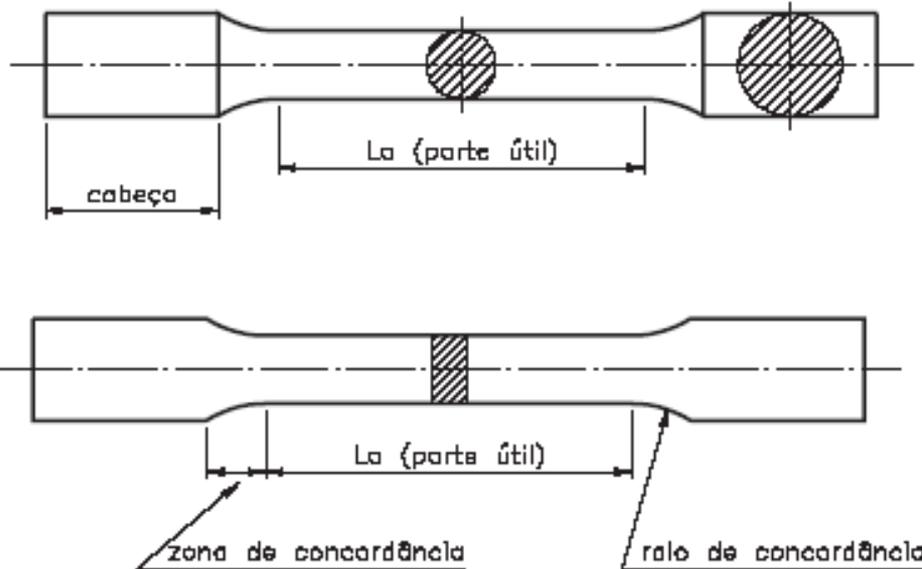


Detalhe do início da estrição do material



Corpos de prova

- Possuem características especificadas de acordo com **normas técnicas**. Suas dimensões devem ser adequadas à capacidade da máquina de ensaio;
- Normalmente utilizam-se corpos de prova de **seção circular** ou de seção **retangular**, dependendo da forma e tamanho do produto acabado do qual foram retirados, como mostram as ilustrações a seguir.



- A **parte útil** do corpo de prova, identificada por **L_0** , é a região onde são feitas as **medidas** das propriedades mecânicas do material.

- As **cabeças** são as regiões extremas, que servem para **fixar o corpo-de-prova** à máquina de modo que a força de tração atuante seja axial.



- Segundo a **ABNT**, o **comprimento da parte útil** dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração deve corresponder a **5 vezes o diâmetro da seção da parte útil**;

- Por acordo internacional, sempre que possível um corpo de prova deve ter 10 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento inicial. Não sendo possível retirada de um corpo de prova deste tipo, deve-se adotar um corpo com dimensões proporcionais a essas (*subsize*). Dimensões padronizadas podem ser encontradas nas normas como :

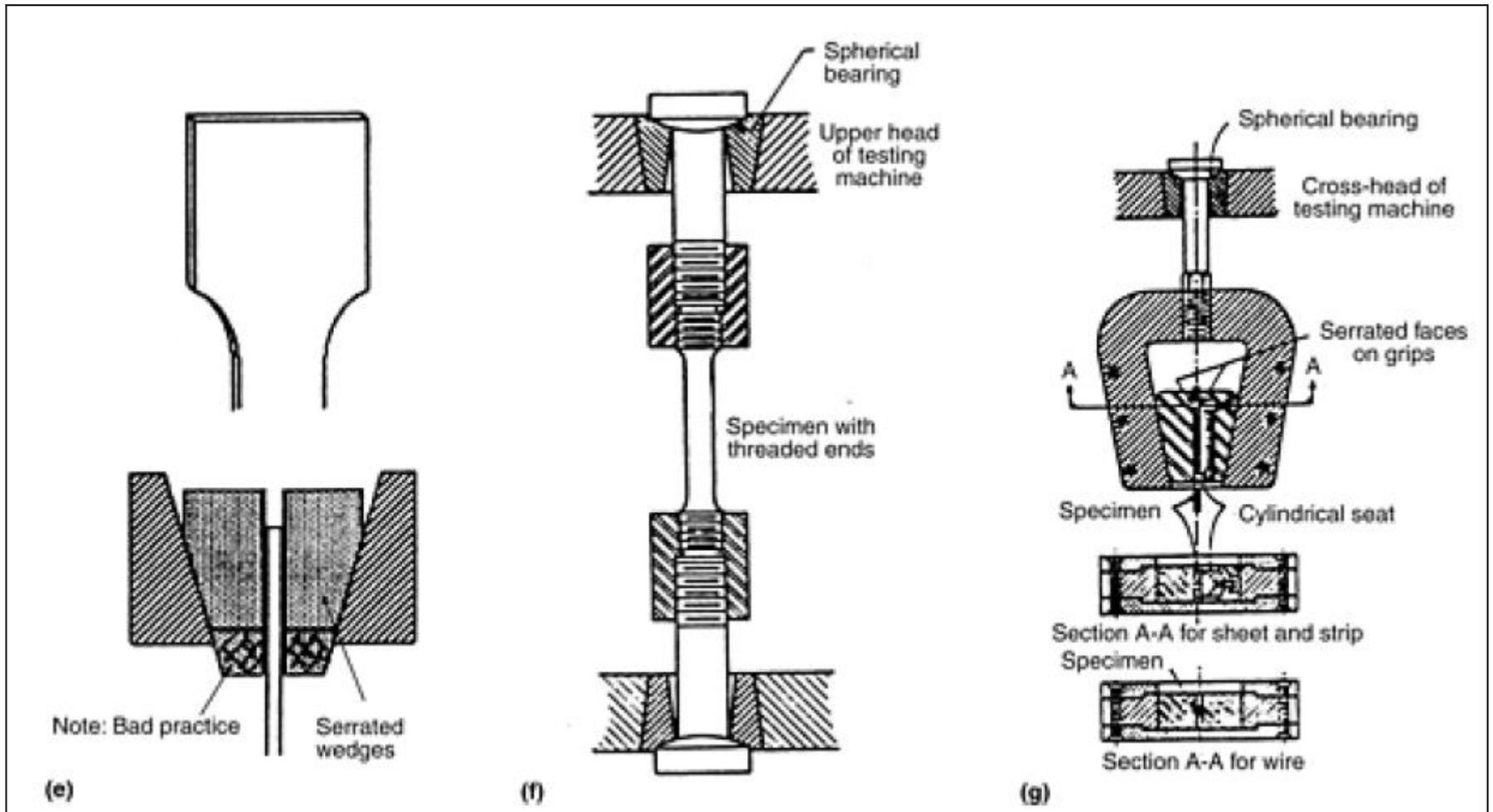
- **ASTM E8M**;

- **DIN50125**;

- **ASTM A 370**;

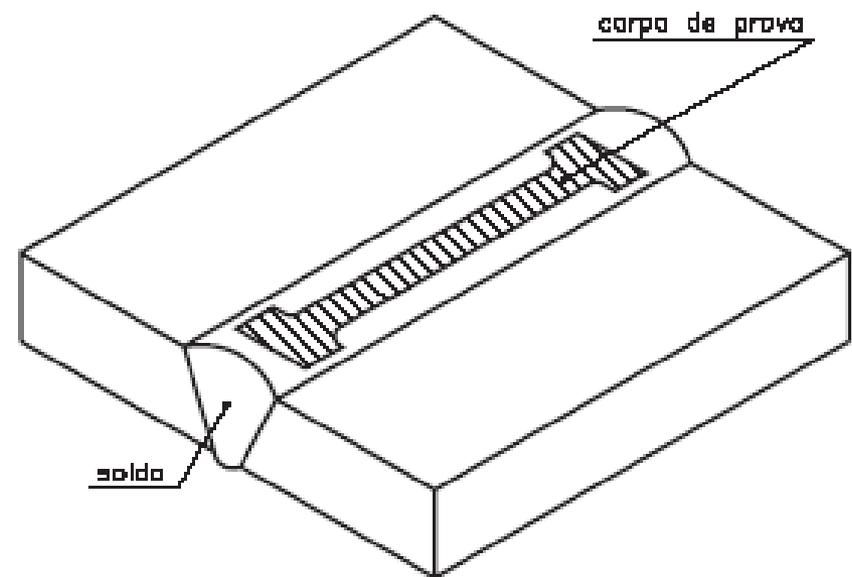
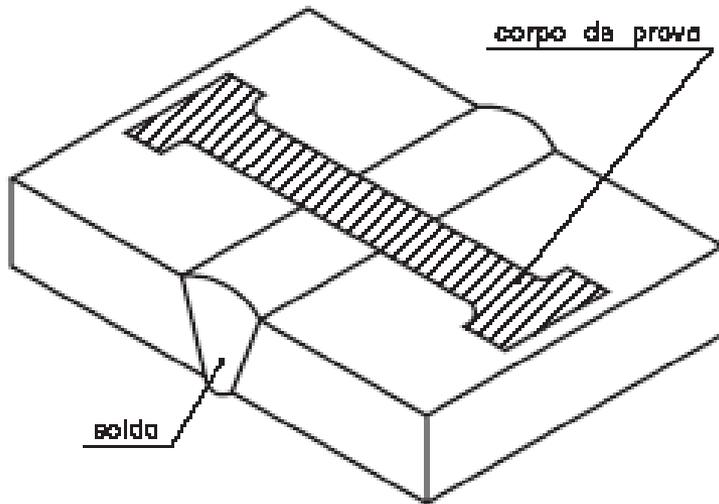
- **ABNT NBR ISO 6892-1:2013**.

Sistemas de fixações mais comuns (garras)

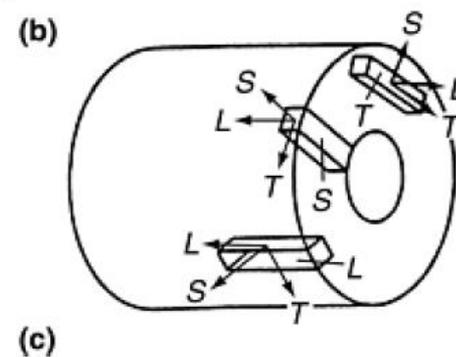
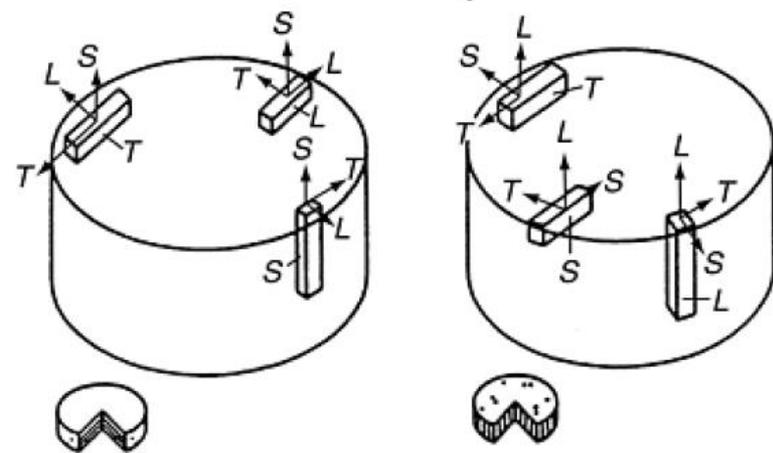
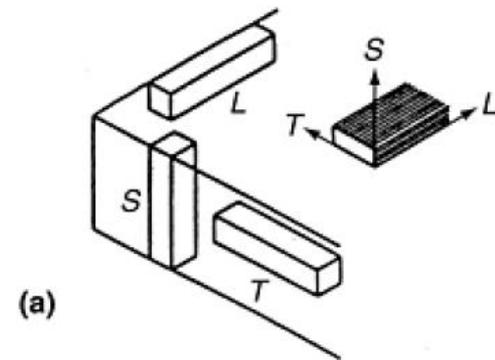
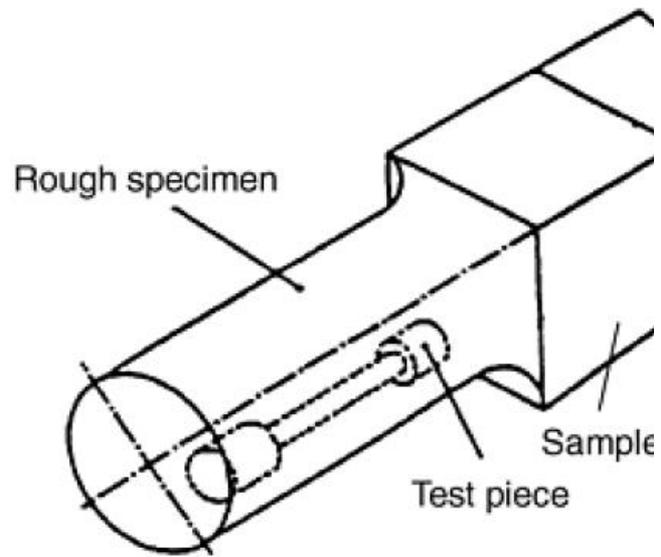


Metals Handbook-Vol.8

Em **materiais soldados**, podem ser retirados corpos de prova com a solda no meio ou no sentido longitudinal da solda, como você pode observar na figura a seguir. (**Código ASME**)



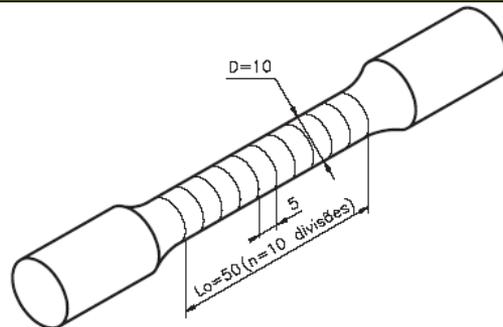
Retirada de corpo de prova em materiais soldados.



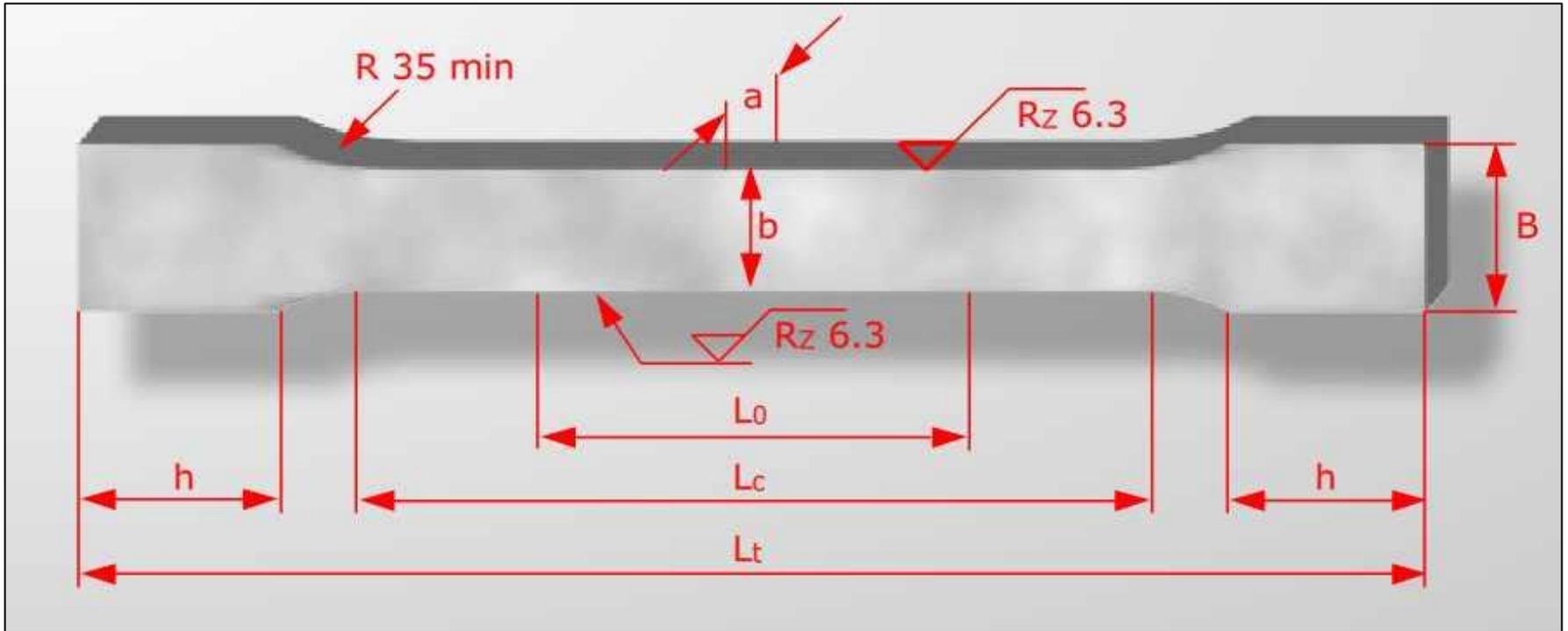
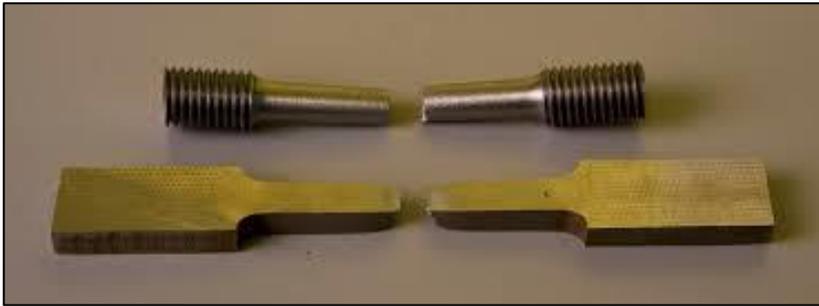
ASTM A 20 - CHAPAS

Preparação do corpo de prova para o ensaio de tração

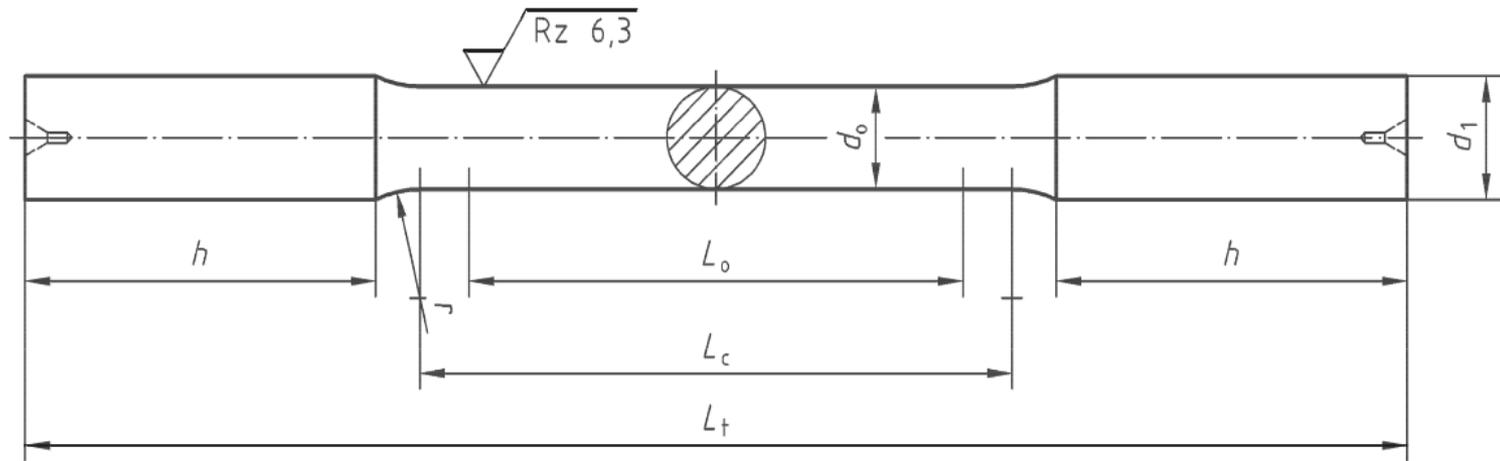
1. **Identificar o material do corpo-de-prova.** Corpos de prova podem ser obtidos a partir da matéria-prima ou de **partes específicas** do produto acabado;
2. Depois, deve-se **medir o diâmetro do corpo de prova** em dois pontos no **comprimento da parte útil**, utilizando um micrômetro, e **calcular a média**;
3. Por fim, deve-se riscar o corpo-de-prova, isto é, **traçar as divisões** no comprimento útil. Uma possibilidade seria para um CP de **50 mm** de comprimento, as marcações serem feitas de **5 em 5 milímetros**.



Corpo-de-prova preparado para o ensaio de tração



4.2 Type A test pieces



Key

d_0 test piece diameter

d_1 diameter of gripped ends ($\geq 1,2 d_0$)

h length of gripped ends

L_0 original gauge length ($L_0 = 5 d_0$)

L_c parallel length ($L_c \geq L_0 + d_0$)

L_t total length of test piece

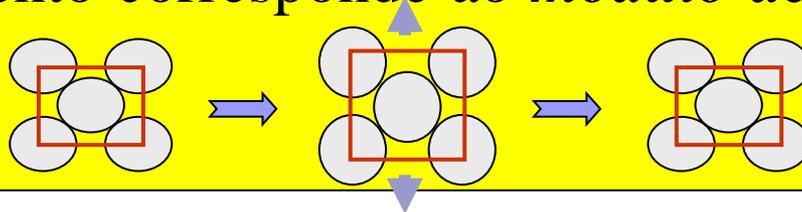
Figure 1 — Type A test piece, of circular cross-section, with smooth, cylindrical ends for clamping in wedge grips

Deformação Elástica

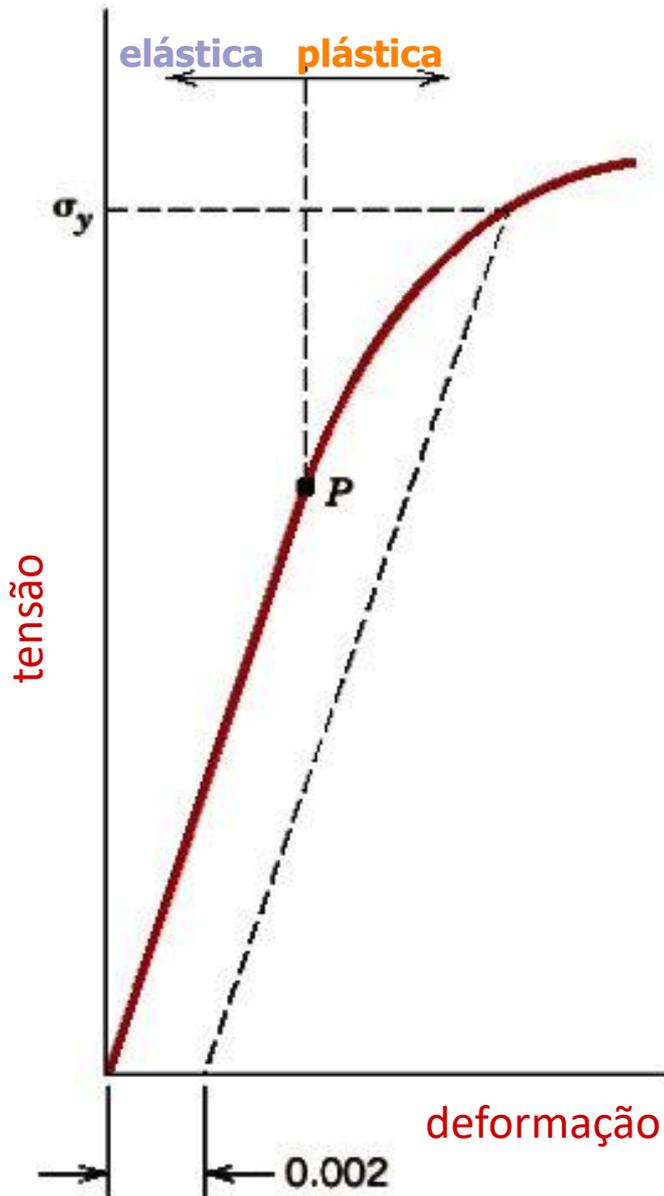
Características Principais:

- A deformação elástica é resultado de um pequeno alongamento ou contração da célula cristalina na direção da tensão (tração ou compressão) aplicada;
- Deformação não é permanente, o que significa que quando a carga é liberada, a peça retorna à sua forma original;
- Processo no qual tensão e deformação são proporcionais (obedece a lei de Hooke) $\rightarrow \sigma = E\varepsilon$ (lembra $F = KX$ -Mola);
- Gráfico da tensão x deformação resulta em uma relação linear. A inclinação deste segmento corresponde ao *módulo de elasticidade*

E



Comportamento $\sigma \times \varepsilon$



- **Deformação elástica:** é reversível, ou seja, quando a carga é retirada, o material volta às suas dimensões originais;

- ✓ átomos se movem, mas não ocupam novas posições na rede cristalina;

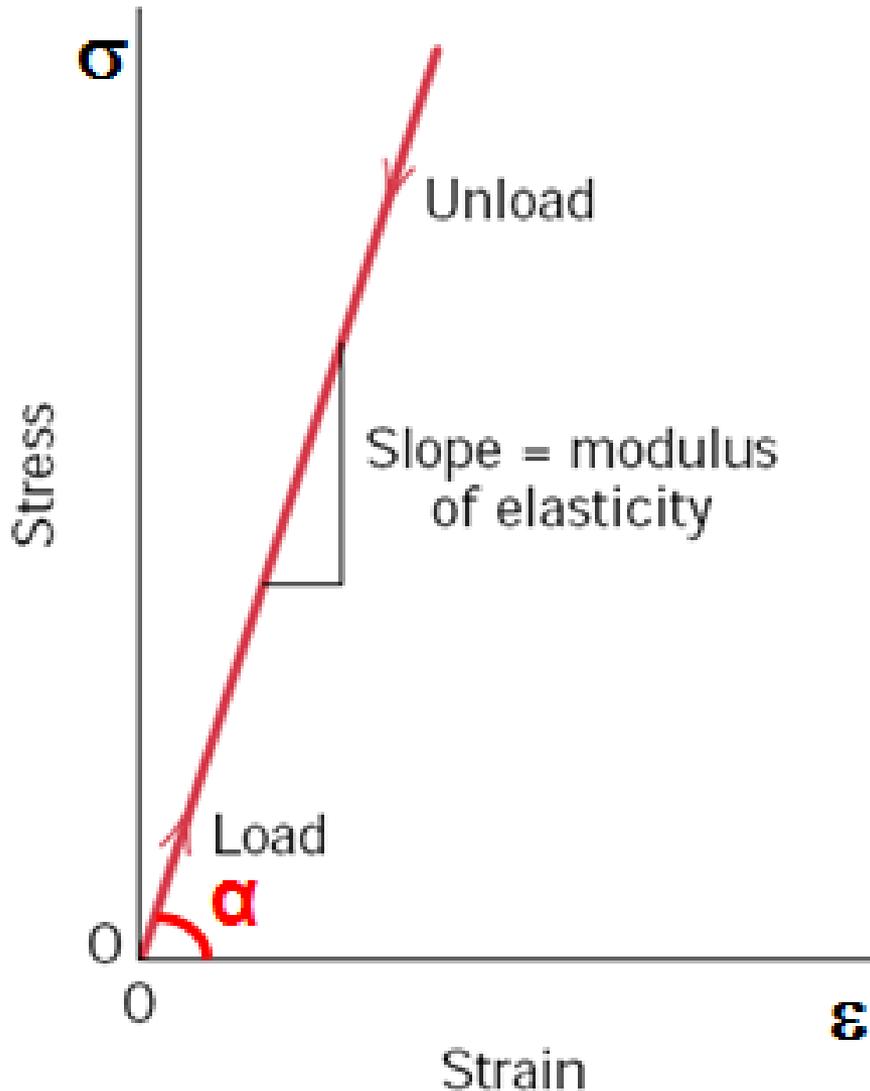
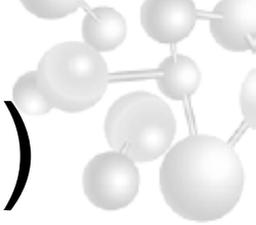
- ✓ numa curva de $\sigma \times \varepsilon$, a região elástica é a parte linear inicial do gráfico.

- **Deformação plástica:** é irreversível, ou seja, quando a carga é retirada, o material não recupera suas dimensões originais;

- ✓ átomos se deslocam para novas posições em relação uns aos outros.



Módulo de Elasticidade (E)



$$\sigma = E \varepsilon$$

$$\tan g \alpha = \frac{\Delta S}{\Delta \varepsilon} = E$$

E = módulo de elasticidade
ou Young (GPa)

σ = tensão (MPa)

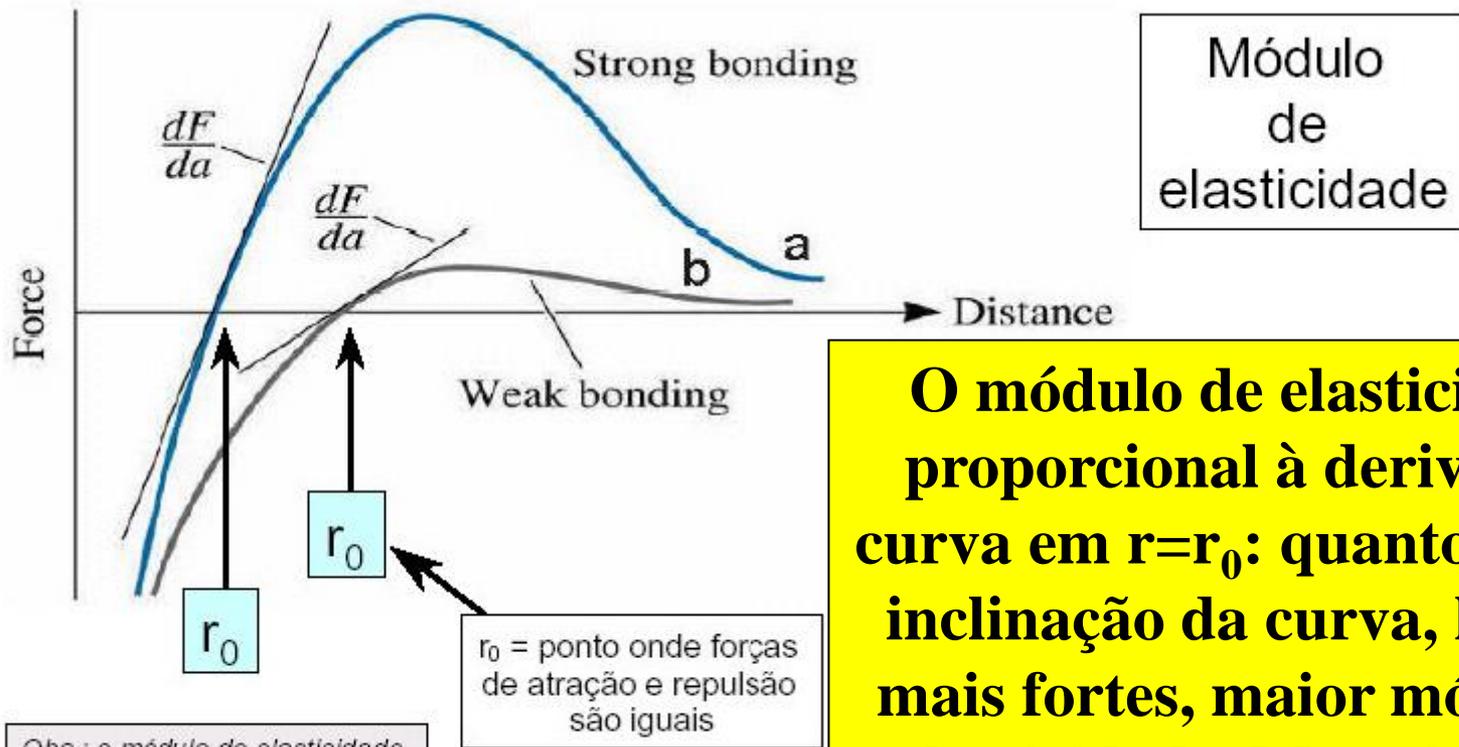
ε = deformação (mm/mm) 25

Módulo de Elasticidade (E)

Principais características

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

Propriedades mecânicas: módulo de Elasticidade



Obs.: o módulo de elasticidade é uma propriedade mecânica que será estudada em detalhe mais à frente no curso

r_0 = ponto onde forças de atração e repulsão são iguais

O módulo de elasticidade é proporcional à derivada da curva em $r=r_0$: quanto maior a inclinação da curva, ligações mais fortes, maior módulo de elasticidade. Material a tem maior módulo que material b!

Módulo de Elasticidade – Aço vs. Alumínio

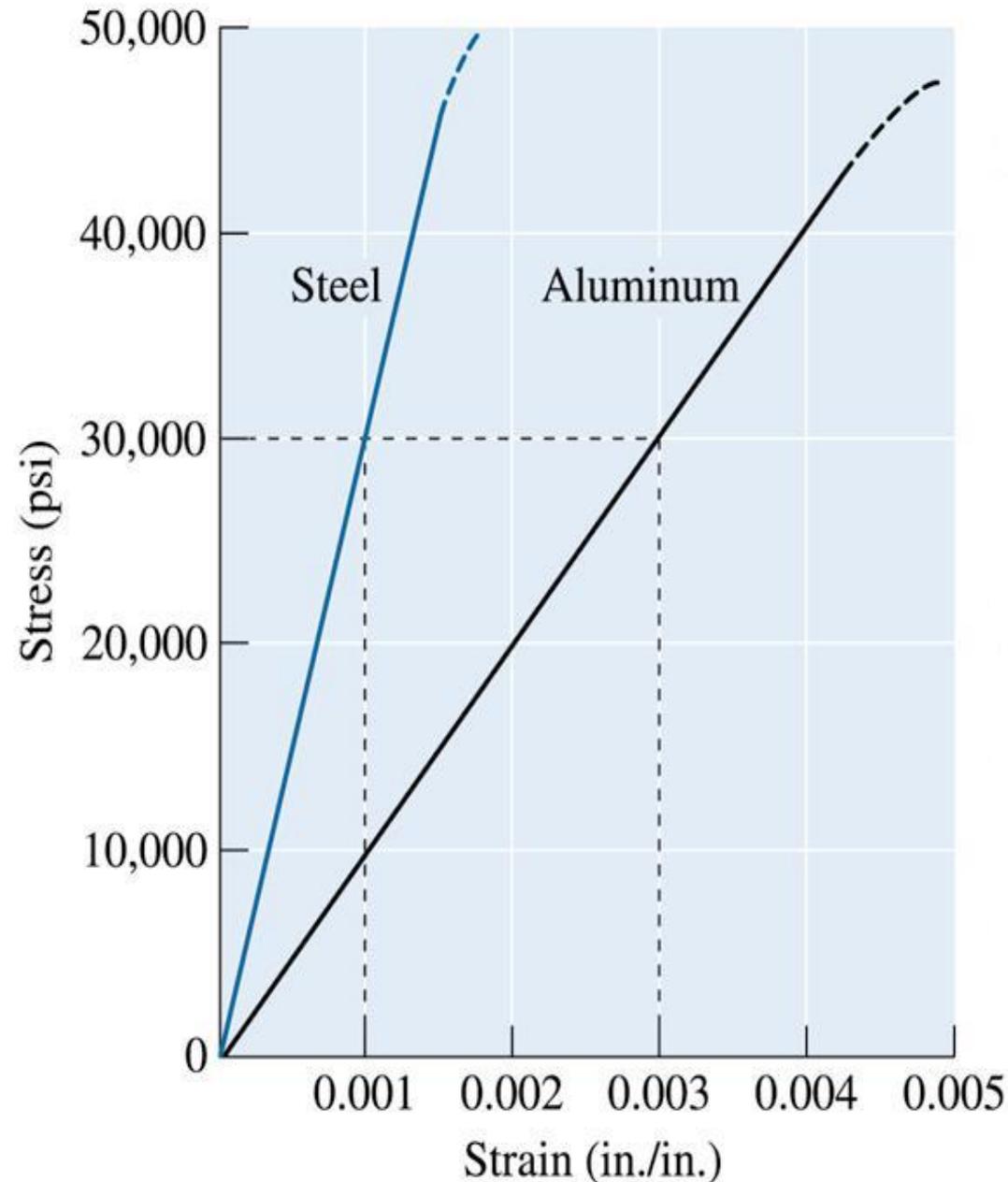
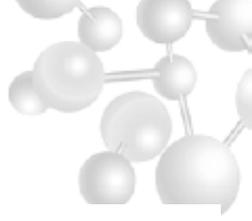


TABLE 2.5 Elastic and Shear Moduli and Poisson Ratios for Polycrystalline Metals^a

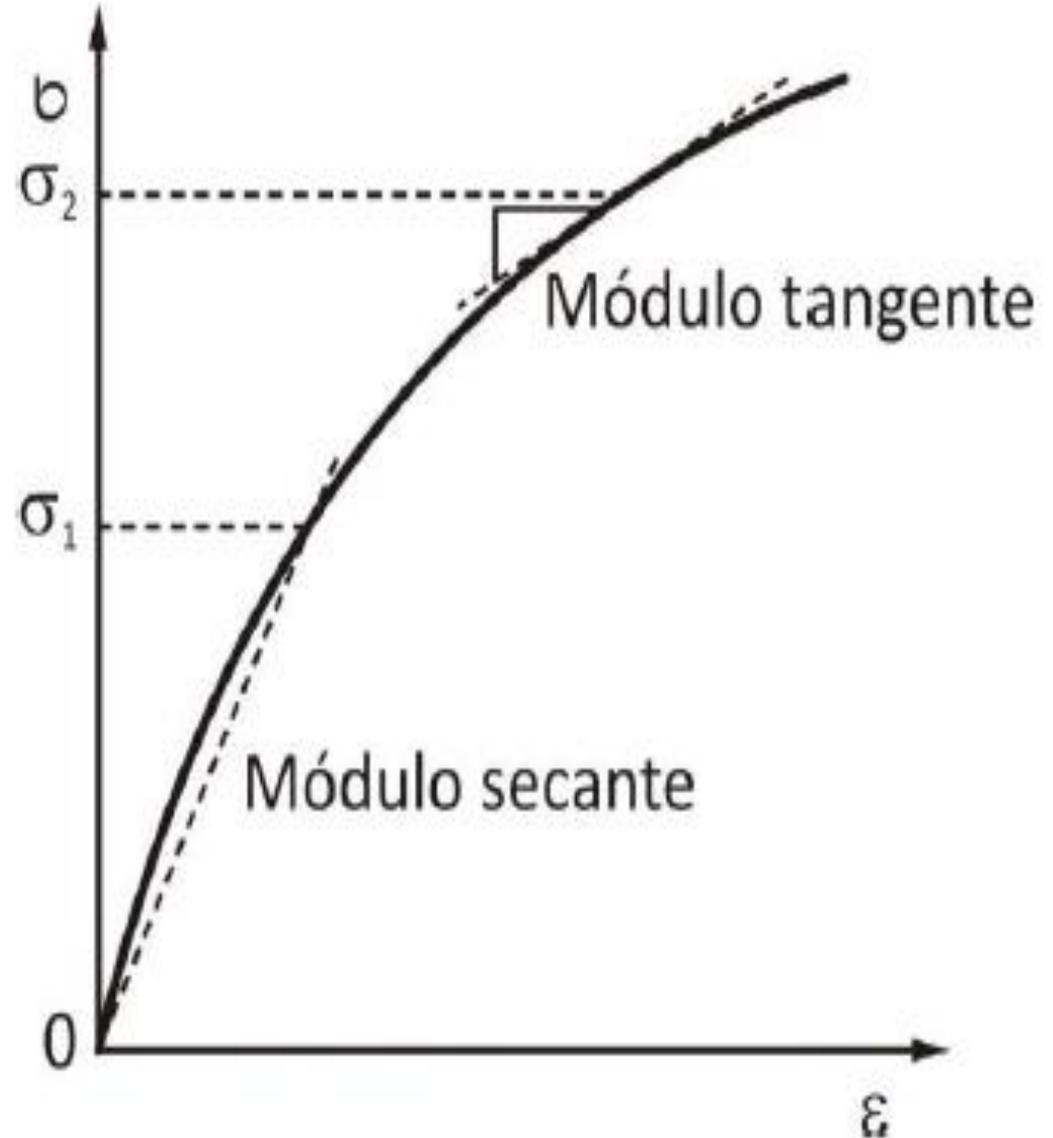
<i>Metal</i> (20°C)	<i>E</i> (GPa)	<i>G</i> (GPa)	<i>ν</i>
Aluminum	70.3	26.1	0.345
Cadmium	49.9	19.2	0.300
Chromium	279.1	115.4	0.210
Copper	129.8	48.3	0.343
Gold	78.0	27.0	0.440
Iron	211.4	81.6	0.293
Magnesium	44.7	17.3	0.291
Nickel	199.5	76.0	0.312
Niobium	104.9	37.5	0.397
Silver	82.7	30.3	0.367
Tantalum	185.7	69.2	0.342
Titanium	115.7	43.8	0.321
Tungsten	411.0	160.6	0.280
Vanadium	127.6	46.7	0.365

^a Adapted with permission from R. W. Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Material*, New York: John Wiley, 1976, p. 8.

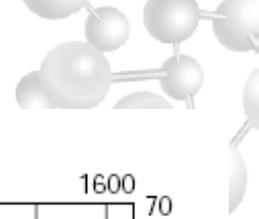
Comportamento não-linear



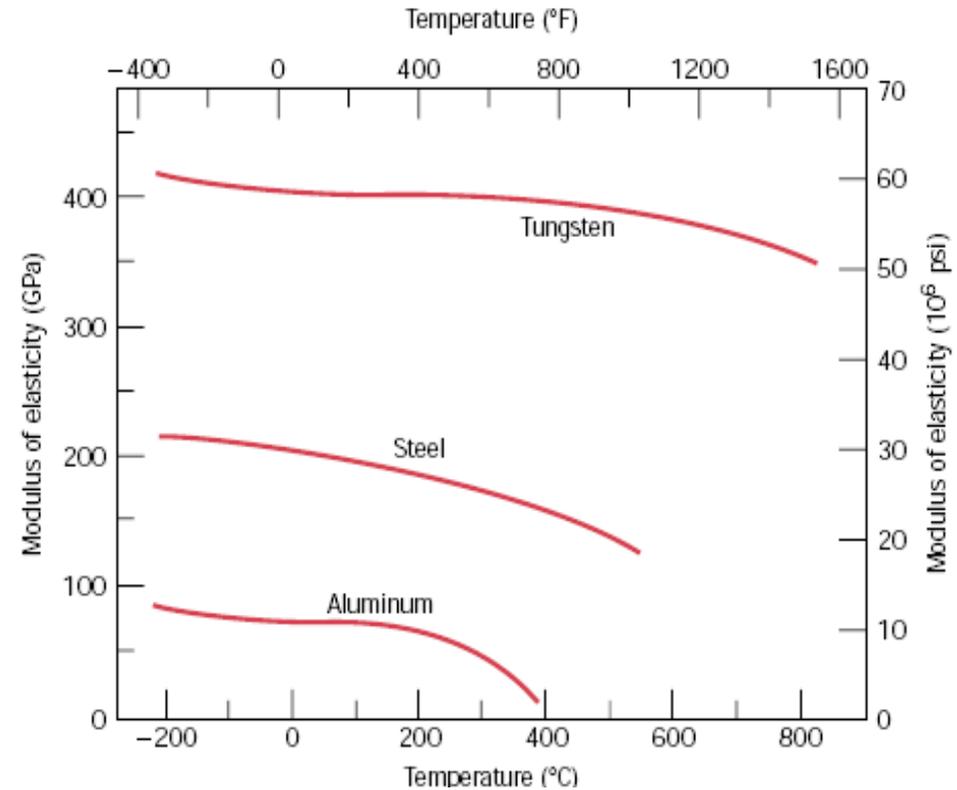
Alguns metais como ferro fundido cinzento, o concreto e muitos polímeros apresentam um comportamento não linear na parte elástica da curva tensão x deformação



Módulo de Elasticidade



- O módulo de elasticidade é dependente da temperatura;
- Quanto maior a temperatura o E tende a diminuir.



Valores típicos dos módulos de elasticidade a diferentes temperaturas.

Material	Módulo de Elasticidade, GPa.				
	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		

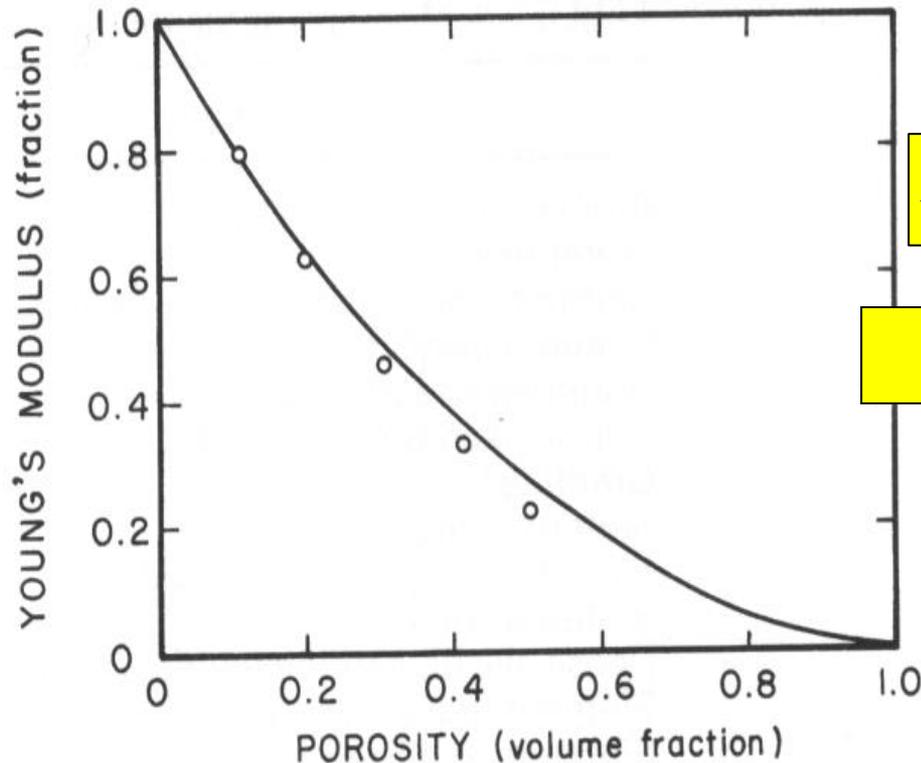


Material	MÓDULO DE ELASTICIDADE OU YOUNG (E)	
	GPa	10⁶ Psi
Polietileno alto peso molecular *	<i>0,7</i>	<i>0,1</i>
Resina Epóxi **	<i>3,5</i>	<i>0,5</i>
Acrílicos	<i>3,5</i>	<i>0,5</i>
Epóxi reforçado com fibra vidro ***	<i>40</i>	<i>5,8</i>
Magnésio	<i>45</i>	<i>6,5</i>
Alumínio	<i>70</i>	<i>10</i>
Latão	<i>97</i>	<i>14</i>
Titânio	<i>107</i>	<i>15,5</i>
Cobre	<i>110</i>	<i>16</i>
Níquel	<i>207</i>	<i>30</i>
Aço	<i>207</i>	<i>30</i>
Compostos grafite/epóxi ***	<i>280</i>	<i>40,7</i>
Tungstênio	<i>407</i>	<i>59</i>

* Polímero termoplástico
** Polímero termofixo
*** Compósitos

Módulo de Elasticidade Cerâmica

O módulo elástico das cerâmicas são fortemente dependente da porosidade.



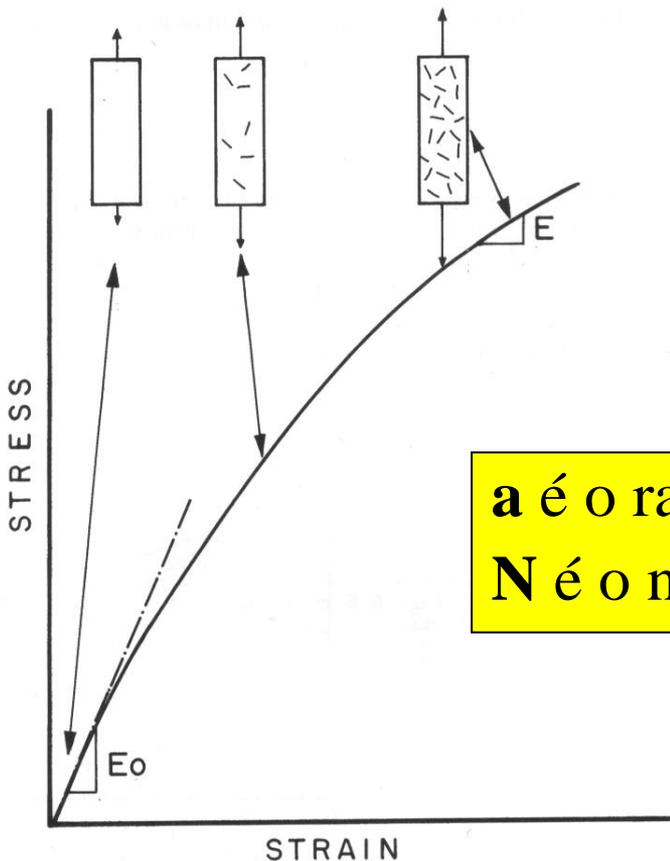
$$E = E_0(1 - f_1 p + f_2 p^2)$$

Onde $f_1 = 1,9$ e $f_2 = 0,9$

Figure 2.9 Effect of porosity on elastic modulus of alumina. Circles represent experimental measurements. (After R. L. Coble and W. D. Kingery, *J. Am. Ceramic Soc*, 39 (1956) 377).

Um outro fator importante no módulo de elasticidade nos materiais cerâmicos é a **presença de microtrincas**, as quais **diminuem a energia elástica armazenada**.

As trincas **podem ser geradas durante o resfriamento**. Isso se deve à **anisotropia** na expansão e contração térmica.



$$\frac{E}{E_0} = \left[1 + \frac{16(10 - 3\nu_0)(1 - \nu_0^2)}{45(2 - \nu_0)} N a^3 \right]^{-1}$$

a é o raio médio das trincas

N é o número de trincas por unidade de volume

Figure 2.10 Effect of microcracks on Young's modulus for ceramics.

Deformação Plástica

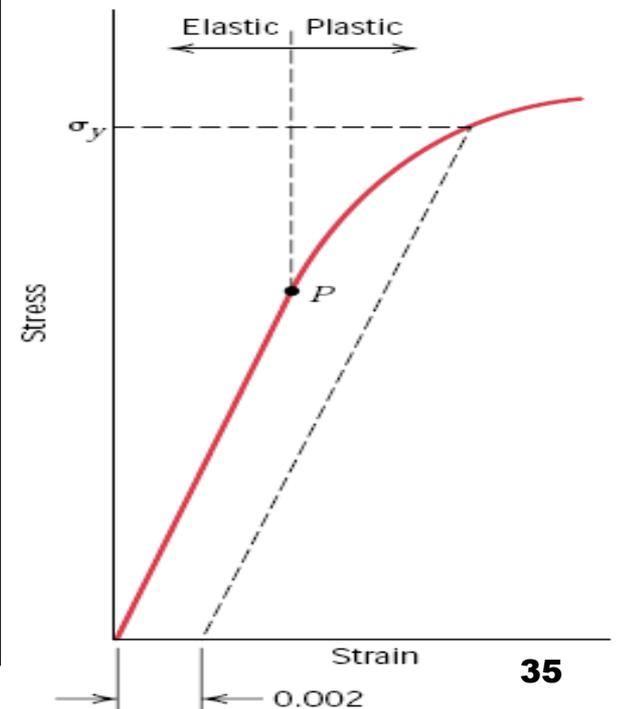
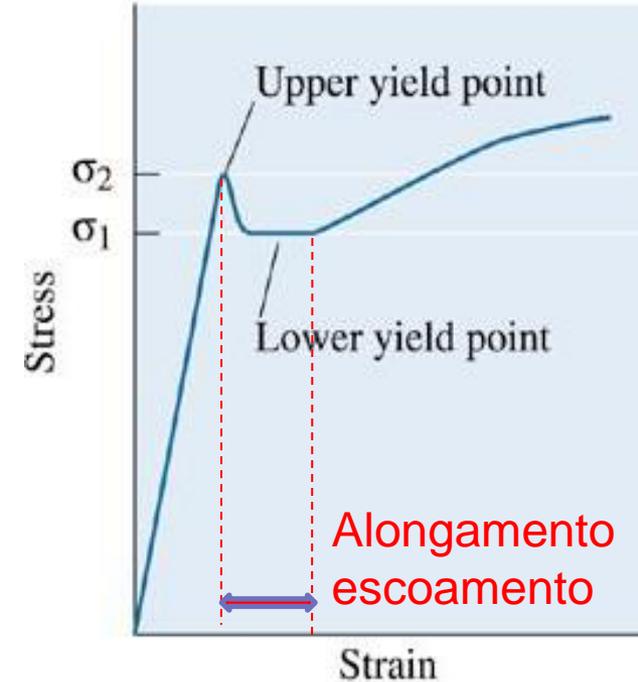
- Para a maioria dos materiais metálicos, o regime elástico persiste apenas até deformações de aproximadamente 0,2 a 0,5%.
- À medida que o material é deformado além, desse ponto, a tensão não é mais proporcional à deformação (lei de Hooke) e ocorre uma deformação permanente não recuperável denominada de deformação plástica;
- A deformação plástica corresponde à quebra de ligações com os átomos vizinhos originais e em seguida formação de novas ligações (**linhas de discordâncias**);
- A deformação plástica ocorre mediante um processo de escorregamento (cisalhamento) , que envolve o movimento de discordâncias.

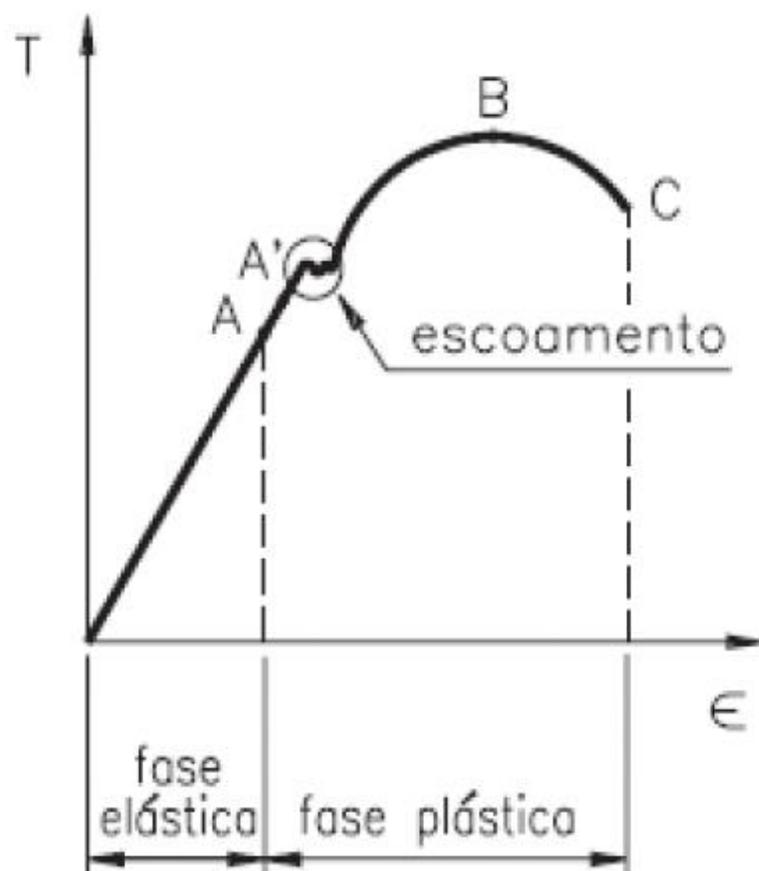
Limite de proporcionalidade e Tensão limite de escoamento

➤ 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 consequência foi adotada uma convenção: é construída uma linha paralela à região elástica a partir de uma pré-deformação de 0,002 ou 0,2%.

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

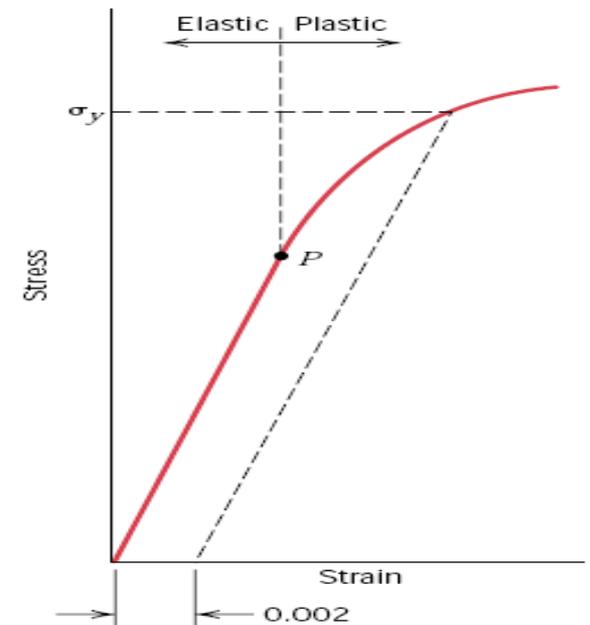




- A – limite elástico
- A' – limite de proporcionalidade
- B – limite de resistência
- C – limite de ruptura

Limite de Escoamento

Quando não observa-se 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 : $n = 0,2 \% (\epsilon = 0,002)$

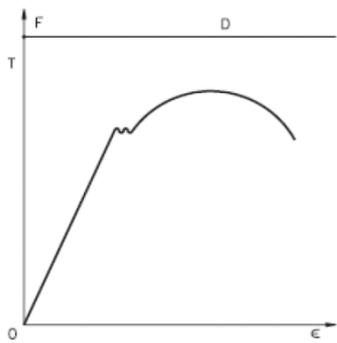
Cobre e suas ligas: $n = 0,5 \% (\epsilon = 0,005)$

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

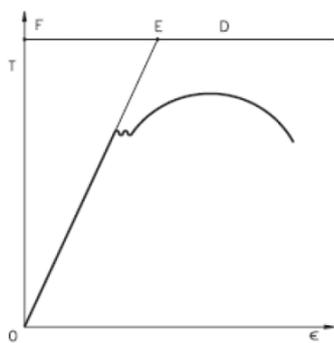
Cerâmicos : $n = 0,1 \% (\epsilon = 0,001)$

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

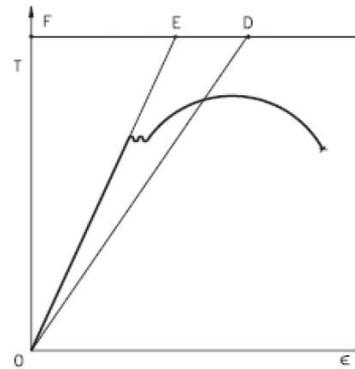
Em **1939** um cientista chamado **Johnson** propôs um método para determinar um **limite elástico aparente**, que ficou conhecido como **limite Johnson**. O limite Johnson corresponde à **tensão na qual a velocidade de deformação é 50% maior que na origem**.



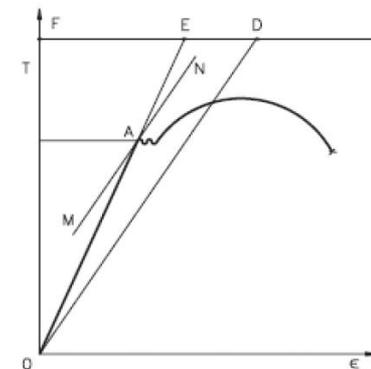
(1)



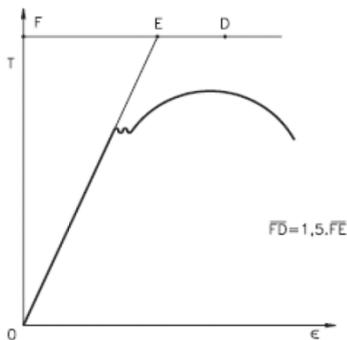
(2)



(4)



(5)



(3)

1. Trace uma reta perpendicular ao eixo das tensões, fora da região da curva tensão-deformação (F-D).
2. Prolongue a reta da zona elástica, a partir do ponto O, até que ela corte a reta FD no ponto E.
3. Remarque o ponto D de modo que a medida do segmento FD seja igual a uma vez e meia o segmento FE.
4. Trace a reta OD.
5. Trace a reta MN paralela a OD, tangenciando a curva tensão - deformação.

DEFORMAÇÃO NA CURVA $\sigma \times \epsilon$

A paralela à parte elástica é utilizada para determinação da deformação plástica.

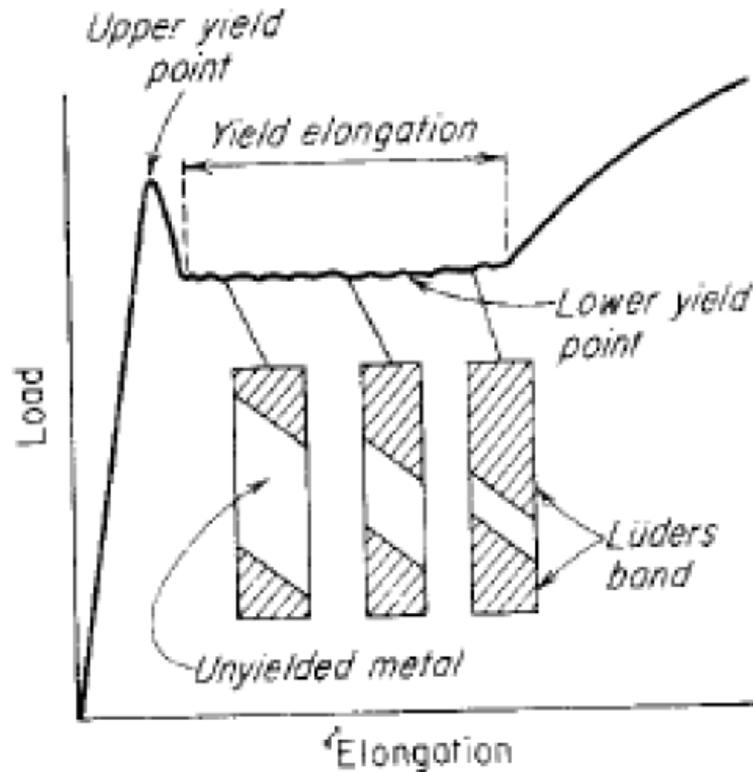
ENCRUAMENTO: AUMENTO DA TENSÃO NECESSÁRIA À DEFORMAÇÃO PLÁSTICA ATÉ O LR

RECUPERAÇÃO ELÁSTICA



DEFORMAÇÃO PLÁSTICA PERMANENTE

LIMITE DE ESCOAMENTO DESCONTÍNUO



Limite de escoamento descontínuo e bandas de Lüder (**Mechanical Metallurgy – Dieter, G.E. -1986**).

LIMITE DE ESCOAMENTO DESCONTÍNUO

- Ocorre devido à **interação de átomos intersticiais**, como carbono e nitrogênio, com **linhas de discordância**;
- Visualmente em aços ferríticos, polidos: “**bandas de Lüder**” formadas no patamar, após o limite inferior de escoamento, antes que a tensão comece a aumentar novamente (**faixas a 45°**);
- Este **ângulo** está relacionado à **direção mais compacta** da estrutura CCC da ferrita, $\langle 111 \rangle$, que sofre uma rotação e assume direção **paralela às tensões principais (σ_1 e σ_2)**, em tração;
- O fenômeno do limite de escoamento descontínuo é observado para teores de carbono de 0,002% e de nitrogênio de 0,001%.

Os **átomos intersticiais** migram para os campos de deformação das linhas de discordância promovendo o abaixamento da energia de deformação. Desse modo, **termodinamicamente é favorável** a formação de uma atmosfera de intersticiais nas vizinhanças de linhas de discordâncias. **Cottrell e Bilby** foram os primeiros a estudar este fenômeno (**1949**), por isso essas atmosferas são conhecidas como “**atmosferas de Cottrell**”.

O bloqueio do deslizamento por átomos de impurezas **não explica, por exemplo, o escoamento observado em whiskers** (monocristais praticamente isentos de defeitos) de cobre, nos quais a densidade de discordâncias é muito baixa. Surgiu então a **hipótese alternativa de que o escoamento seja governado pela cinética de multiplicação e movimentação de discordâncias**, desenvolvida em trabalhos de **Johnston e Gilman (1959) e Johnston (1962)**, e posteriormente aplicada por **Hahn (1962)** para explicar o escoamento em materiais policristalinos.

BANDAS DE LÜDER



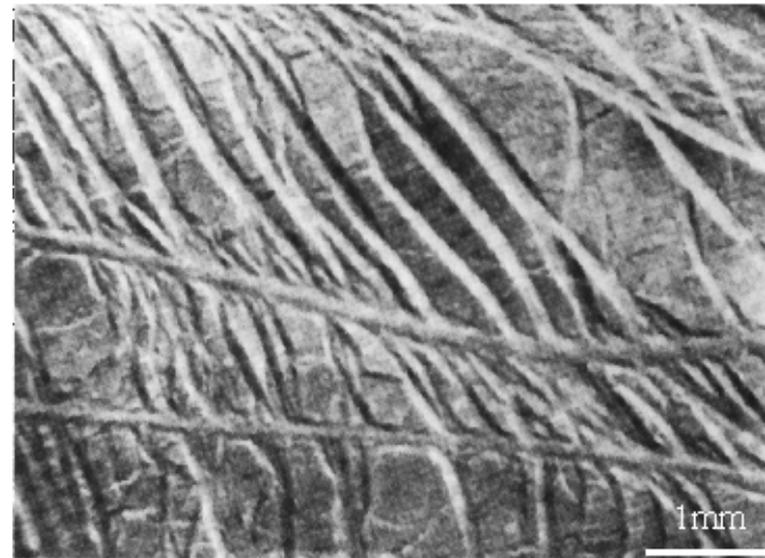
(www.pearson-studium.de)



MMM452: Manufacturing Technology IV

MMM452/6TB/1999

Luders Bands in Pressed Steel



EFEITO PORTEVIN-LE CHATELIER

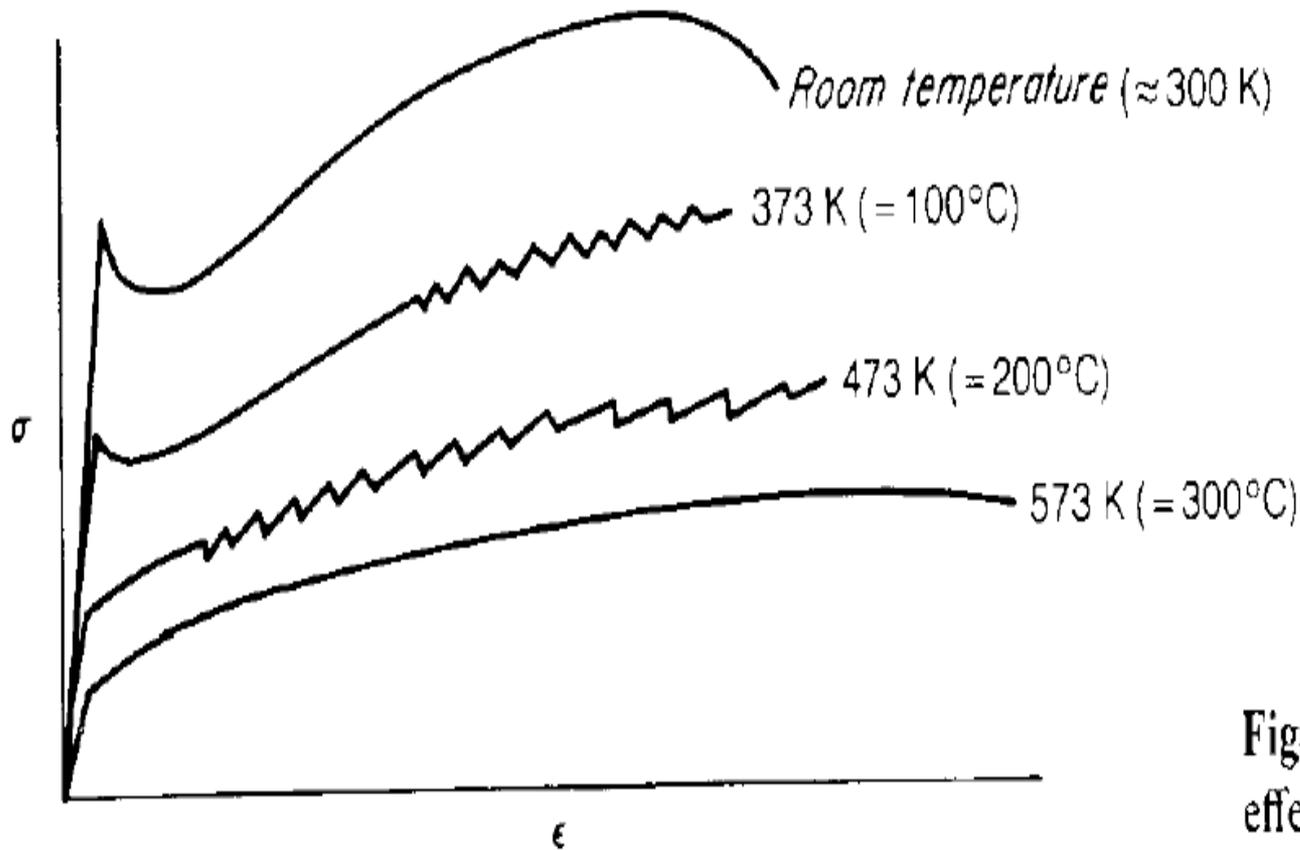


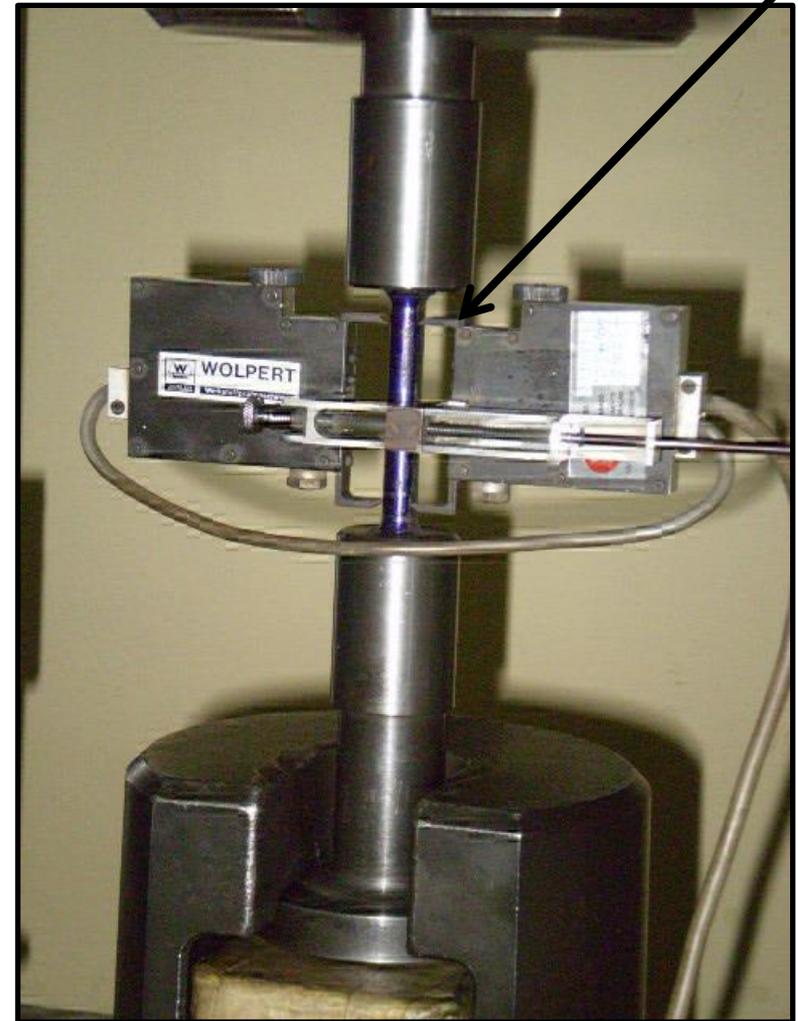
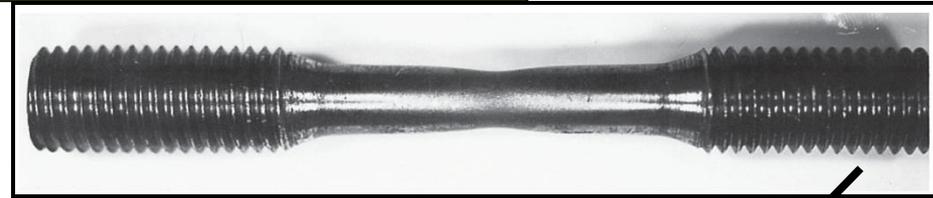
Figure 6-10 Portevin-LeChatelier effect in iron (schematic).

EFEITO PORTEVIN-LE CHATELIER

Com o fornecimento de **energia térmica** ao sistema, aumenta a mobilidade de solutos, I.é., **difusão** de **C** e **N**, ou solutos pequenos e **intersticiais**. com deformação em temperaturas médias (**100 - 200°C**).

As linhas de discordâncias são **desancoradas** ou **novas discordâncias são formadas**, estas são novamente **capturadas** por atmosferas de soluto, fazendo com que apareça o **serrilhado na parte da deformação plástica**. Os **primeiros** a estudarem o assunto foram **A. Portevin e F. Le Chatelier, Paris, 1926**.

ENSAIO DE TRAÇÃO



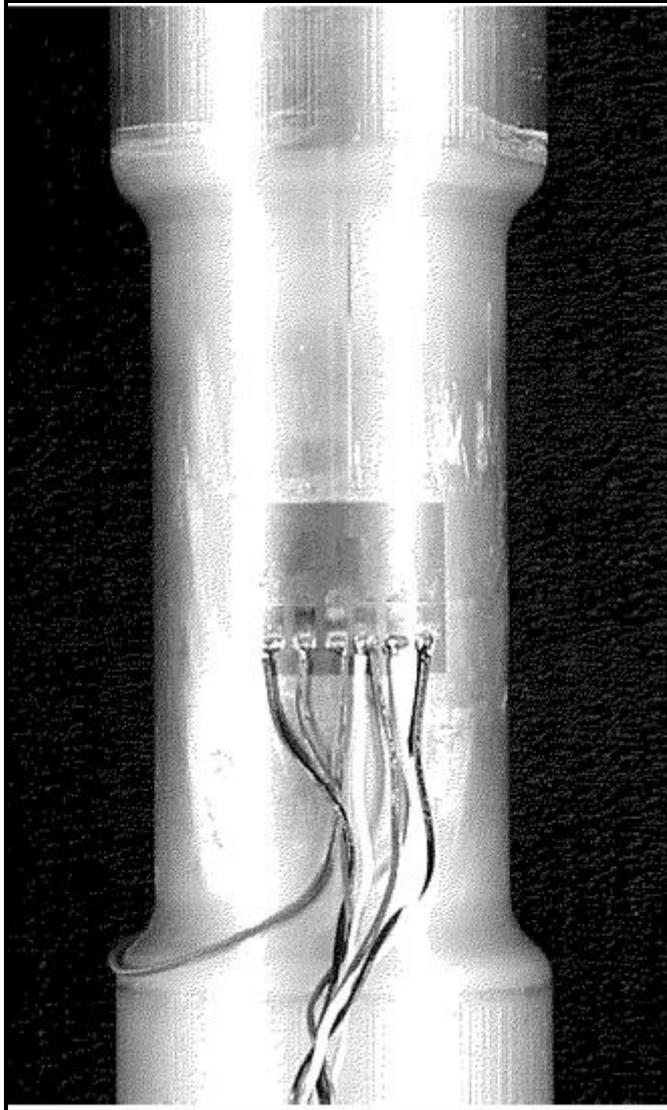
ENSAIO DE TRAÇÃO

EXTENSÔMETRO: DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE ESCOAMENTO

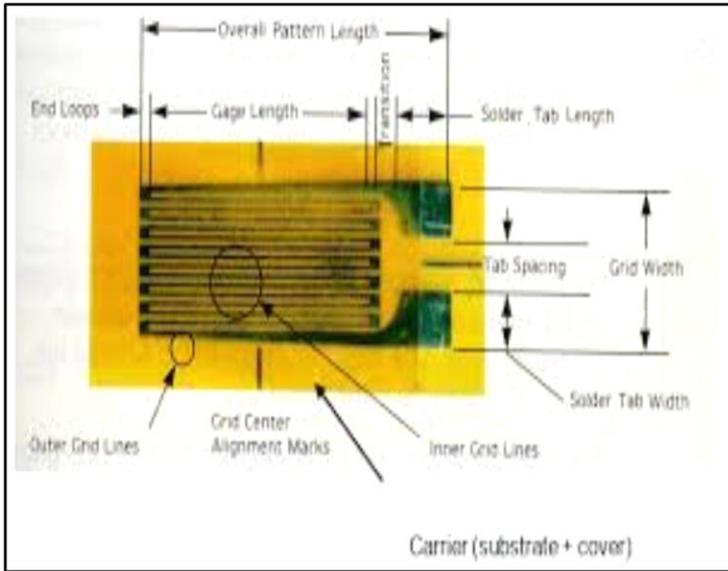


ENSAIO DE TRAÇÃO

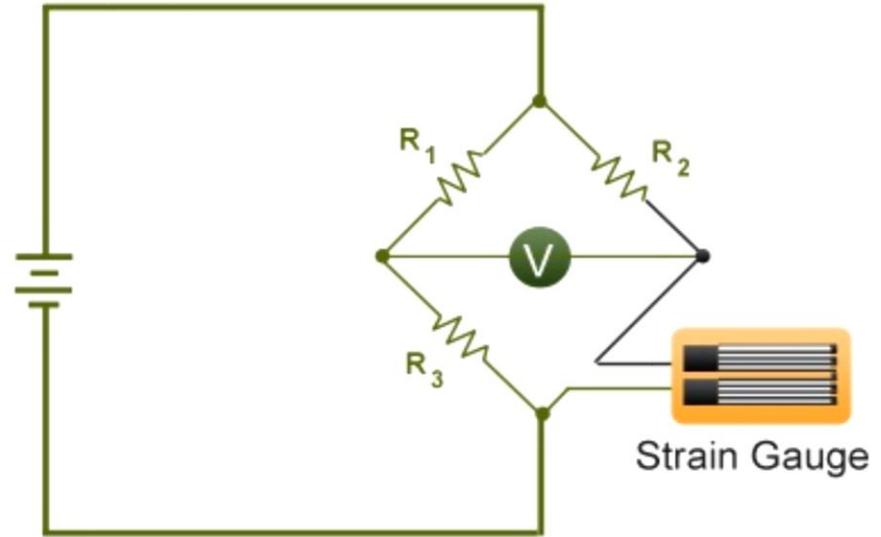
Extensômetro (“strain Gage”)



(ASM METALS HANDBOOK, VOL.8)



Quarter-bridge Strain Gauge Circuit



© Chipkin Automation Systems Inc.

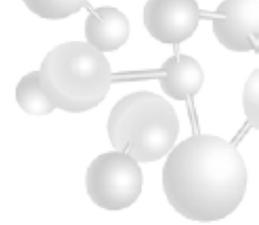


$$\Delta R = GF \times \epsilon \times R$$

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

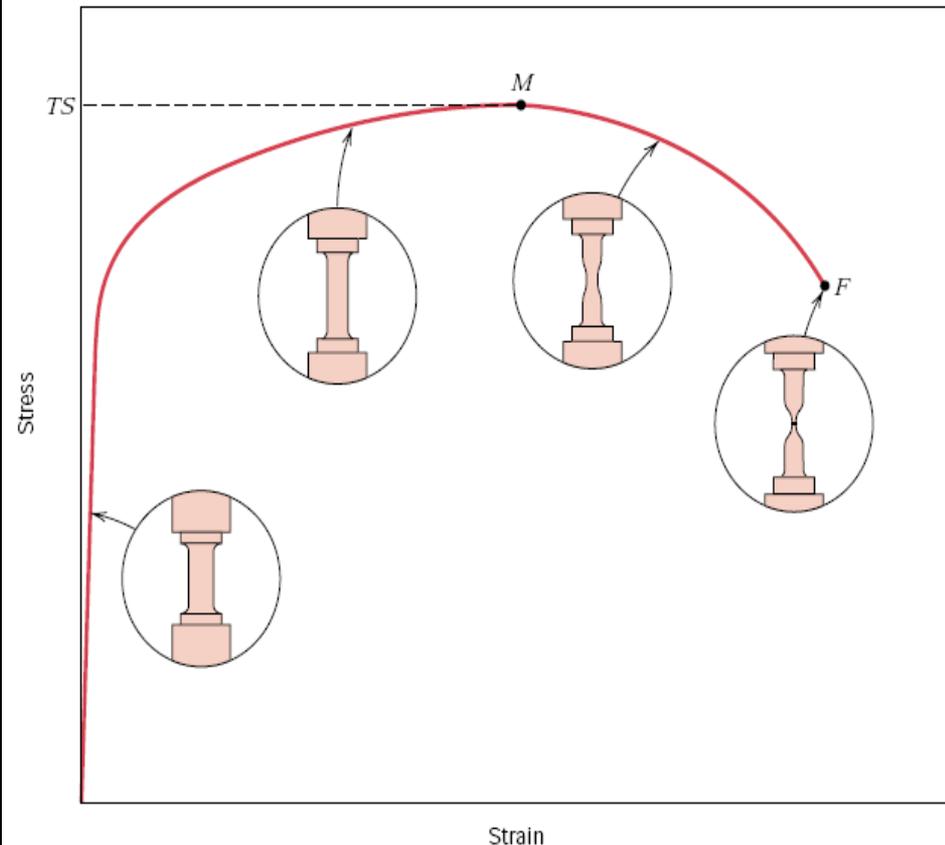


Limite de resistência à tração



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

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



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**).

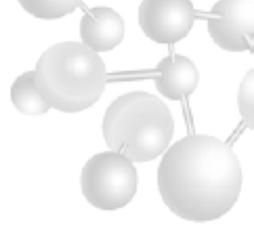
Ductilidade

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

Medidas de ductilidade no ensaio de tração

- **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.
 - Independente de A_0 e L_0 e em geral é \square de $AL\%$

Módulo de Tenacidade



Capacidade um material **absorver energia até a fratura**;

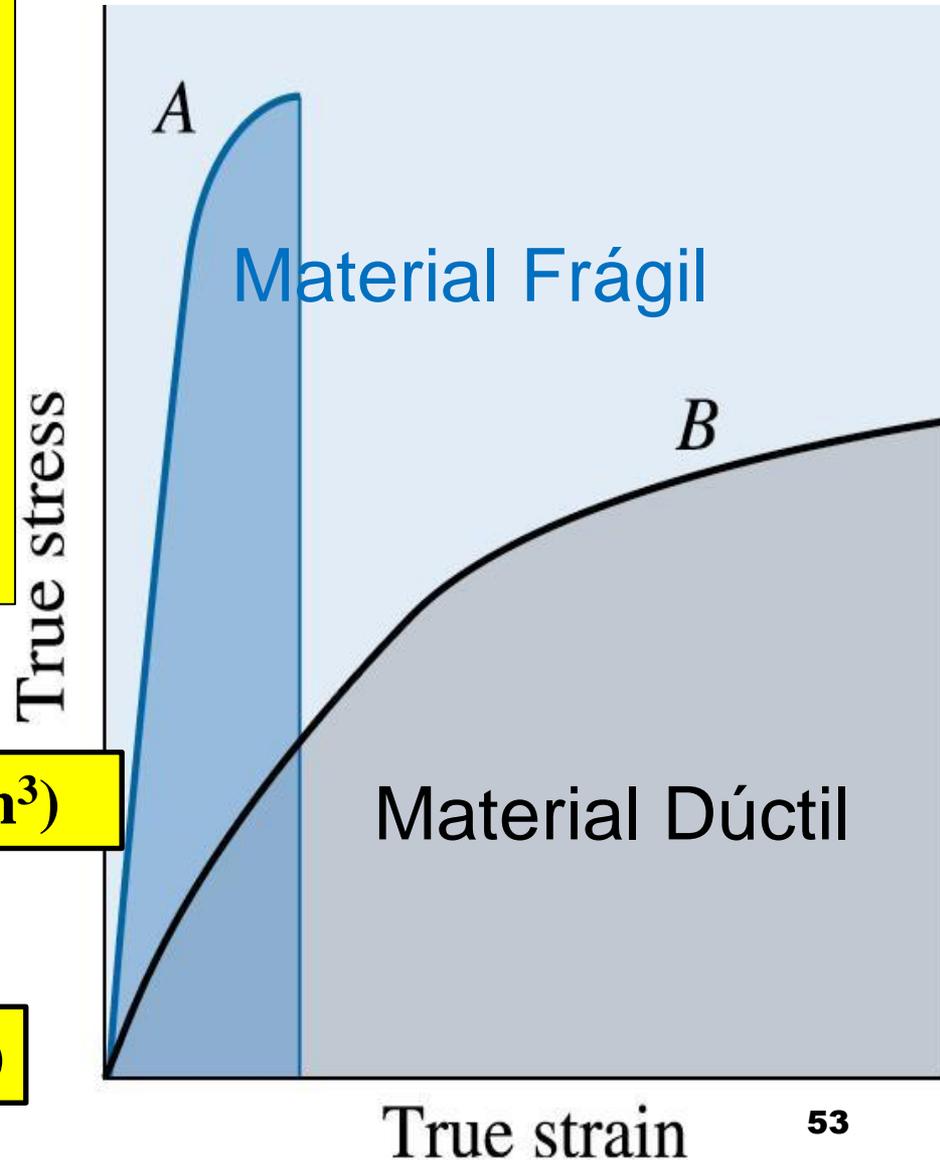
Pode ser determinada a partir da **curva $\sigma \times \epsilon$** . Ela é a área sob a curva; Para que um material seja tenaz, deve apresentar certa resistência e ductilidade. **Materiais dúcteis são mais tenazes que os frágeis.**

Materiais Dúcteis

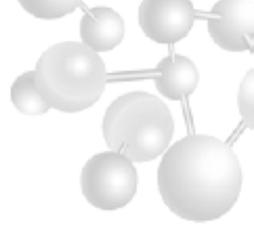
$$U_t = (\sigma_{esc} + \sigma_{LRT})/2 \cdot \epsilon_{fratura} \quad (\text{N.m/m}^3)$$

Materiais Frágeis

$$U_t = (2/3) \cdot \sigma_{LRT} \cdot \epsilon_{fratura} \quad (\text{N.m/m}^3)$$



Módulo de Resiliência



Definição: Capacidade de um material **absorver energia** sob tração quando ele é deformado **elasticamente** e devolvê-la quando relaxado (**recuperar**).

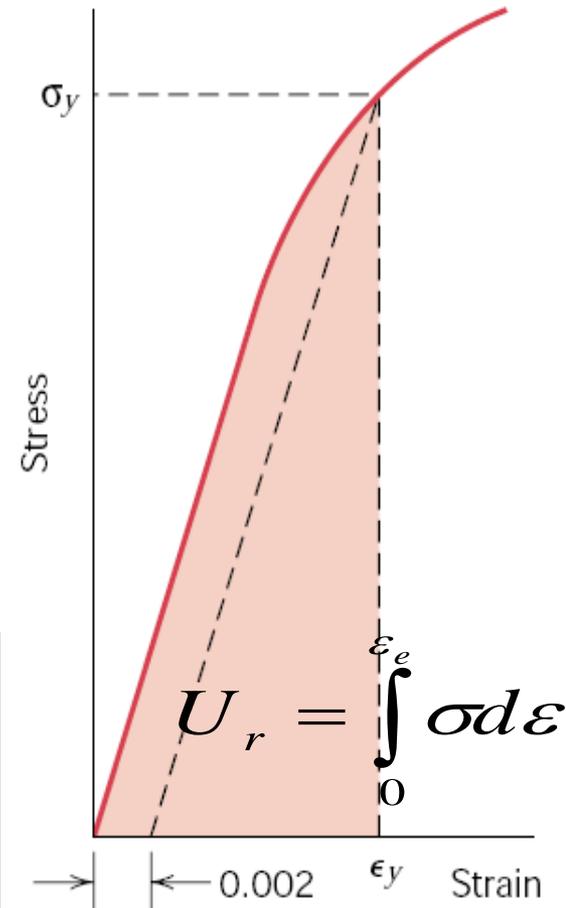
Para **aços carbono** varia de **35 a 120 MJ/m³**

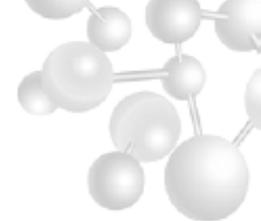
O módulo de resiliência é dado pela área da curva tensão-deformação até o escoamento ou através da fórmula:

$$U_r = \int_0^{\epsilon_e} \sigma d\epsilon$$

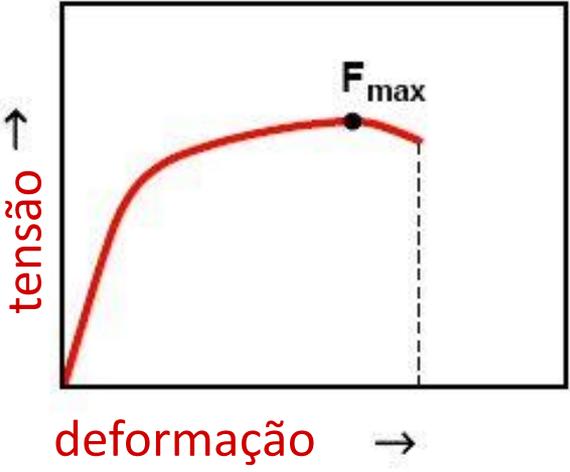
Na região linear $U_r = \sigma_y \epsilon_y / 2 = \sigma_y (\sigma_y / E) / 2 = \sigma_y^2 / 2E$

Assim, materiais de **alta resiliência** possuem **alto limite de escoamento** e **baixo módulo de elasticidade**. Estes materiais seriam ideais para uso em **molas**.





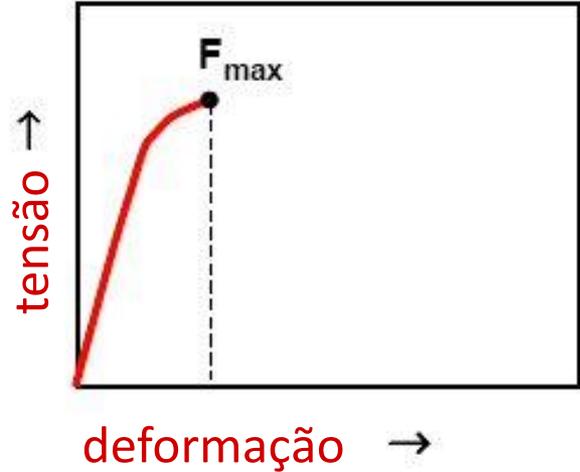
Tipos de material e as curvas de $\sigma \times \epsilon$



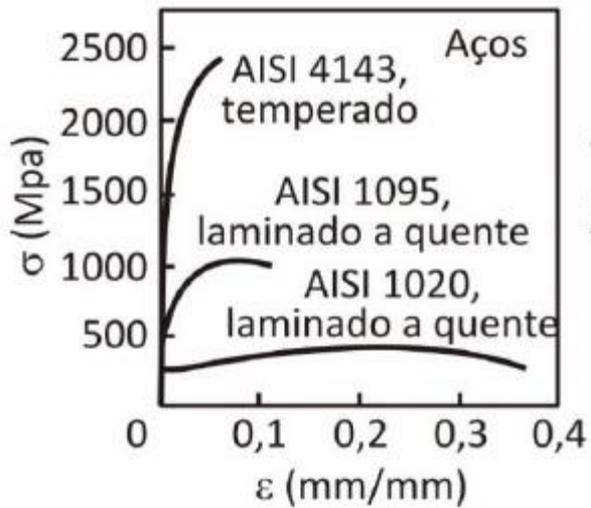
• Normal



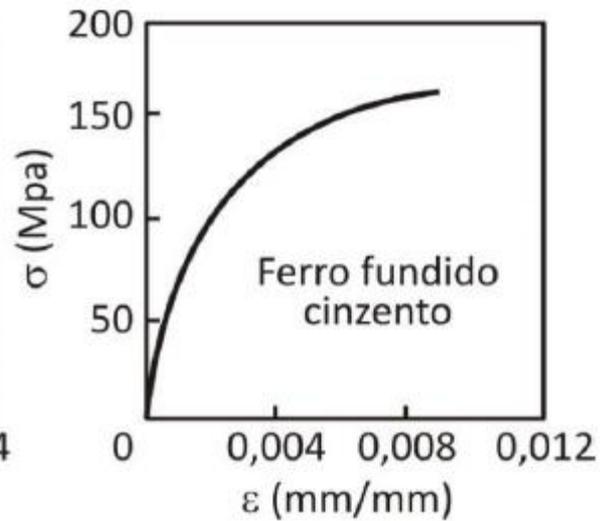
• Material dúctil (cobre)



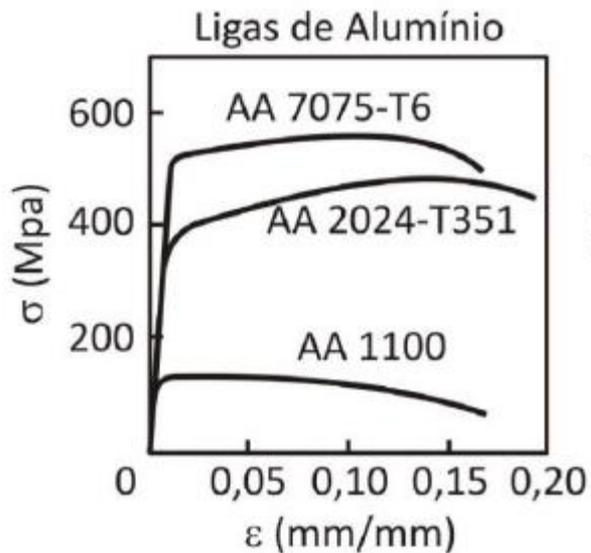
• Material frágil (ferro fundido e cerâmicas)



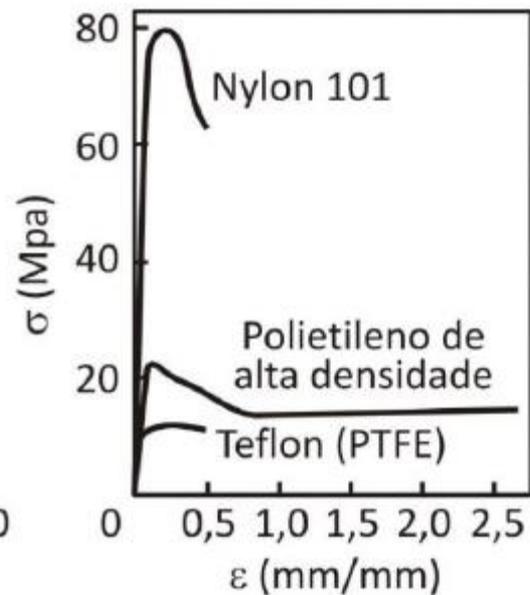
(a)



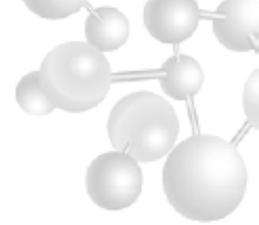
(b)



(c)



(d)

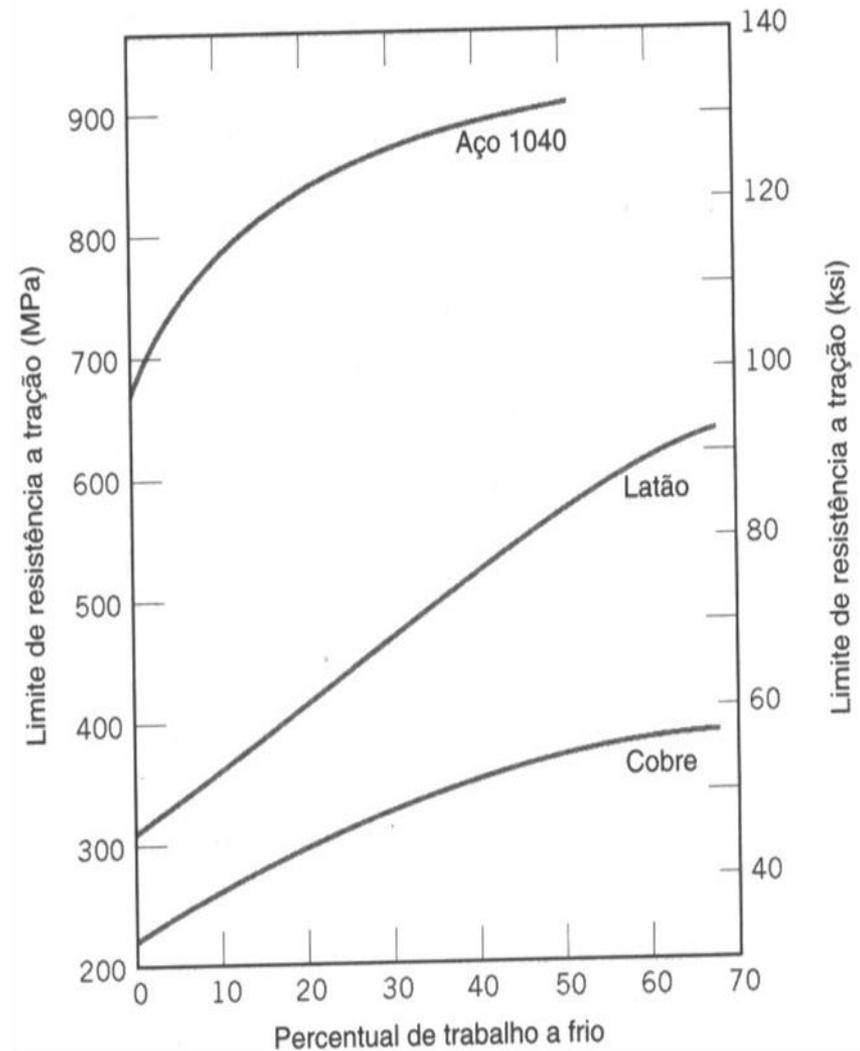


Propriedades em tração

<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

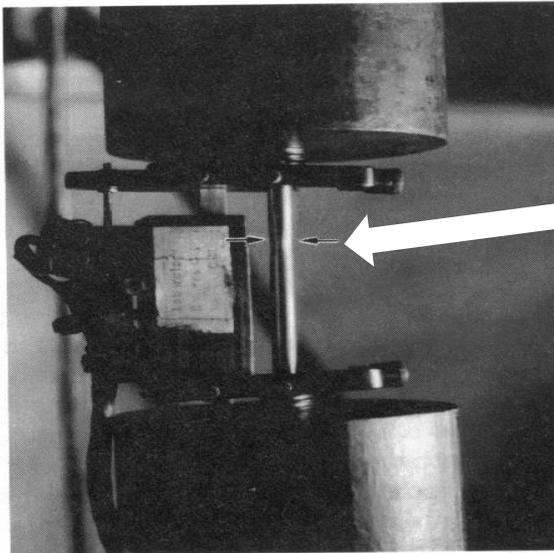
Encruamento

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



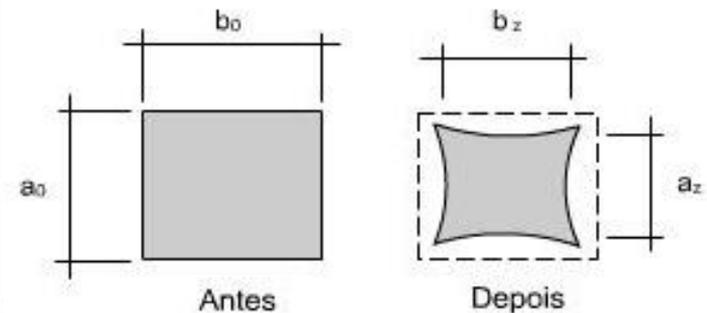
Empescoçamento - Estricção

- 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.



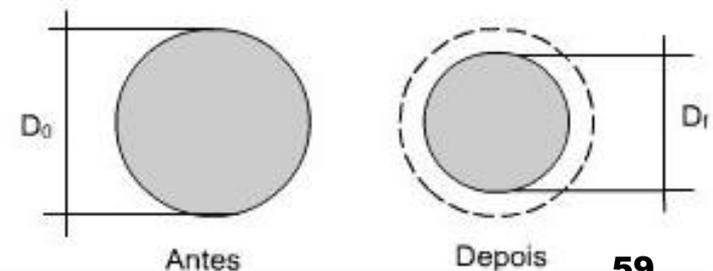
Redução da área no teste de tração - CP seção retangular

$$\varphi = q \times 100 = \frac{(a_z b_z - a_0 b_0)}{a_0 b_0} \times 100$$

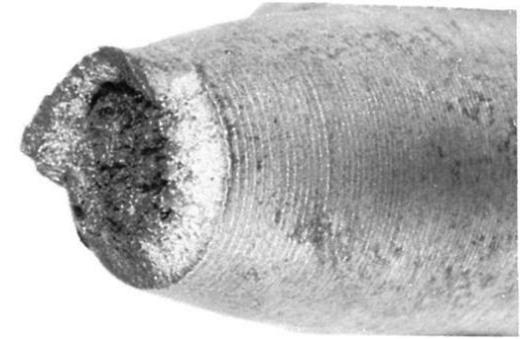


Redução da área no teste de tração - CP seção circular

$$\varphi = q \times 100 = \frac{(D_0^2 - D_f^2)}{D_0^2} \times 100$$

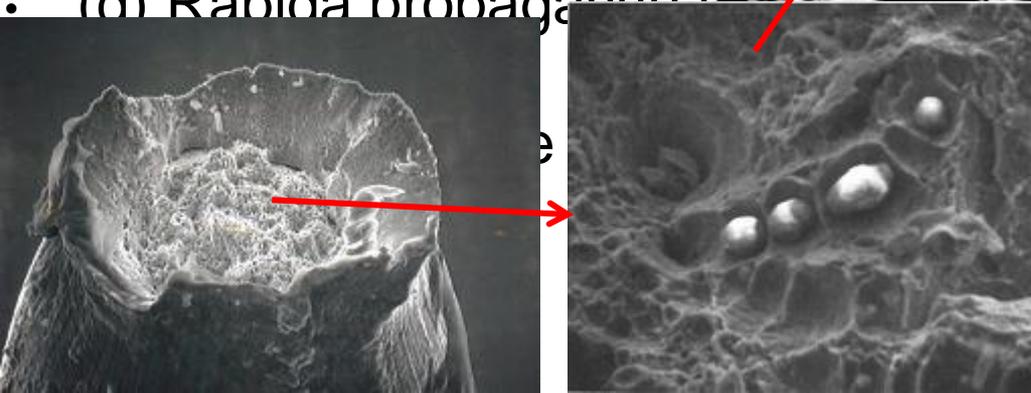
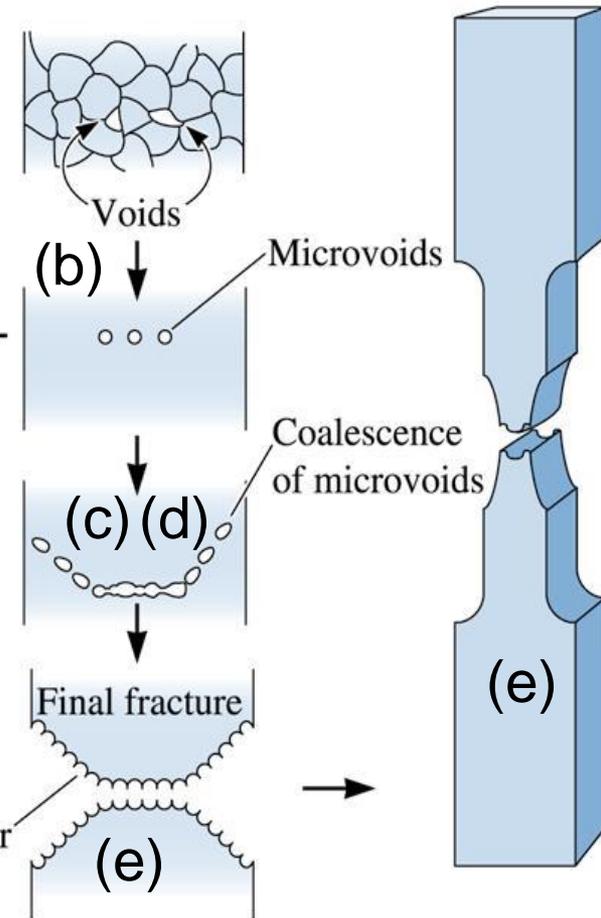
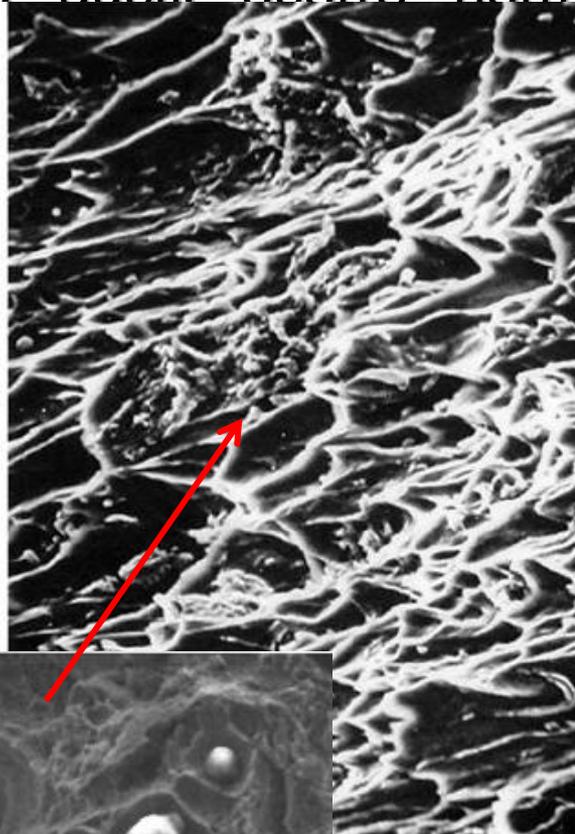


Fratura dúctil

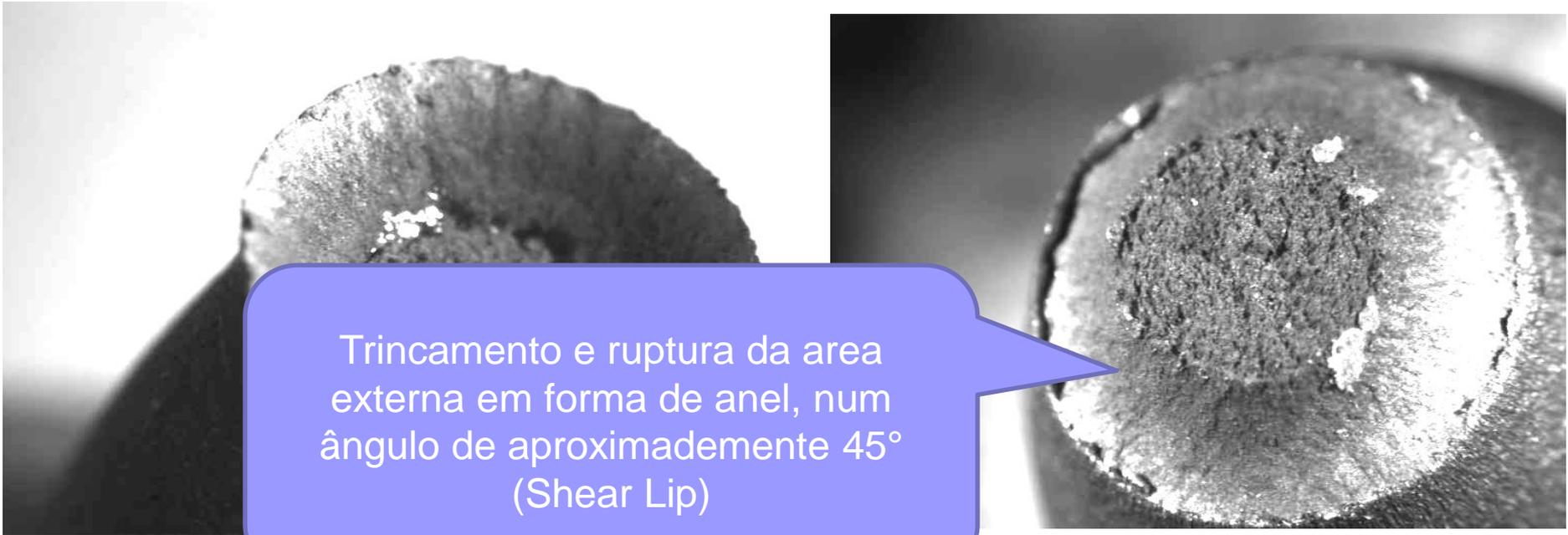


O processo de fratura dúctil ocorre normalmente em vários estágios

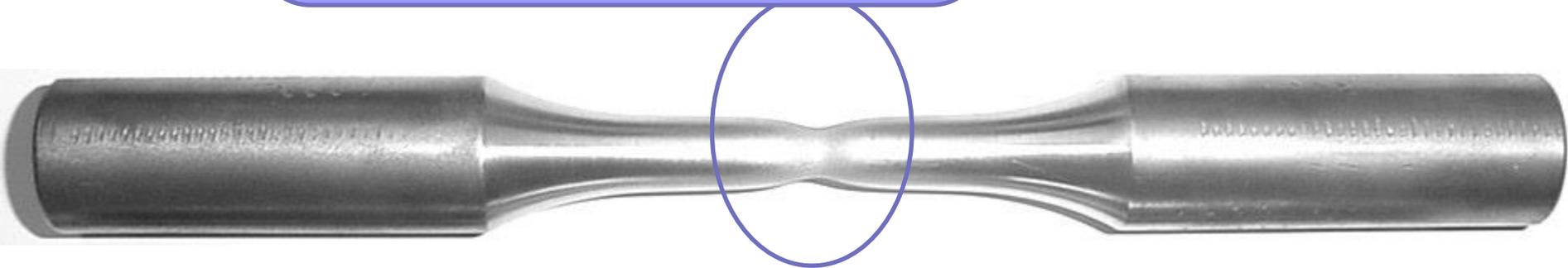
- (a) Empescoçamento inicial
- (b) Pequenas cavidades microvazios se formam
- (c) Microvazios aumentam e coalescem para formar elíptica
- (d) Rápida propagação



Fratura dúctil (Tipo Taça Cone)



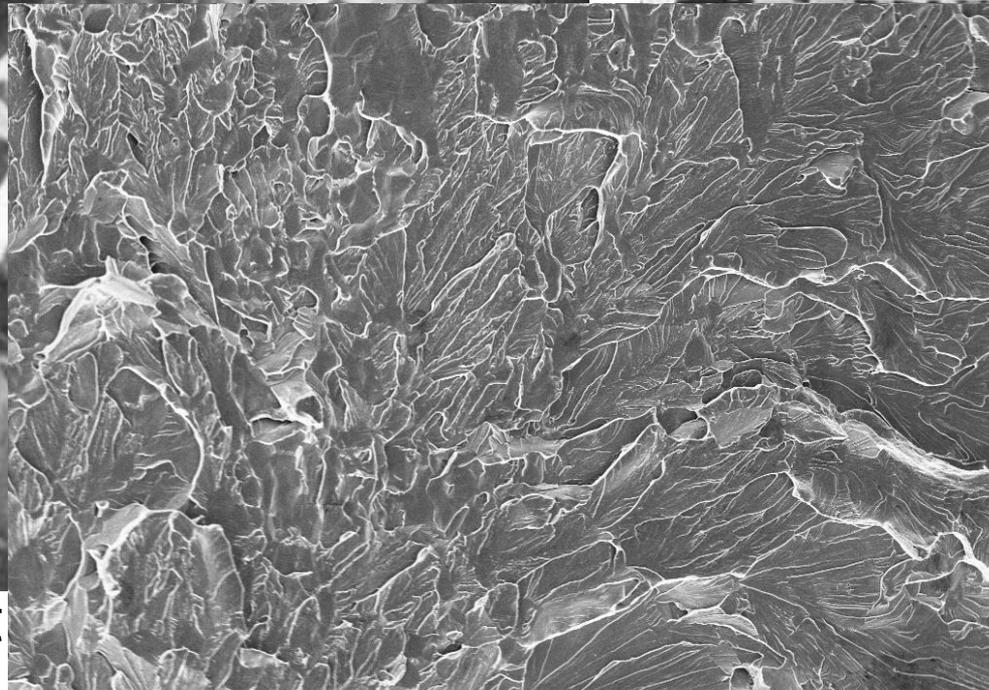
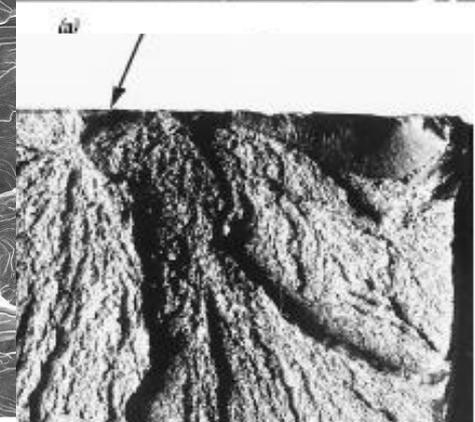
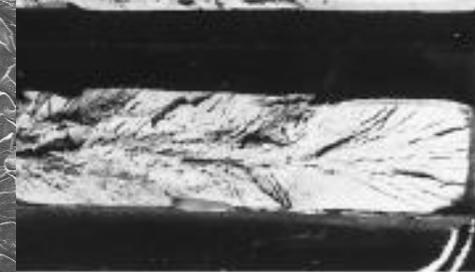
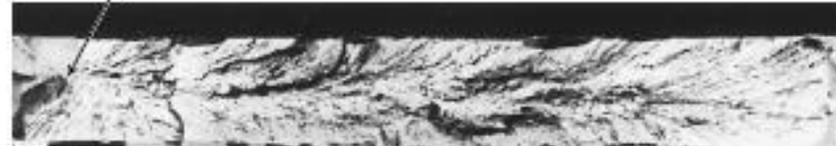
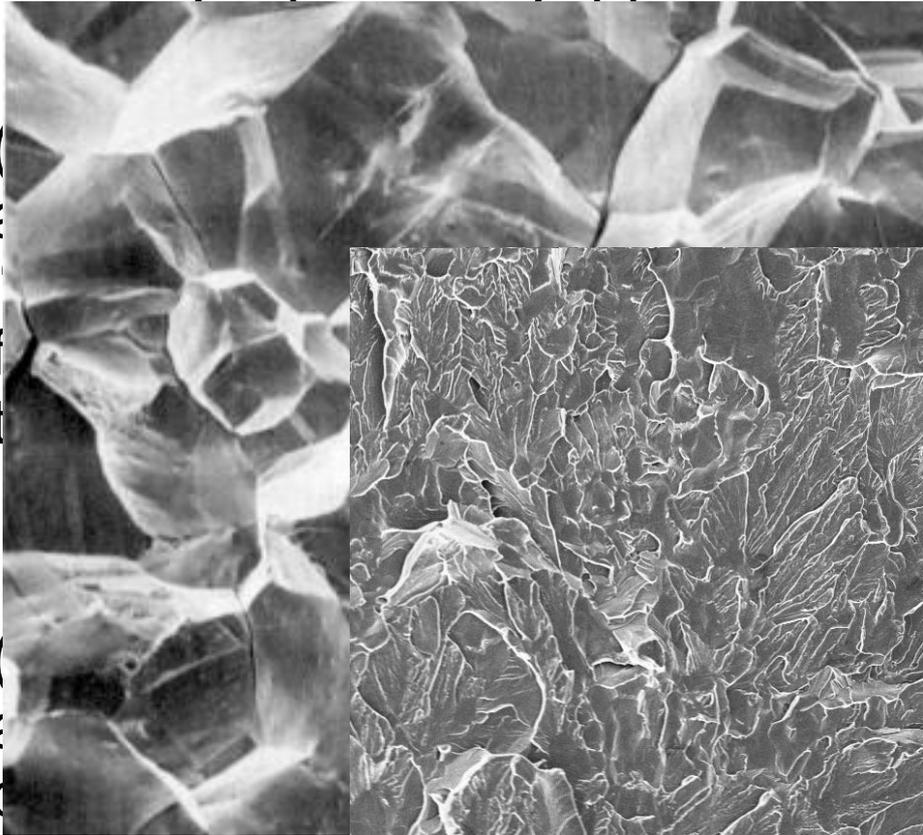
Trincamento e ruptura da area externa em forma de anel, num ângulo de aproximadamente 45° (Shear Lip)



Fratura frágil



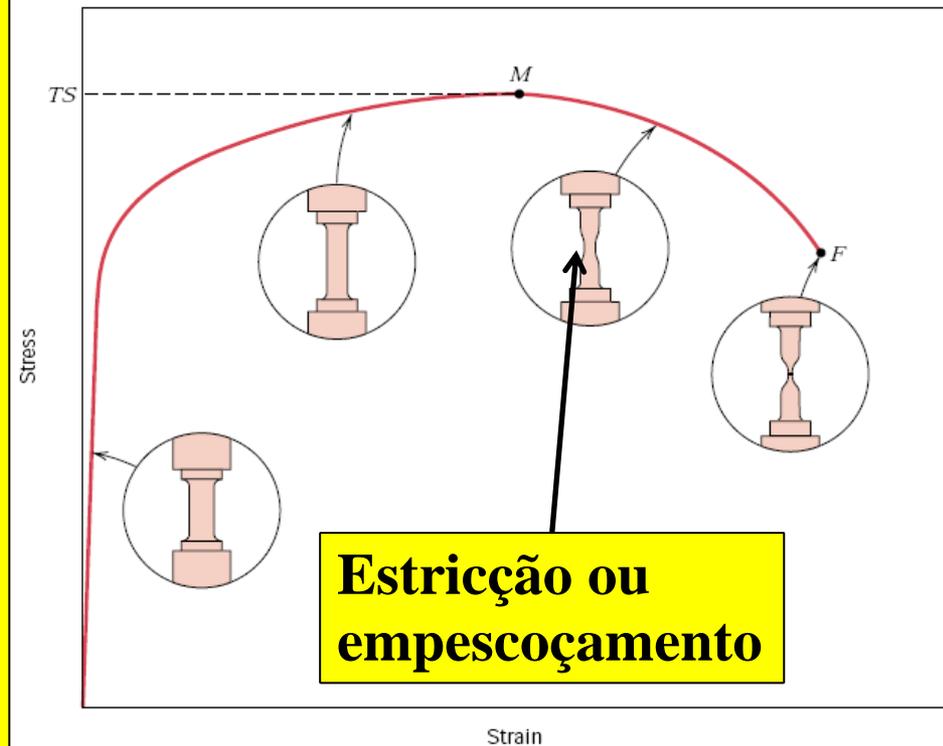
Fratura frágil ocorre sem qualquer deformação apreciável e formação de trincas



origem da t
leque

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**;
- Resulta em uma redução na capacidade do corpo em suportar carga;
- A **tensão calculada** nessa carga é baseada na **área inicial** e não leva em conta o **pescoço**.



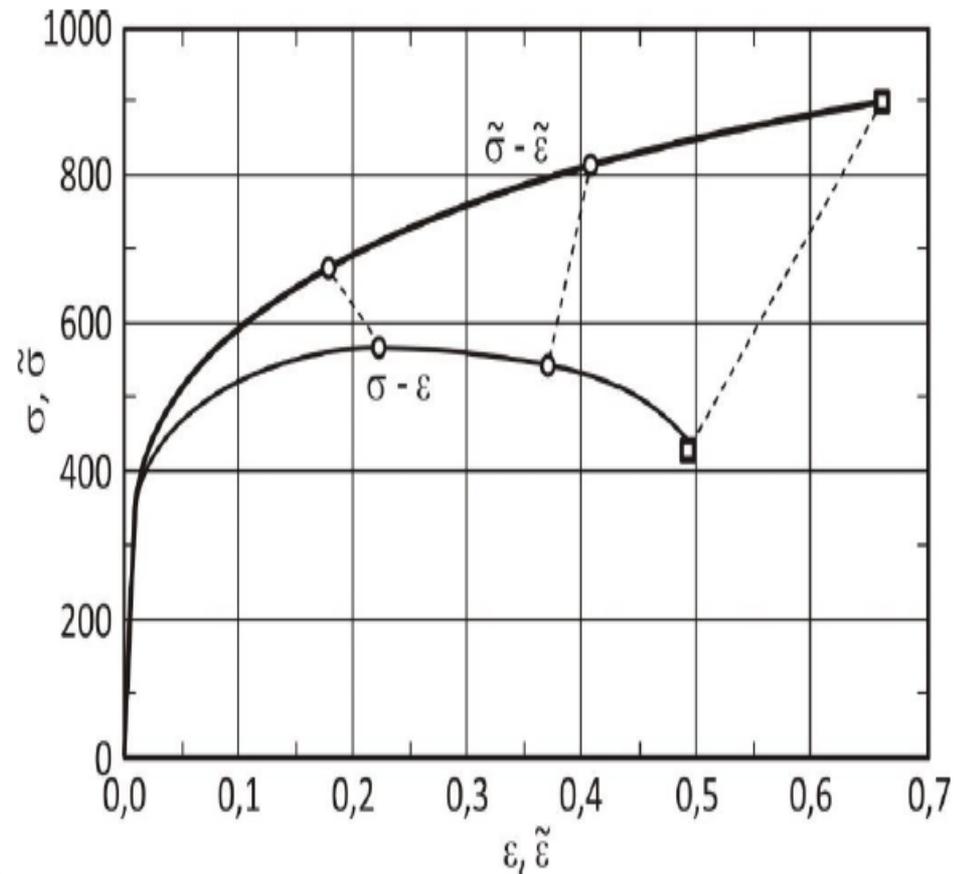
Tensão Verdadeira e Deformação Verdadeira

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

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

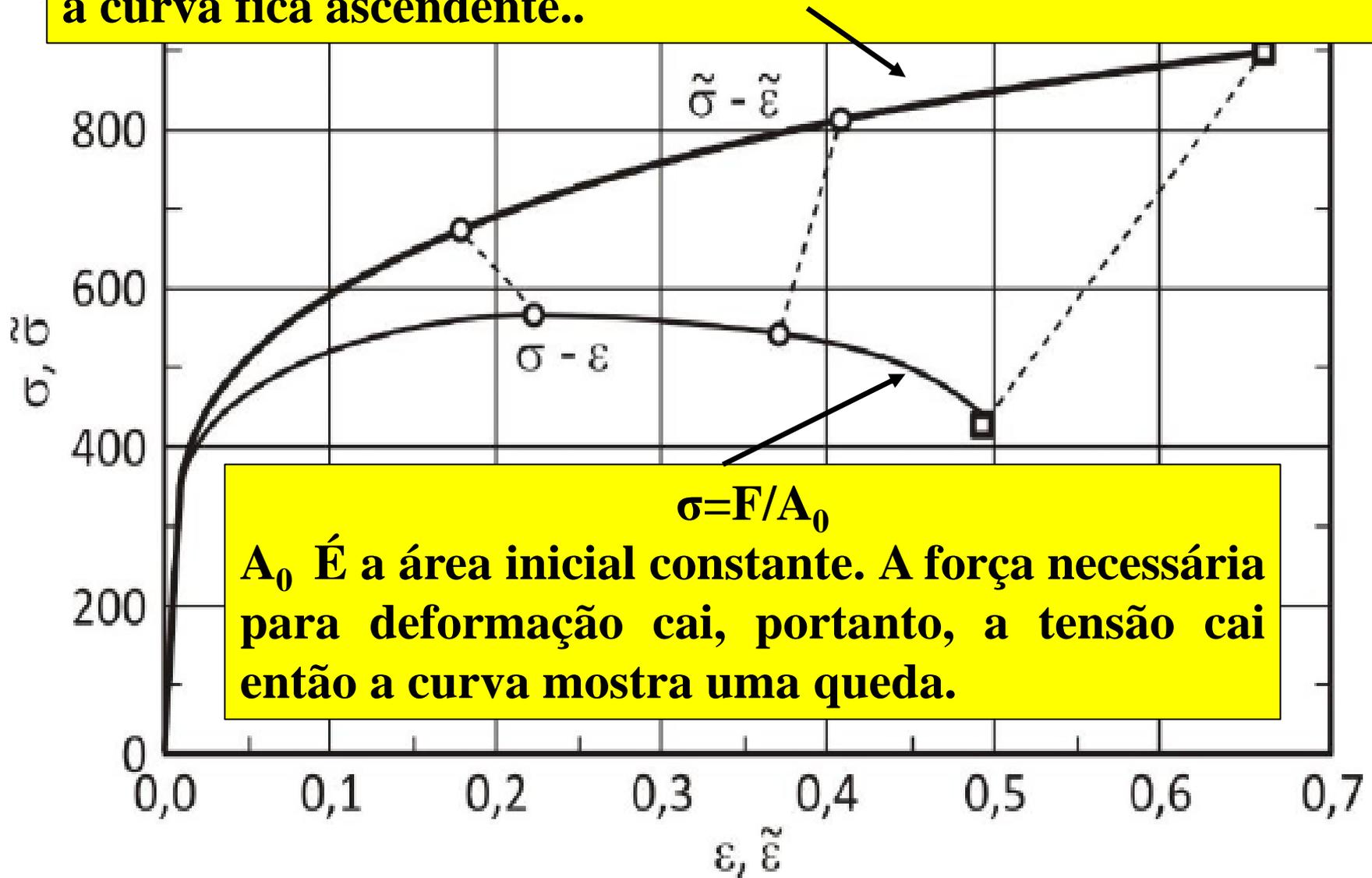
A Deformação Verdadeira é definida pela expressão

$$d\varepsilon_r = \frac{dl}{l} \quad \varepsilon_r = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}$$



$$\sigma = F/A_i$$

A_i É a área instantânea e cai mais rápido que a força. Assim, a curva fica ascendente..



$$\sigma = F/A_0$$

A_0 É a área inicial constante. A força necessária para deformação cai, portanto, a tensão cai então a curva mostra uma queda.

Relações entre Tensões e Deformações Reais e Convencionais

■ Deformação

$$\varepsilon_C = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1$$

$$\frac{l}{l_0} = 1 + \varepsilon_C$$

$$\varepsilon_r = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon_C)$$

Geralmente,
representa-se

$$\varepsilon_C = \mathbf{e}$$

■ Tensão

$$\ln \frac{S_0}{S} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon_C)$$

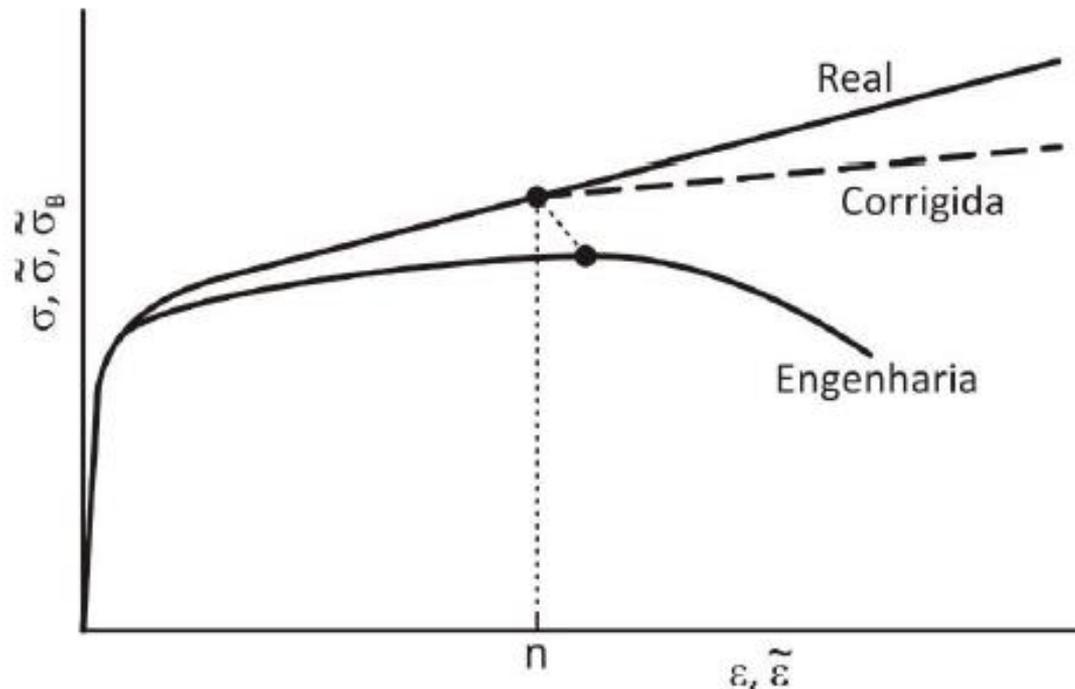
$$S = \frac{S_0}{1 + \varepsilon_C}$$

$$\sigma_r = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_0} (1 + \varepsilon_C)$$

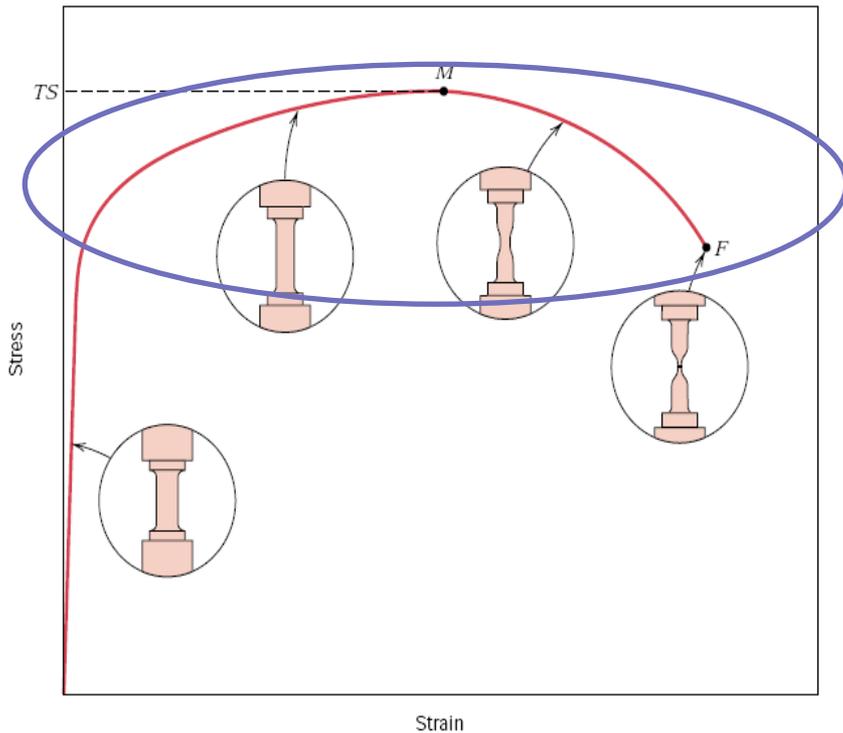
$$\sigma_r = \sigma_C (1 + \varepsilon_C)$$

Correção de Bridgman

O fenômeno da **estricção (empescoçamento)**, após o **limite de resistência à tração**, especialmente para materiais dúcteis, leva a alterações na distribuição de tensões, gerando um estado triaxial de tensões. É necessária uma correção da curva tensão-deformação verdadeira. Percy W. Bridgman propôs uma equação para essa correção, em 1944.



TENSÃO PARA A REGIÃO DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA



$$\sigma = K\varepsilon^n$$

K e **n** são constantes que dependem do material e da condição: tratados termicamente ou encruados

K= coeficiente de resistência (quantifica o nível de resistência que o material pode suportar)
n= expoente de encruamento (representa a capacidade com que o material distribui a deformação)



K e n para alguns materiais

Material	n	K (MPa)
Aço baixo teor de carbono recozido	0,26	530
Aço 4340 recozido	0,15	640
Aço inox 304 recozido	0,45	1275
Alumínio recozido	0,2	180
Liga de Alumínio 2024 T	0,16	690
Cobre recozido	0,54	315
Latão 70-30 recozido	0,49	895

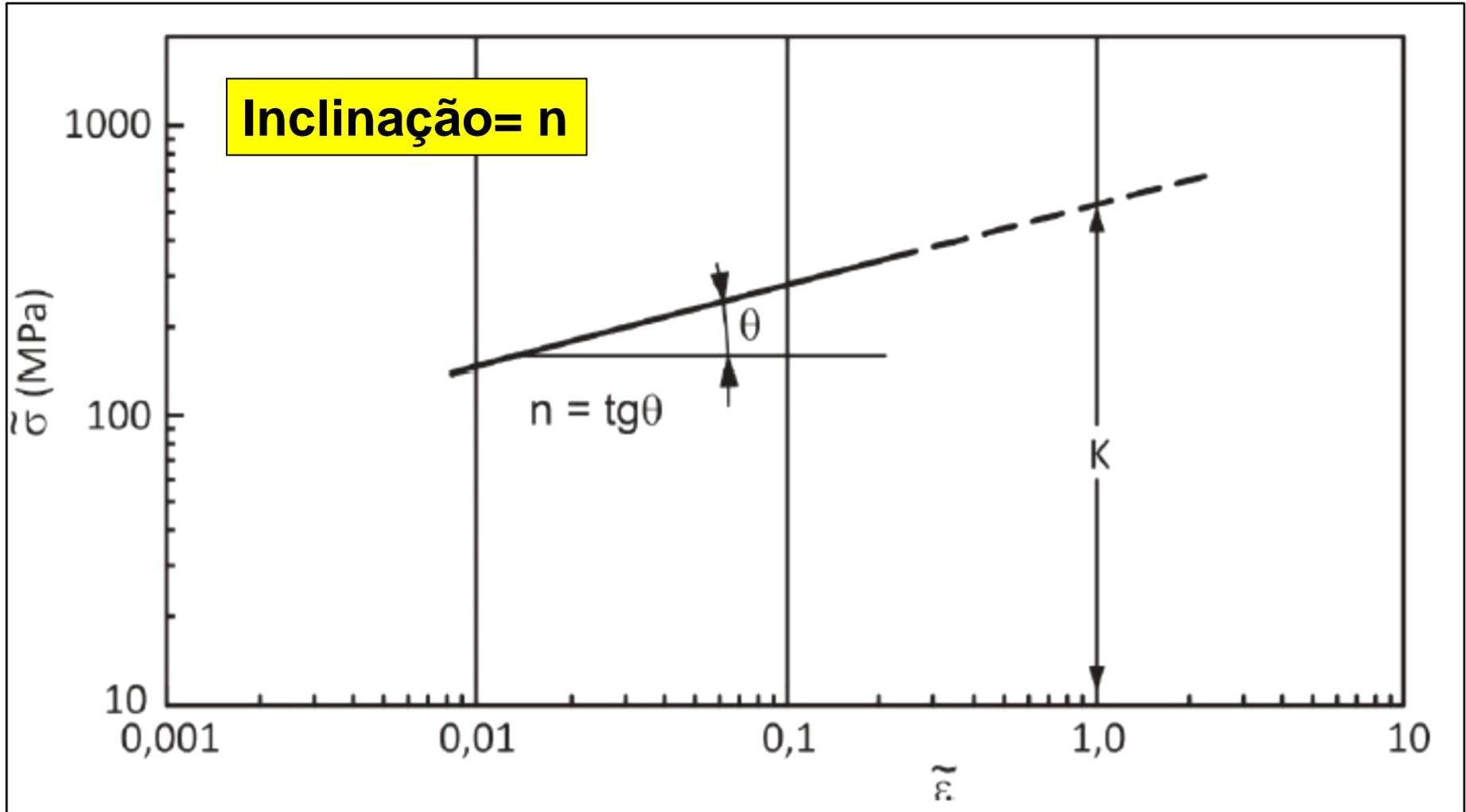
Determinação de K e n: aplica log e constrói a reta

$$\sigma = K\varepsilon^n$$

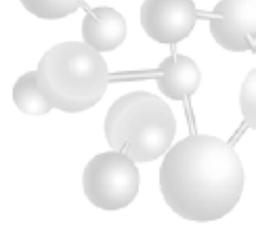
$$\text{Log } \sigma = \log k + n \log \varepsilon$$

Inclinação= n

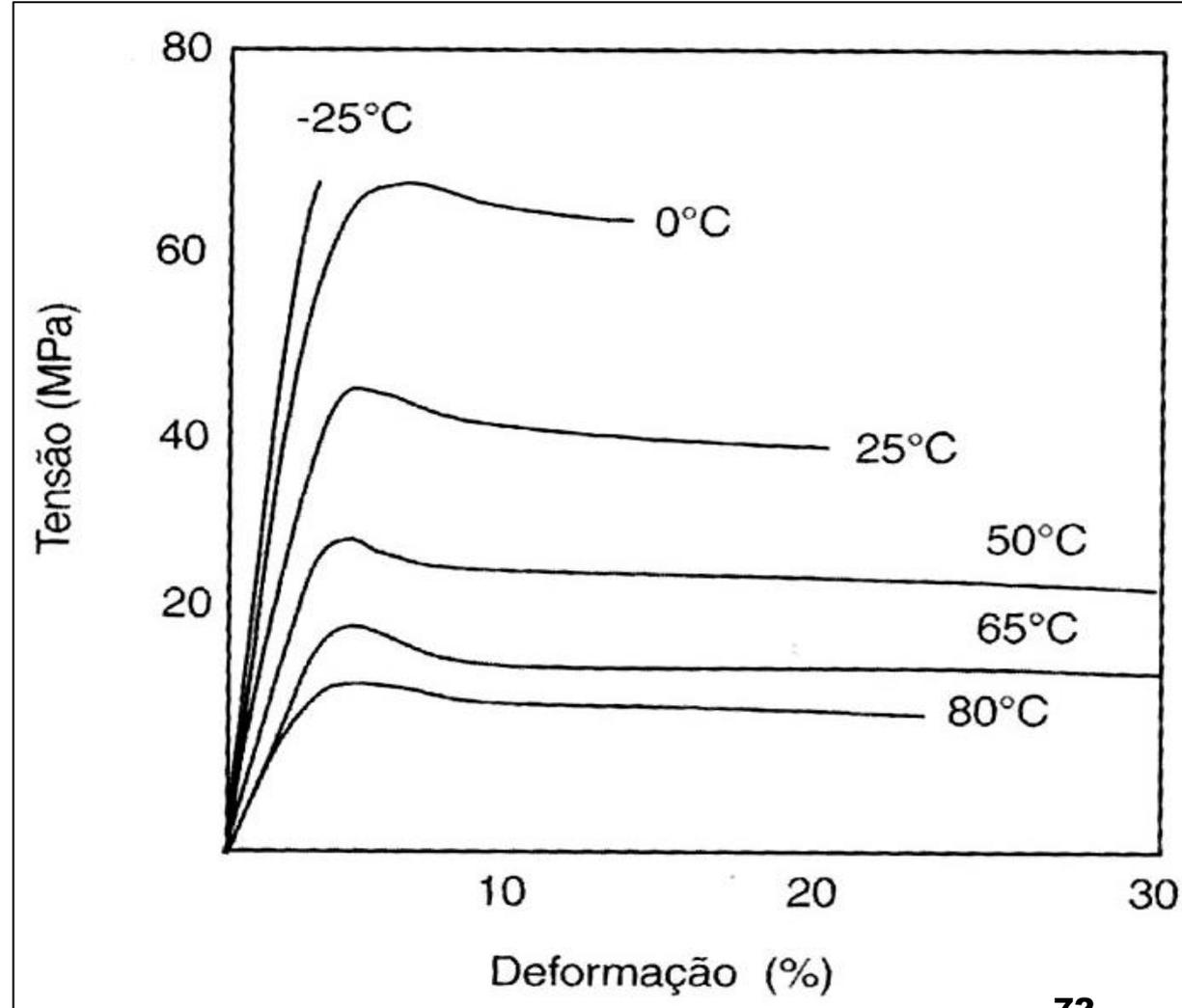
$$\text{Log } \sigma = \text{log } k + n \text{ log } \varepsilon$$



Efeito da temperatura

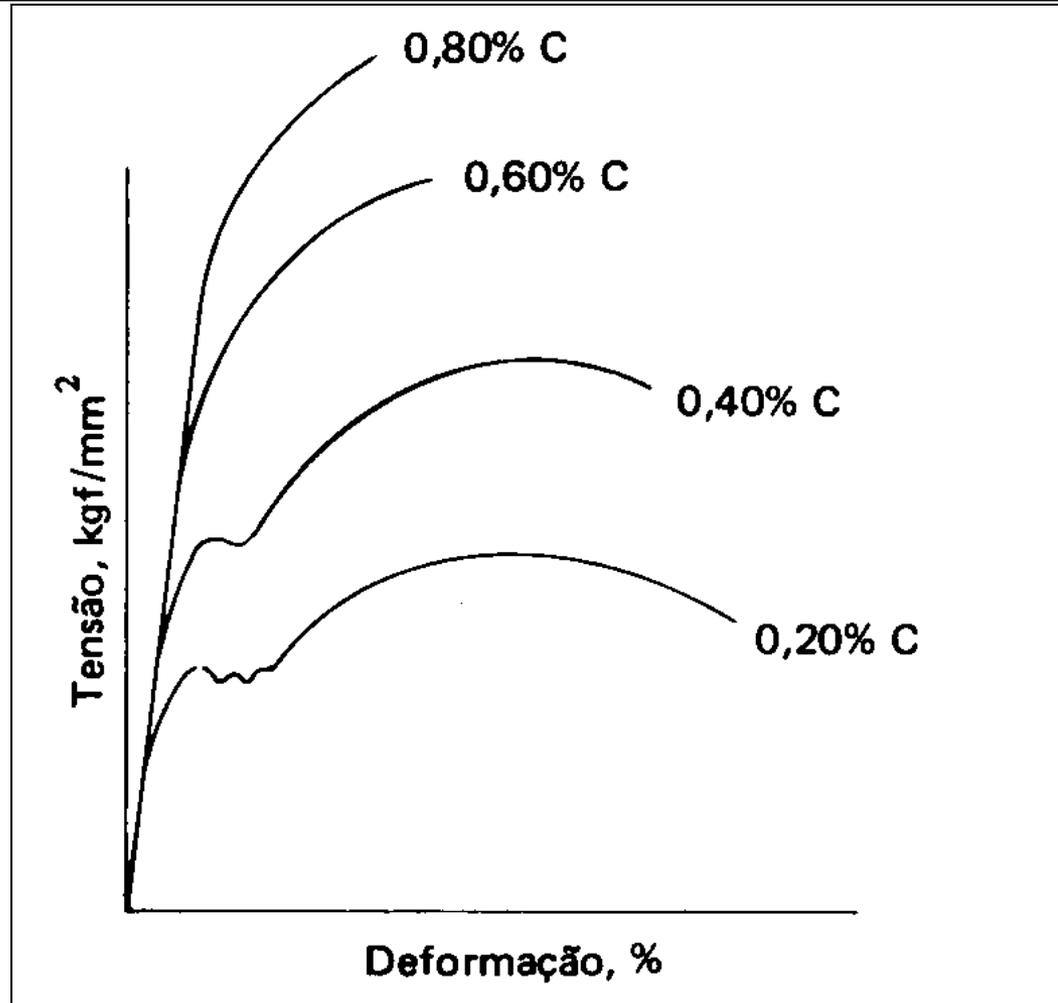


Em geral, a **resistência diminui** e a **ductilidade aumenta** com o aumento de temperatura.



Efeito %C nas Propriedades de Tração

- **Baixo** % de carbono – Menor LE, Menor LR. **dúctil e tenaz;**
- **Alto** % de carbono – Maior LE, Maior LR. **Duro e frágil.**
- E constante.





FIM