



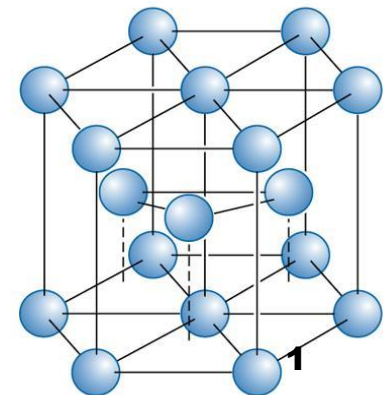
Universidade de São Paulo  
Escola de Engenharia de São Carlos  
Departamento de Engenharia de Materiais



# Tração, compressão, fluência e fadiga

**SMM0193- Engenharia e Ciência dos  
Materiais I**

Prof. Dr. José Benedito Marcomini

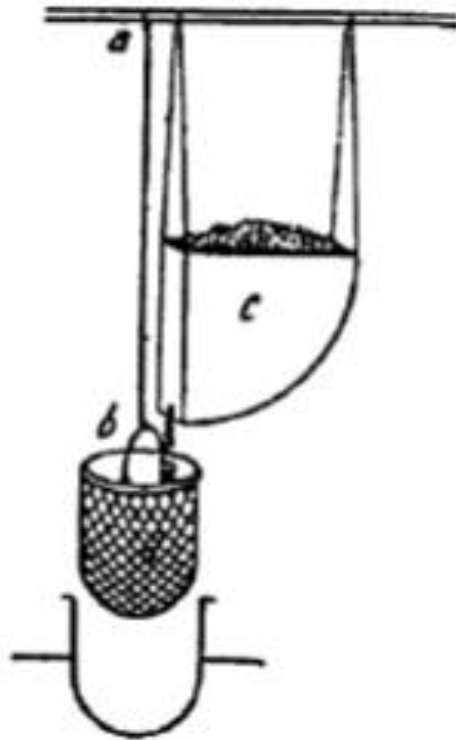




# TRAÇÃO

# 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)**

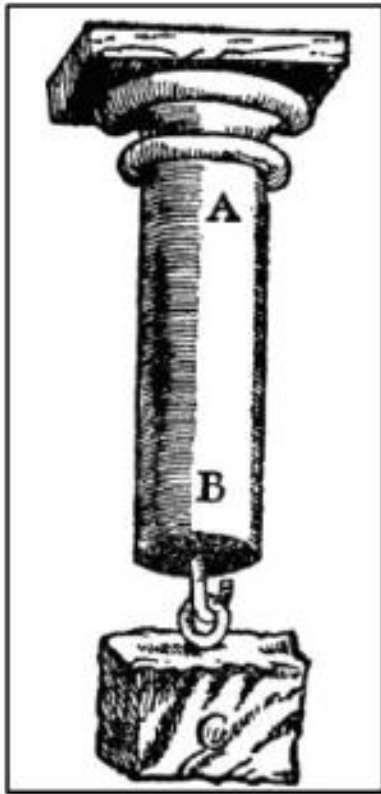


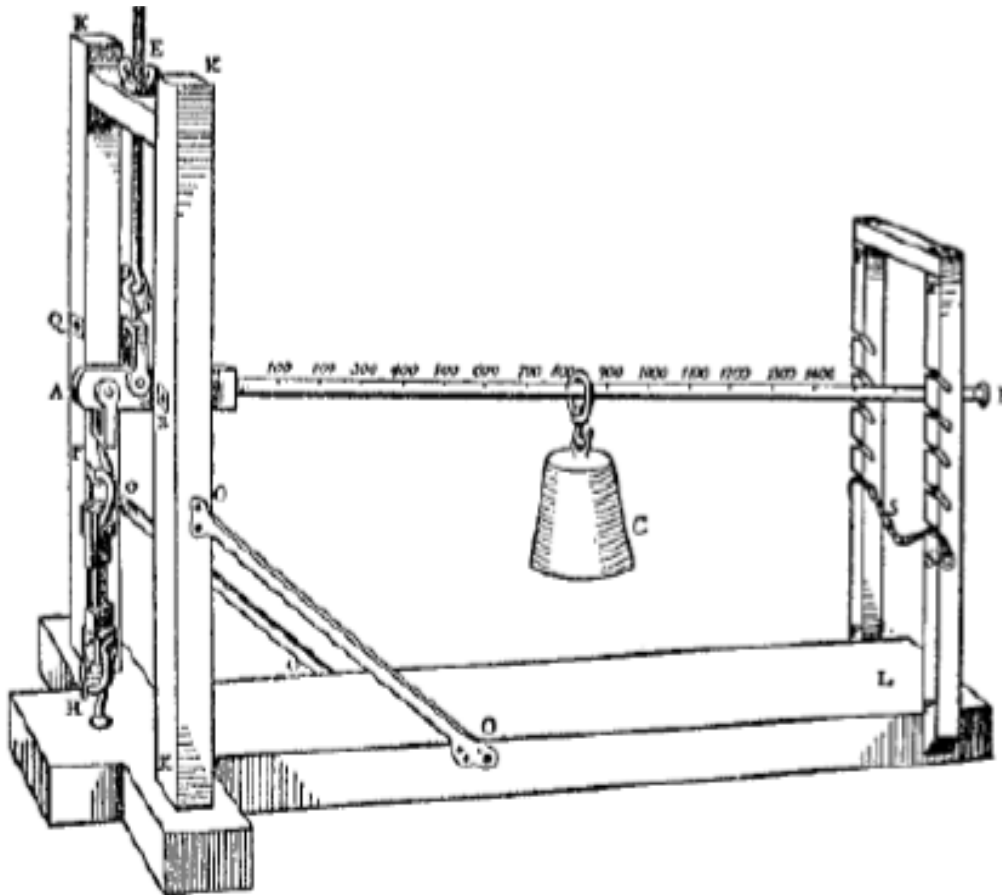
Ilustração de Galileu para o ensaio de tração.

**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).**

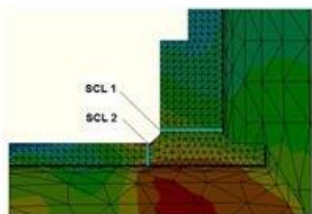
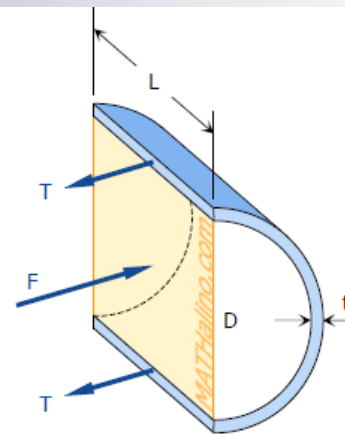
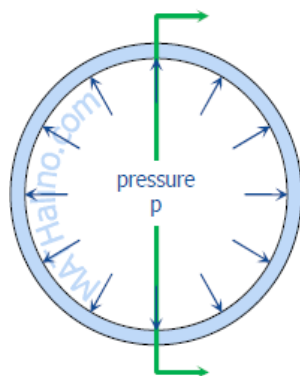
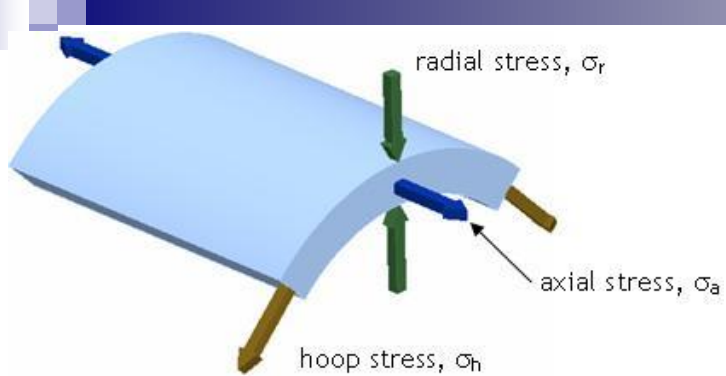
# ENSAIO DE TRAÇÃO

**P. Van Musschenbroek (1692-1761)**

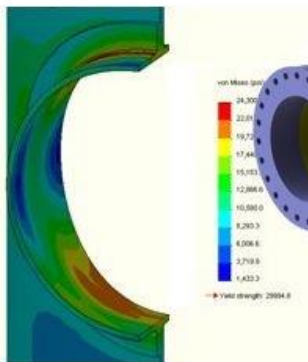
Máquina de tração de Musschenbroek.



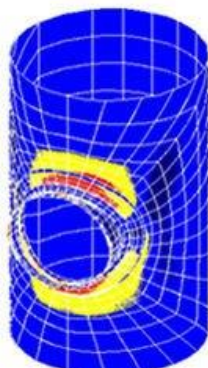
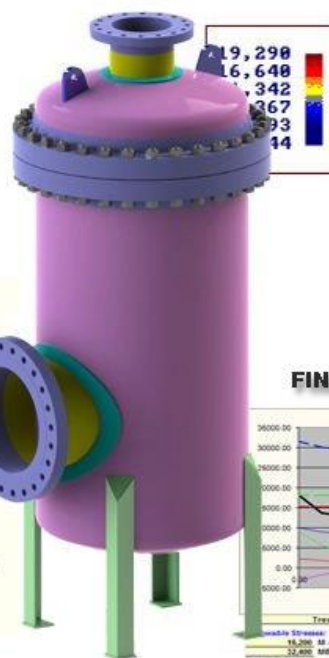
**“Physicae  
Experimentales et  
Geometricae”,  
publicado em 1729**



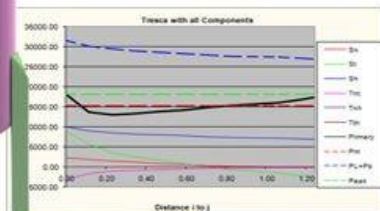
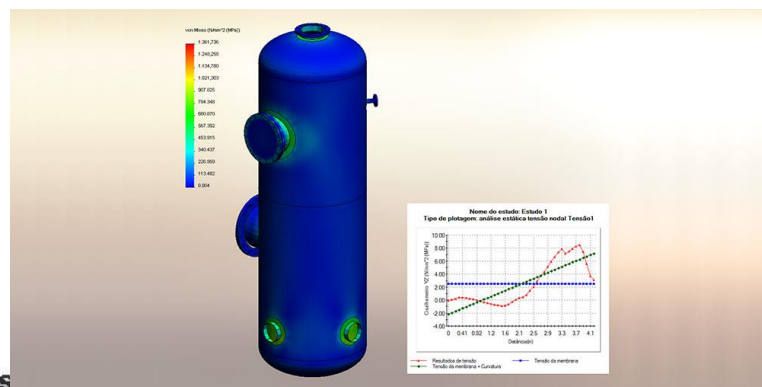
STRESS LINEARIZATION



STRESS RESULT



FINITE ELEMENT ANALYSIS



Weldable Stresses:

15,200	48	Shear/Plane Allowable (Max Pin for girth or R for local stresses)
33,400	88	Shear/Plane-Bending Allowable (Max Pin for girth or Pin/2-G for Local)

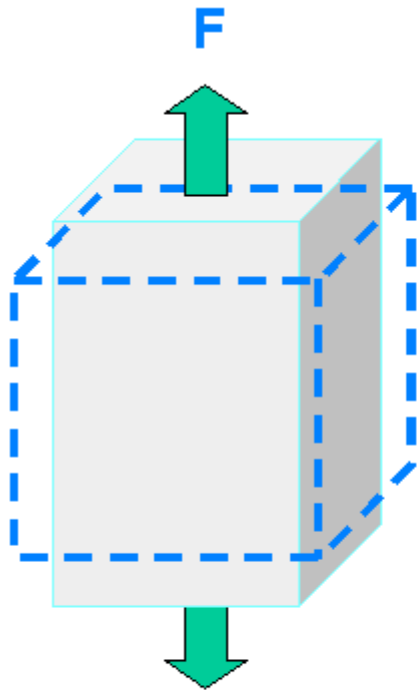
Actual Tensile Stresses:

15,200	Acceptable	Membrane
15,200	Acceptable	Bending
27,663	Acceptable	Membrane + Bending
15,198	Acceptable	Peak

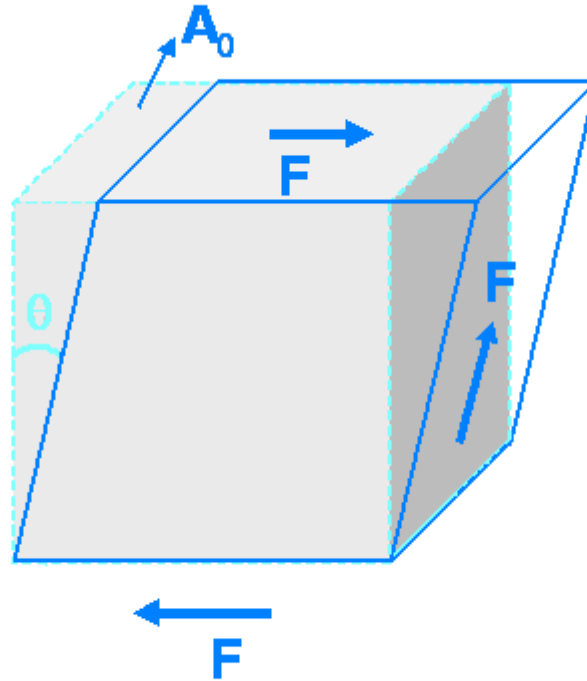
3 nodes found on the stress classification line (SCL) and being code upon interpolated to 75 equally spaced nodes.

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

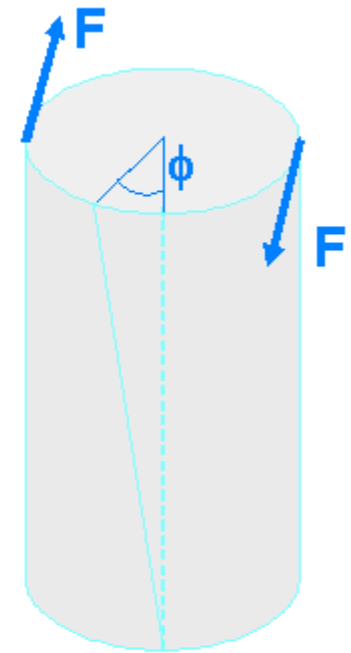
# TIPOS DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES QUE UMA ESTRUTURA ESTA SUJEITA



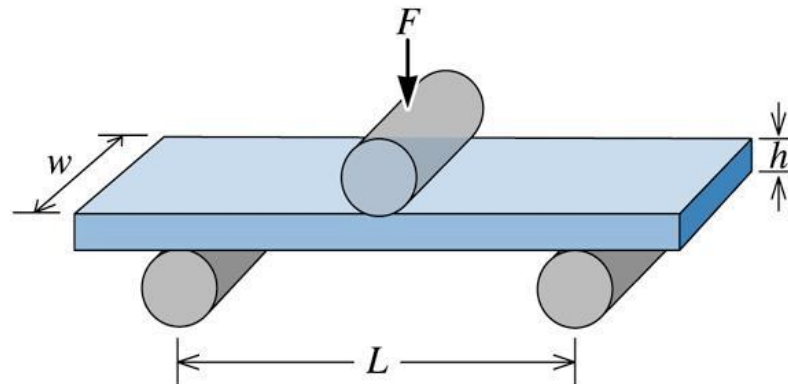
**F**  
TRAÇÃO  
ou  
compressão



**F**  
CISALHAMENTO



TORÇÃO



Flexão

# Cisalhamento

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

- Tensão cisalhante

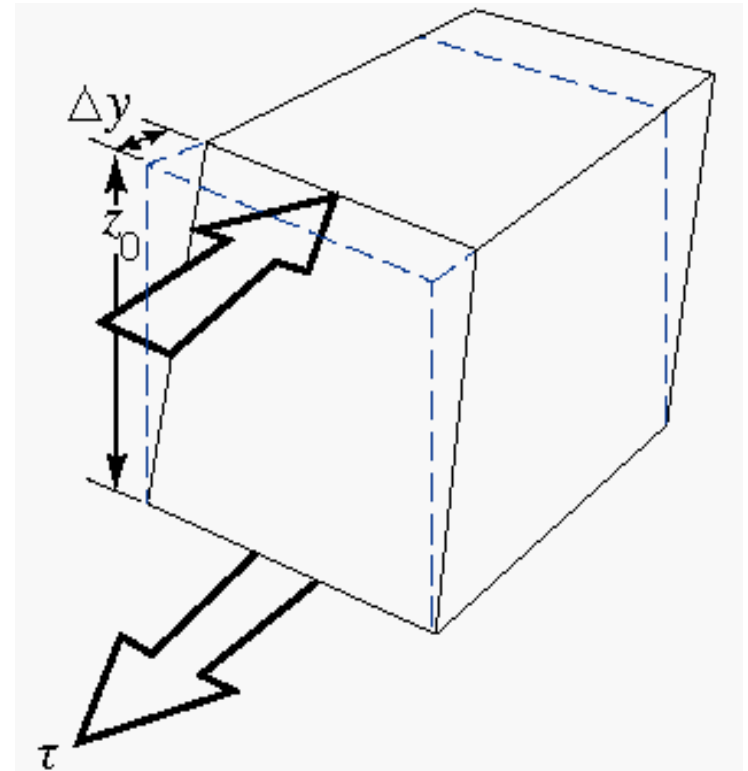
- $\tau = F/A_0$
- onde  $A_0$  é a área **paralela** a aplicação da força.

- Deformação cisalhante

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

- Módulo de cisalhamento **G**

- $\tau = G \gamma$





# Coeficiente de Poisson

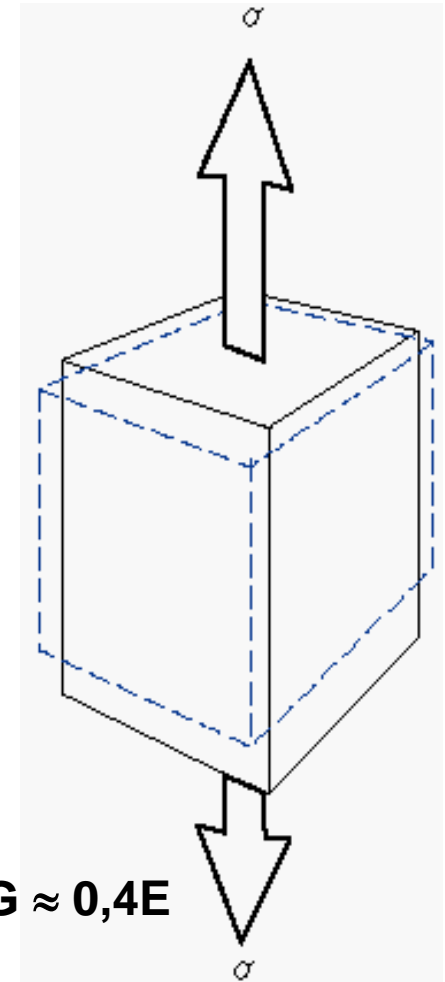


- Quando ocorre alongamento ao longo de uma direção, ocorre contração no plano perpendicular.
- A Relação entre as deformações é dada pelo **coeficiente de Poisson**  $\nu$ .

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

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

$$E = 2G(1+\nu) \quad \text{Para a maioria dos metais } G \approx 0,4E$$



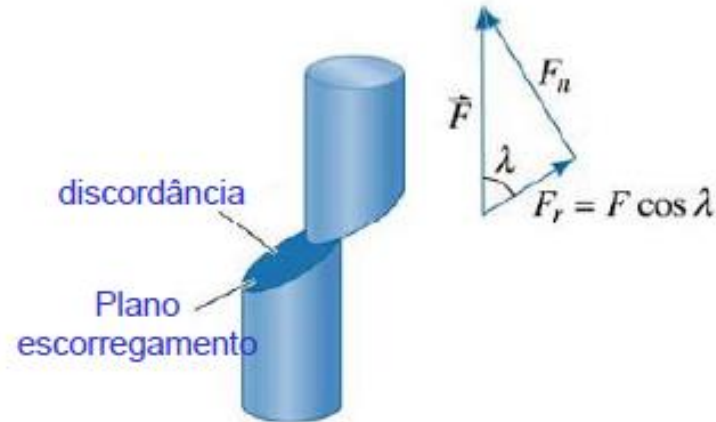
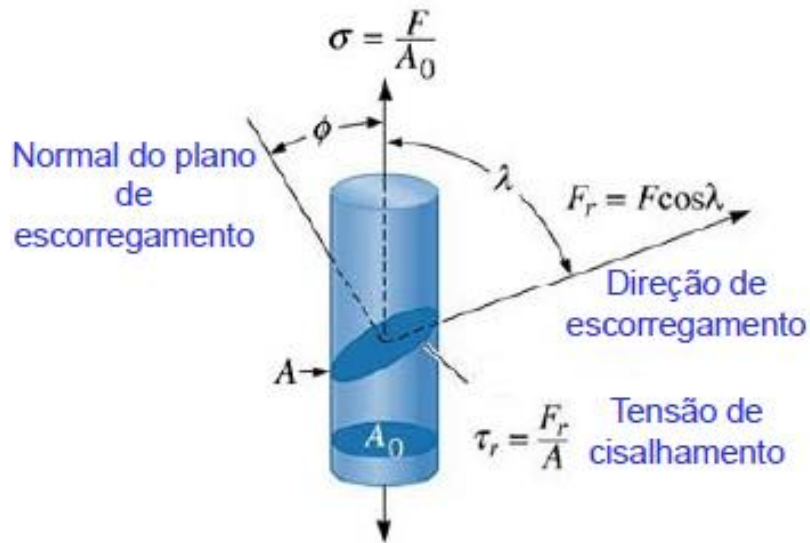
O coeficiente de Poisson (materiais isotropicos) pode ser usado para estabelecer uma relação entre o módulo de elasticidade e o módulo de cisalhamento de um material.

# DEFORMAÇÃO PLÁSTICA EM MONOCRISTAIS

## TENSÃO CILHANTE CRÍTICA DECOMPOSTA – LEI DE SHIMIDT

(FONTE:  
ASKELAND)

$$\tau_r = \sigma \cos \lambda \cos \phi$$



A TENSÃO DE TRAÇÃO PODE SER DECOMPOSTA EM COMPONENTES QUE **DEPENDEM** DA **ORIENTAÇÃO** DO **PLANO** E DA **DIREÇÃO** DE ESCORREGAMENTO.

## Propriedades Mecânicas dos Materiais



- 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

$$\gamma = \tan \theta$$

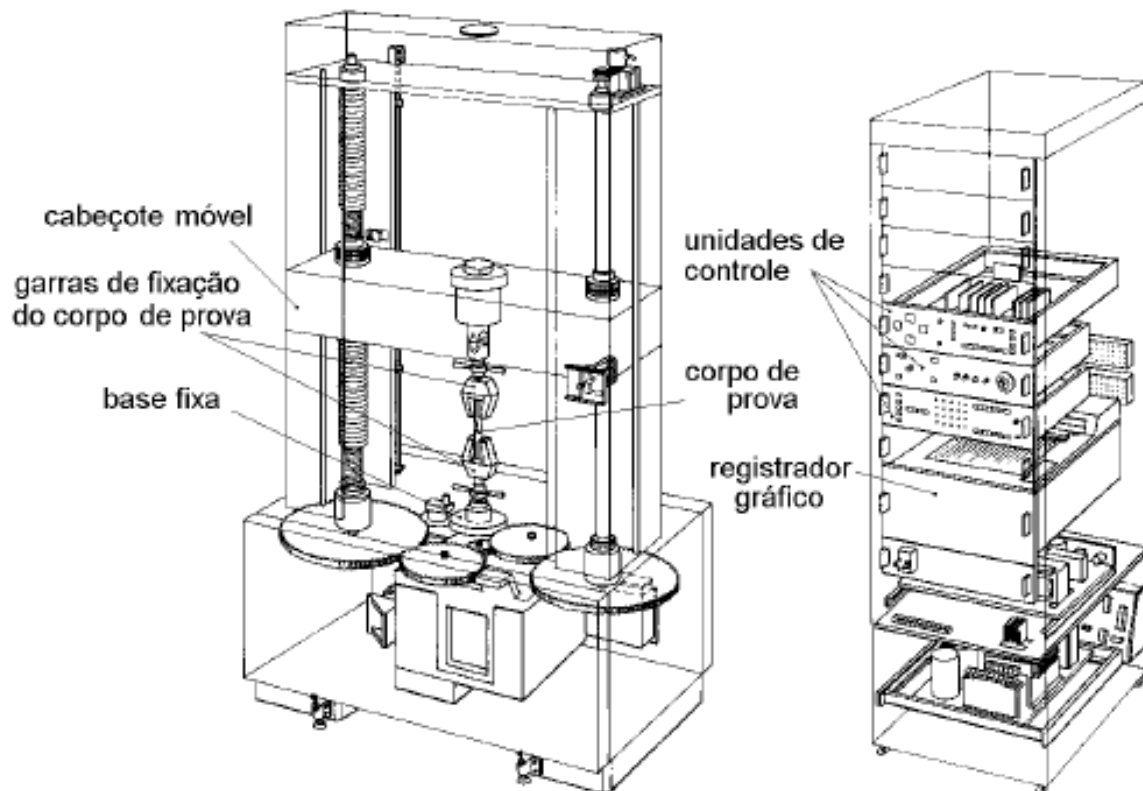
### Módulo de cisalhamento

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

**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.



Máquina Universal de Ensaio de Tração.

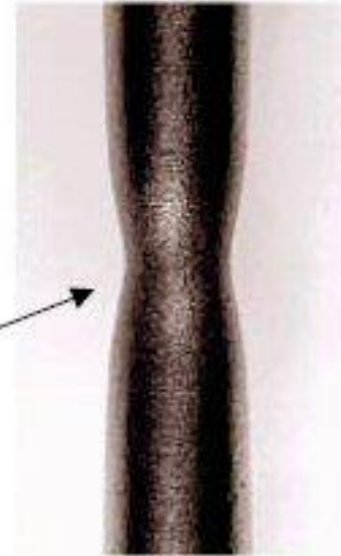
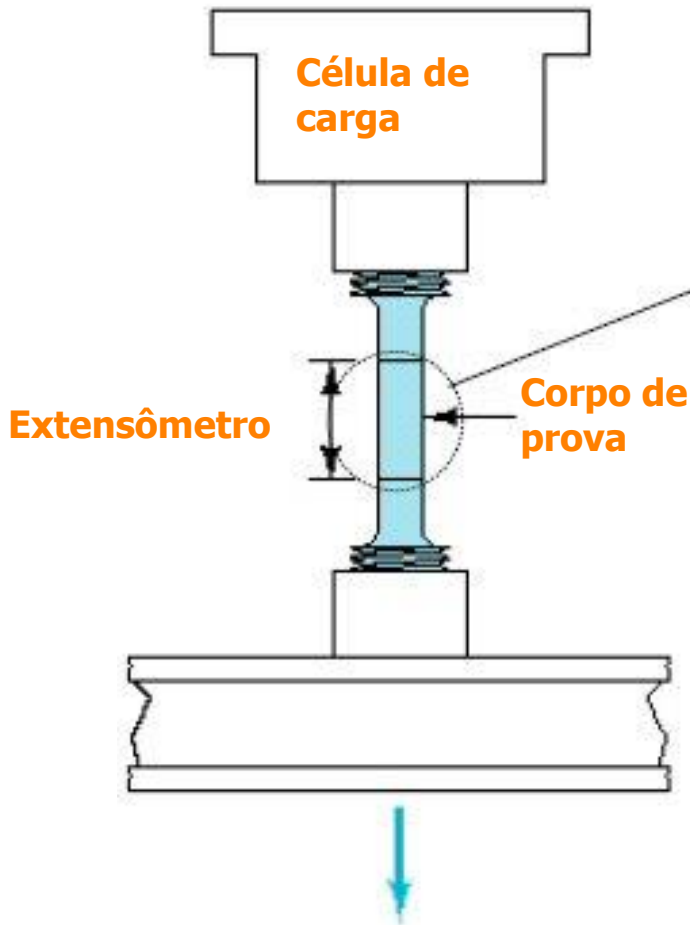
### A máquina de tração

- 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.

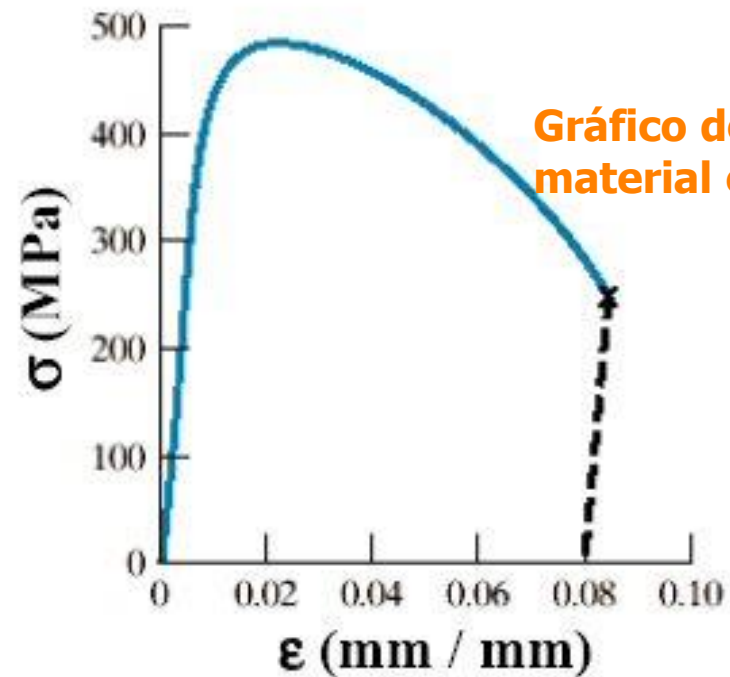
# Propriedades Mecânicas dos Materiais



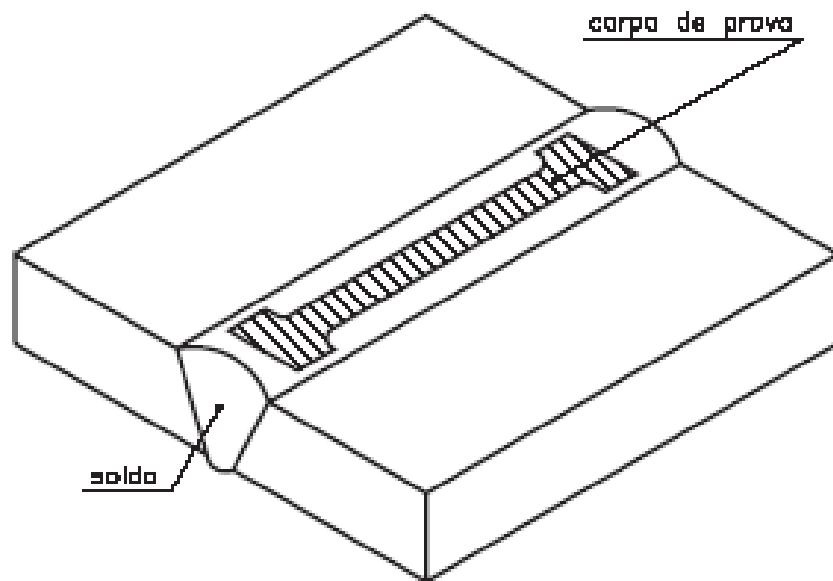
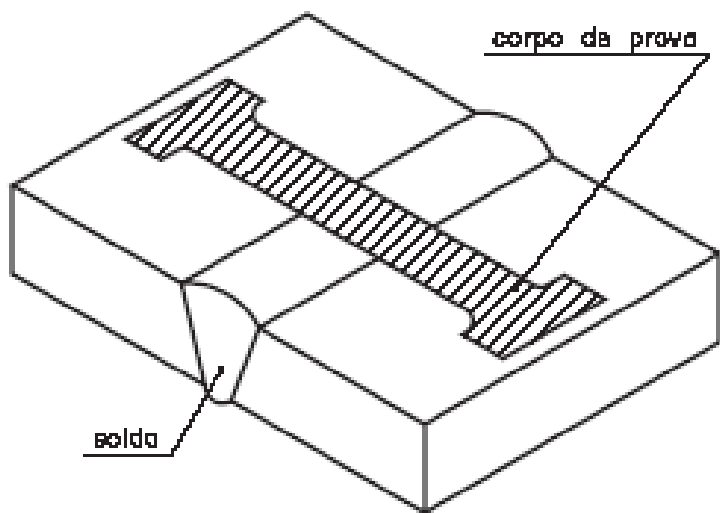
- Teste de tração:



**Detalhe do início da estrição do material**



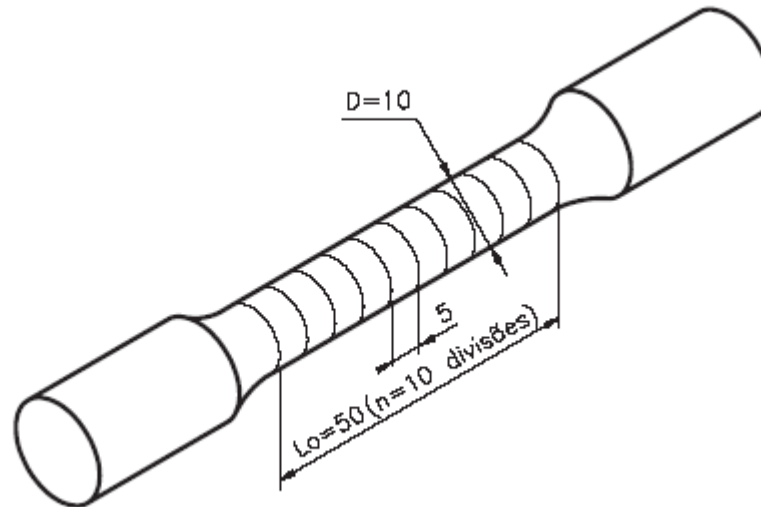
Em materiais soldados, podem ser retirados corpos de prova com a solda no meio ou no sentido longitudinal da solda, como você pode observar na figura a seguir.



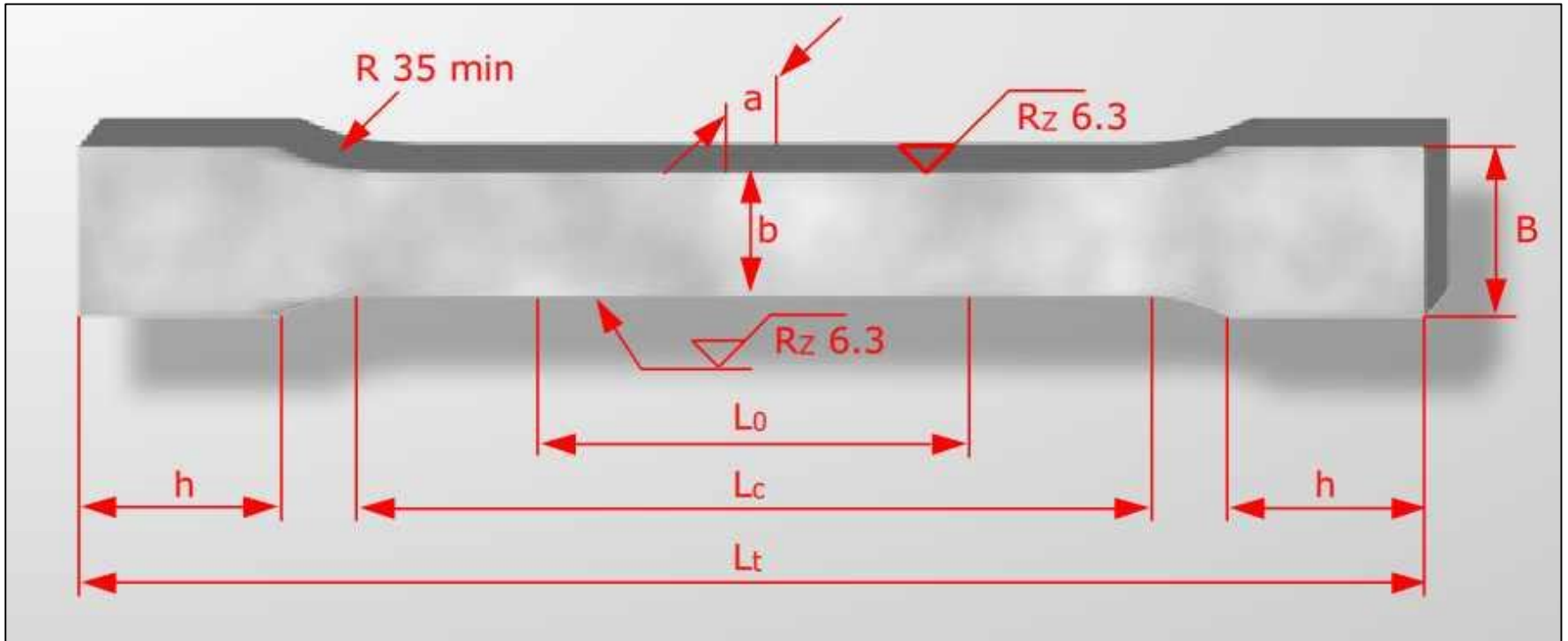
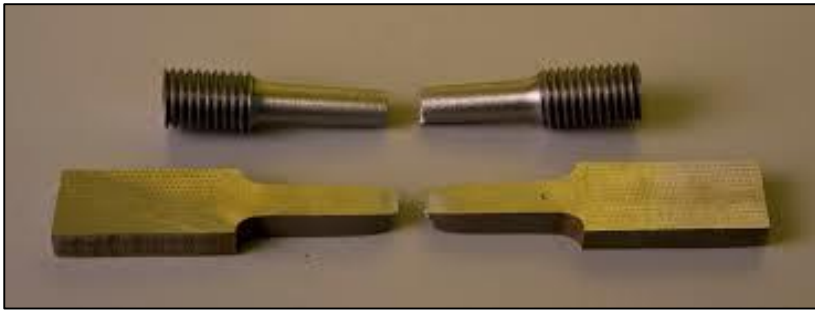
Retirada de corpo de prova em materiais soldados.

## 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.



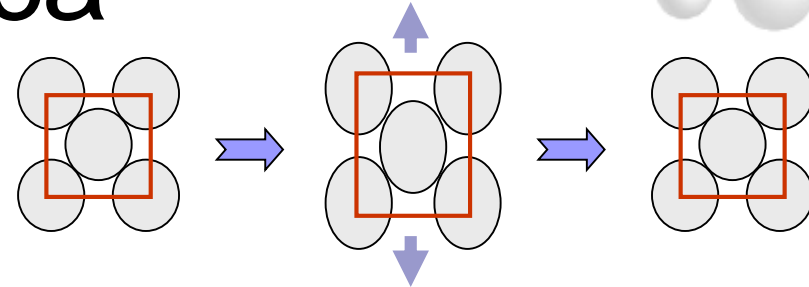
Corpo de prova preparado para o ensaio de tração





# Deformação Elástica

## Características Principais:

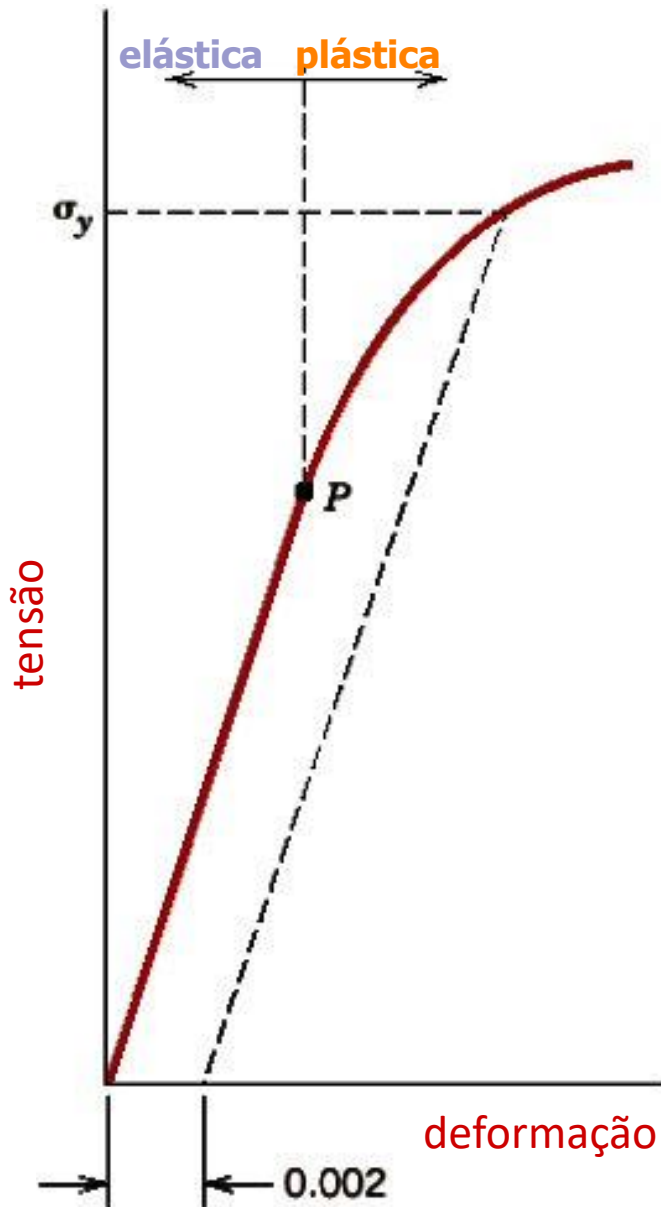


- A deformação elástica é resultado de um pequeno alongamento ou contração da célula cristalina na direção da tensão (tração ou compressão) aplicada;
- Deformação não é permanente, o que significa que quando a carga é liberada, a peça retorna à sua forma original;
- Processo no qual tensão e deformação 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***

# Propriedades Mecânicas dos Materiais

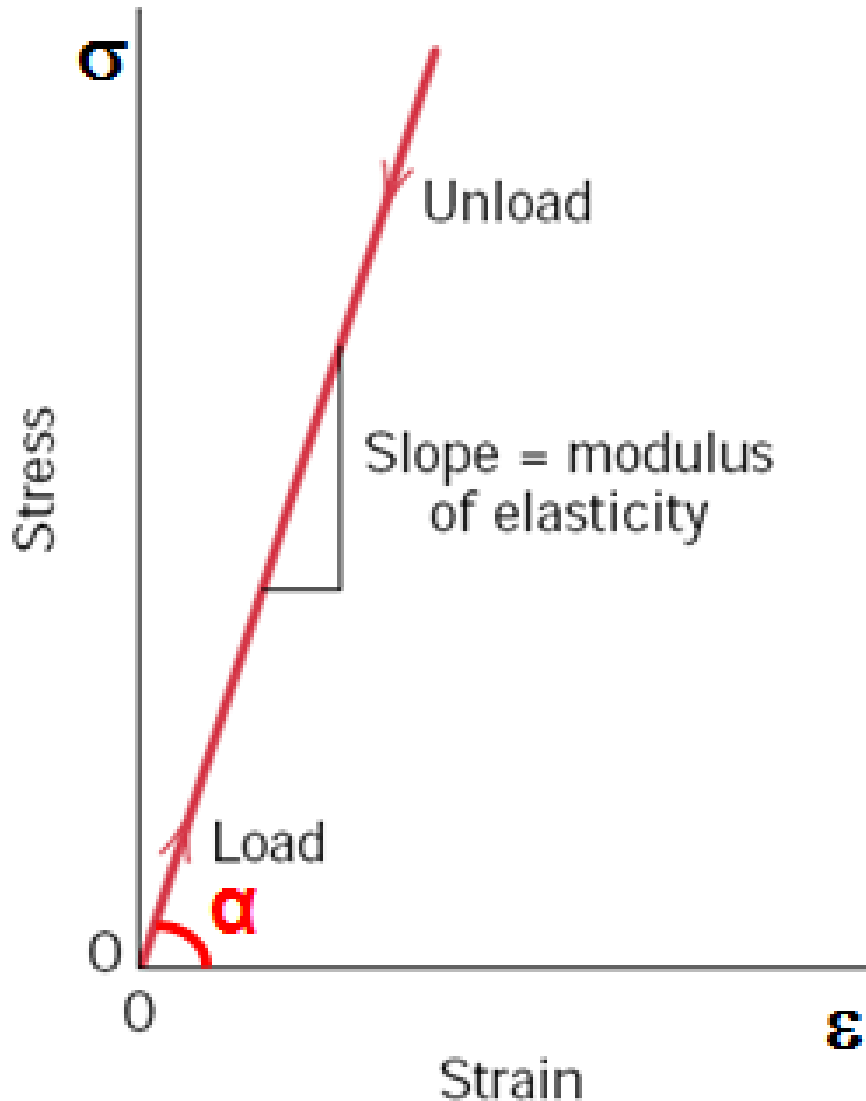
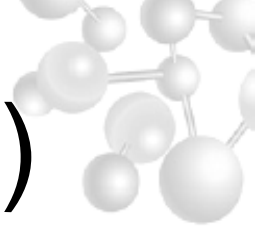


- Comportamento  $\sigma \times \varepsilon$ :



- 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)



$$\sigma = E \varepsilon$$

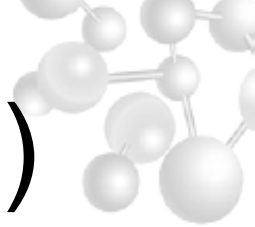
$$\tan g \alpha = \frac{\Delta S}{\Delta \varepsilon} = E$$

E = módulo de elasticidade  
ou Young (GPa)

$\sigma$  = tensão (MPa)

$\varepsilon$  = deformação (mm/mm) 19

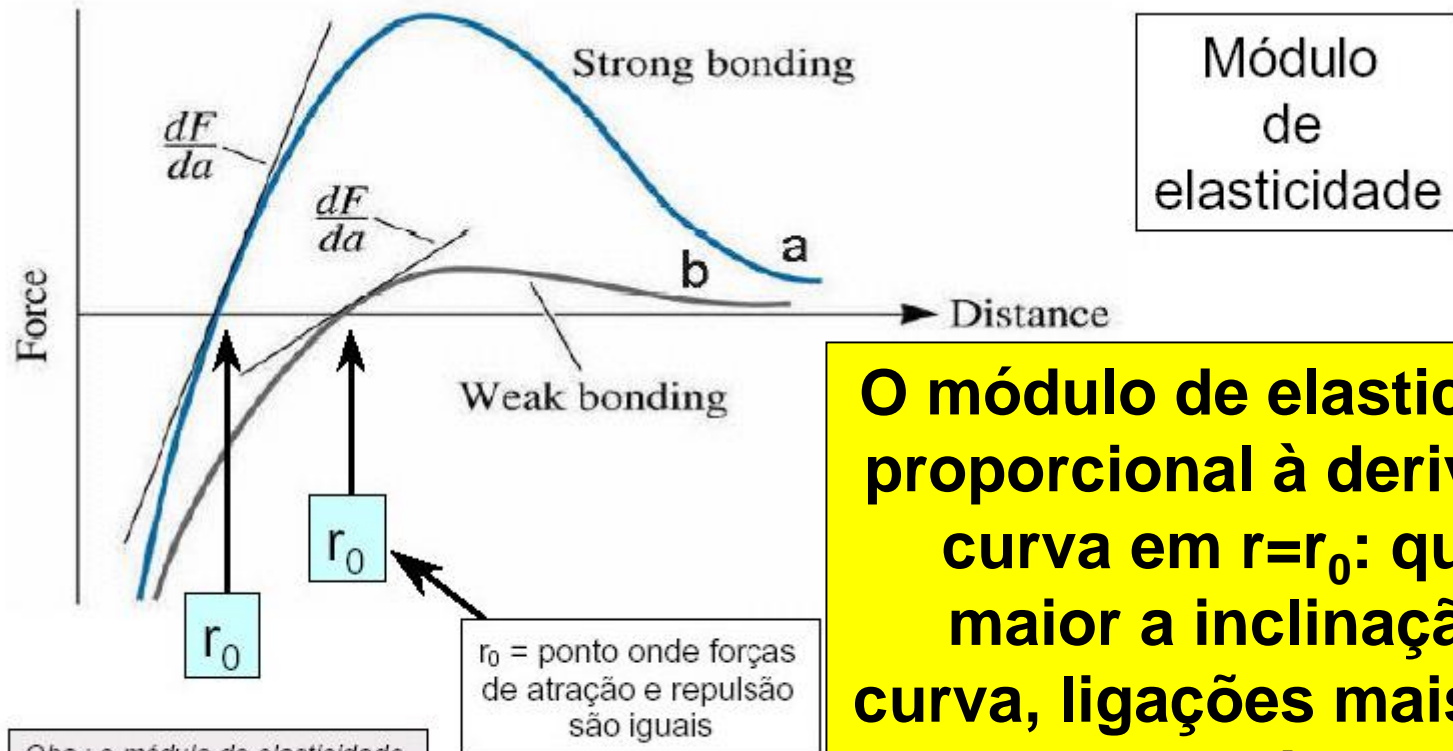
# Módulo de Elasticidade (E)



## Principais características:

- Quanto maior o módulo, mais rígido será o material ou menor será a deformação elástica;
- O módulo do aço ( $\approx 200$  GPa) é cerca de 3 vezes maior que o correspondente para as ligas de alumínio ( $\approx 70$  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

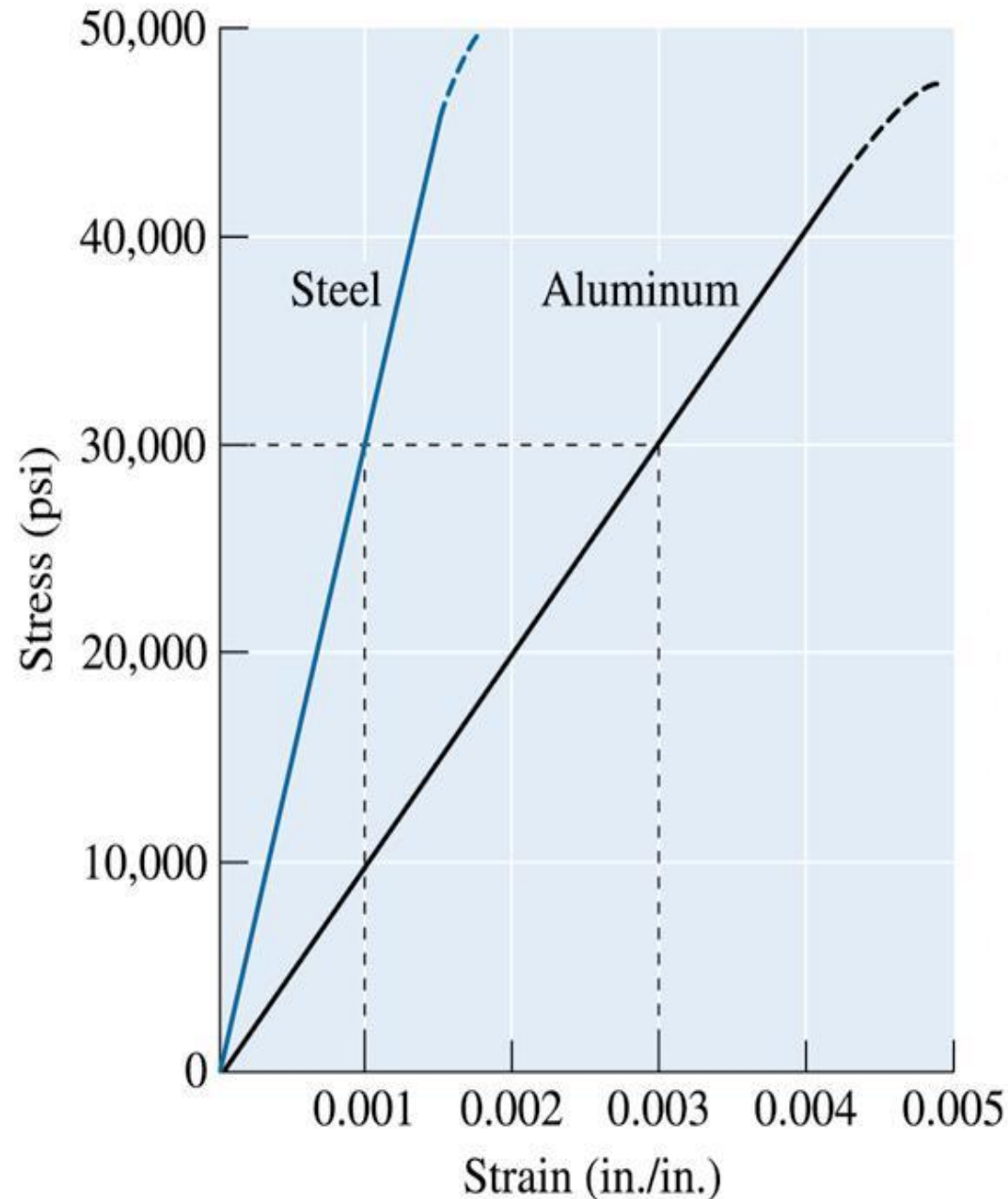


Obs.: o módulo de elasticidade é uma propriedade mecânica que será estudada em detalhe mais à frente no curso

$r_0$  = 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<sup>a</sup>

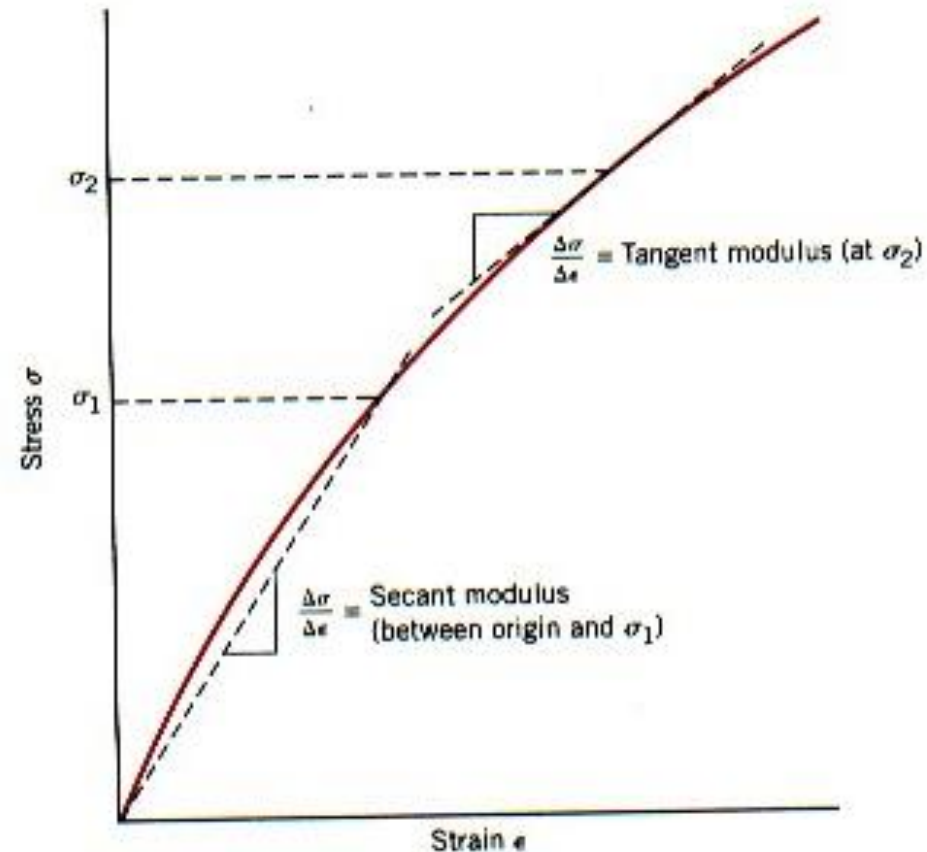
<i>Metal</i> (20°C)	<i>E</i> (GPa)	<i>G</i> (GPa)	<i>ν</i>
Aluminum	70.3	26.1	0.345
Cadmium	49.9	19.2	0.300
Chromium	279.1	115.4	0.210
Copper	129.8	48.3	0.343
Gold	78.0	27.0	0.440
Iron	211.4	81.6	0.293
Magnesium	44.7	17.3	0.291
Nickel	199.5	76.0	0.312
Niobium	104.9	37.5	0.397
Silver	82.7	30.3	0.367
Tantalum	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

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

# Comportamento não-linear



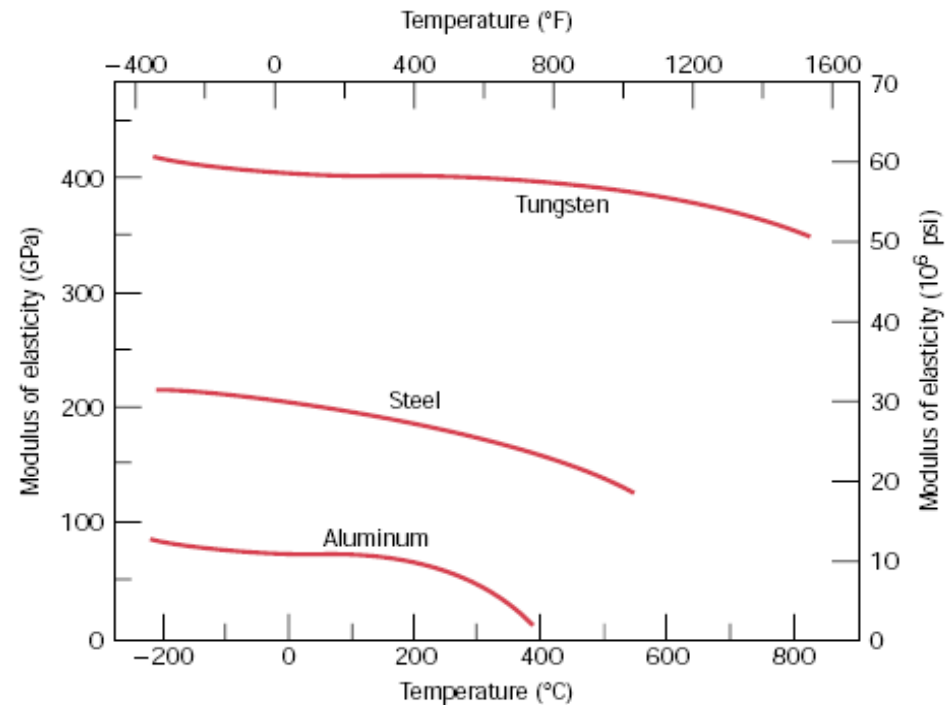
- Alguns metais como ferro fundido cinzento, o concreto e muitos polímeros apresentam um comportamento não linear na parte elástica da curva tensão x deformação



# 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.

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



## Material

## MÓDULO DE ELASTICIDADE OU YOUNG (E)

\* Polímero termoplástico

\*\* Polímero termofixo

\*\*\* Compósitos

GPa

10<sup>6</sup> 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

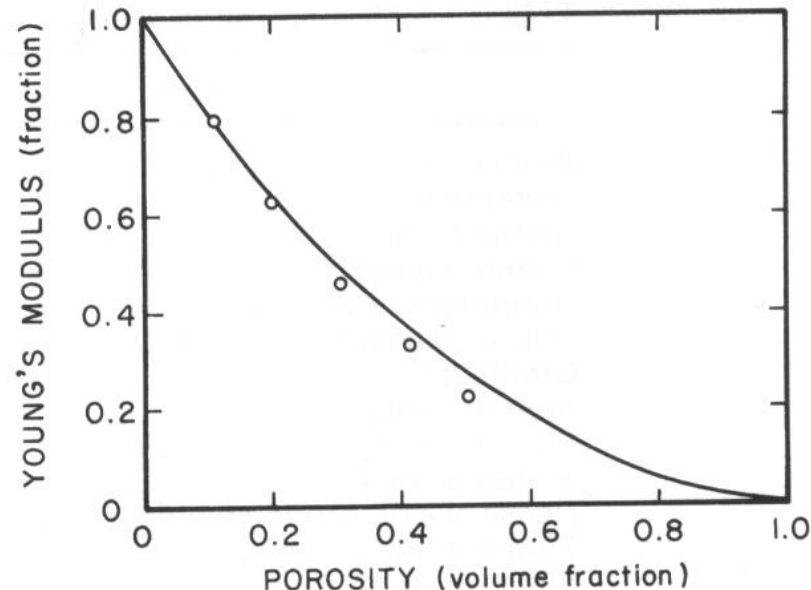
407

59



# Módulo de Elasticidade Cerâmica

- O módulo elástico das cerâmicas são fortemente dependente da porosidade.



**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).

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

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

# Deformação Plástica



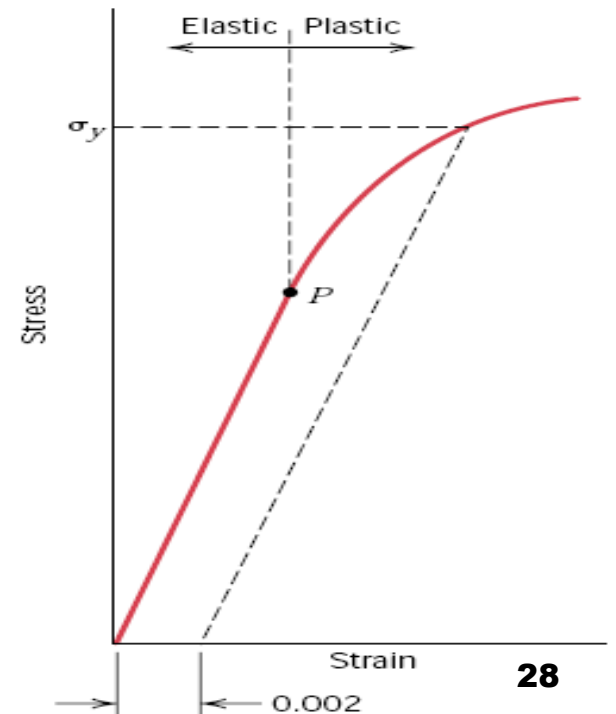
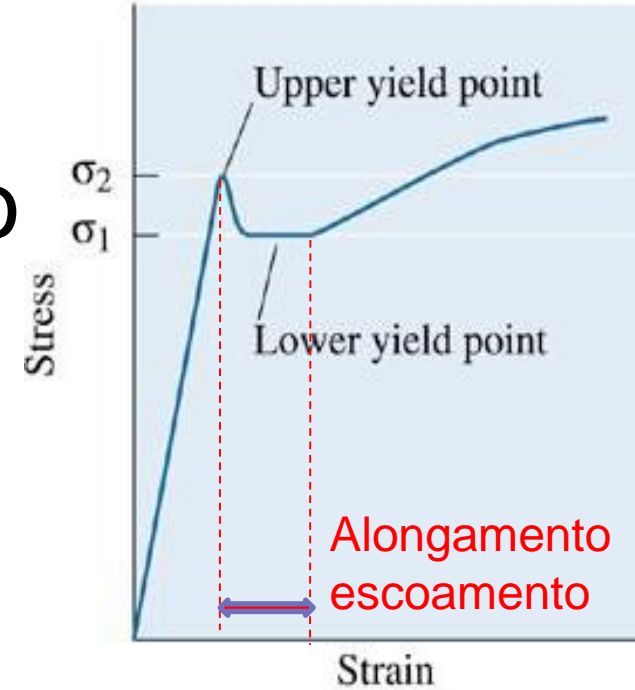
- Para a maioria dos materiais metálicos, o regime elástico persiste apenas até deformações de aproximadamente 0,2 a 0,5%.
- À medida que o material é deformado além, desse ponto, a tensão não é mais proporcional à deformação (lei de Hooke) e ocorre uma deformação permanente não recuperável denominada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

# Limite de proporcionalidade e Tensão limite de escoamento

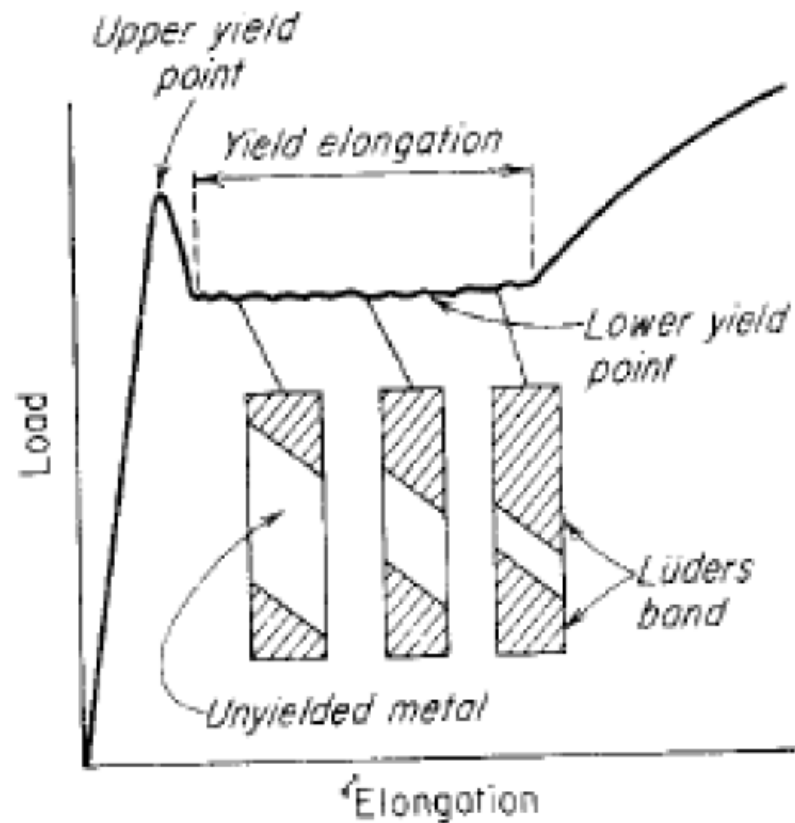
➤ O limite de proporcionalidade pode ser determinado como o ponto onde ocorre o afastamento da linearidade na curva tensão – deformação (**ponto P**).

➤ A posição deste ponto pode não ser determinada com precisão. Por conseqüência 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 ( $\sigma_y$ )**

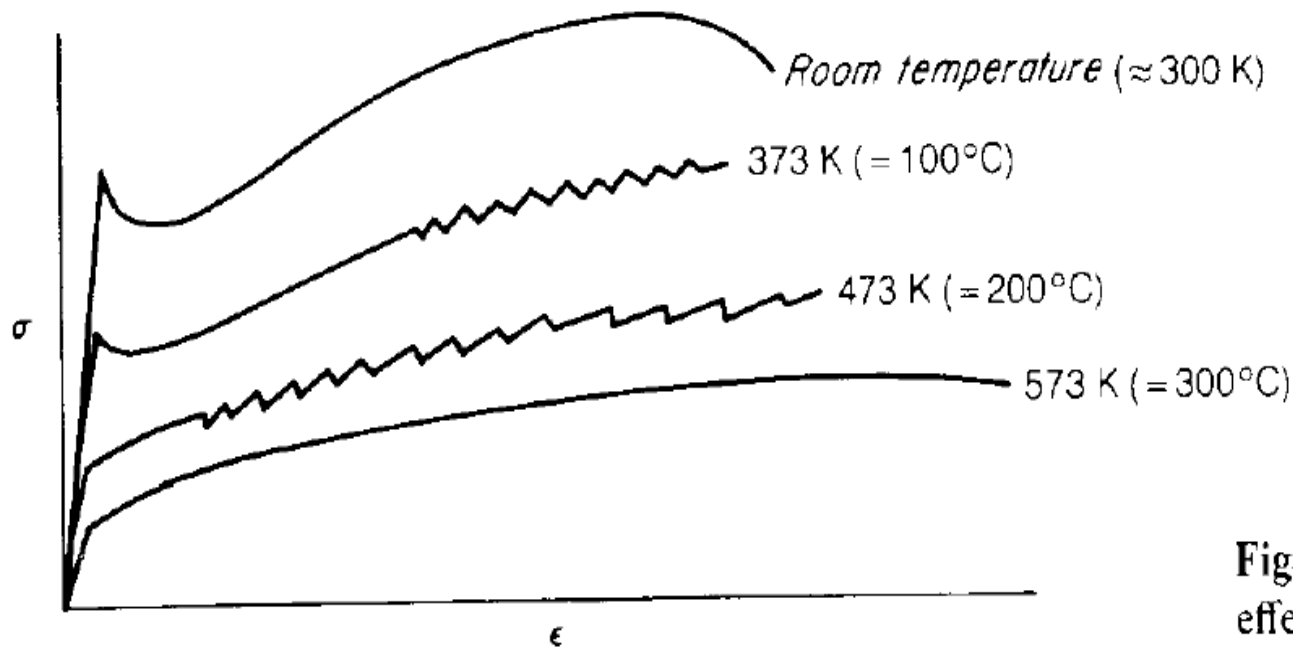


## LIMITE DE ESCOAMENTO DESCONTÍNUO



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

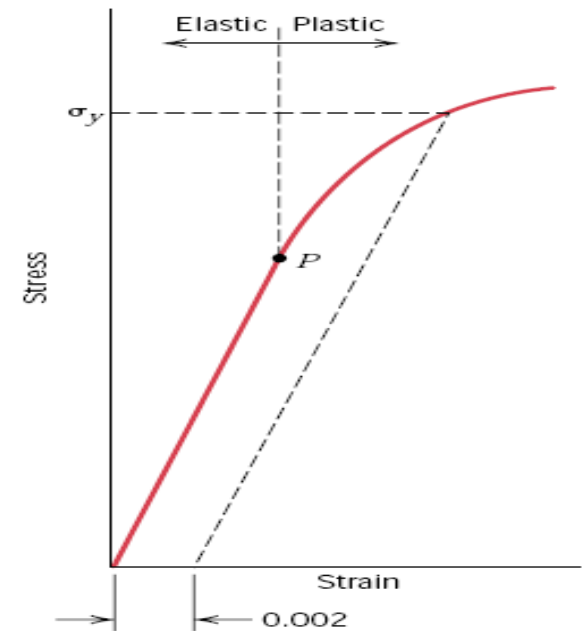
## EFEITO PORTEVIN-LECHATelier



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

# 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 :**  $n = 0,2 \% (\epsilon = 0,002)$

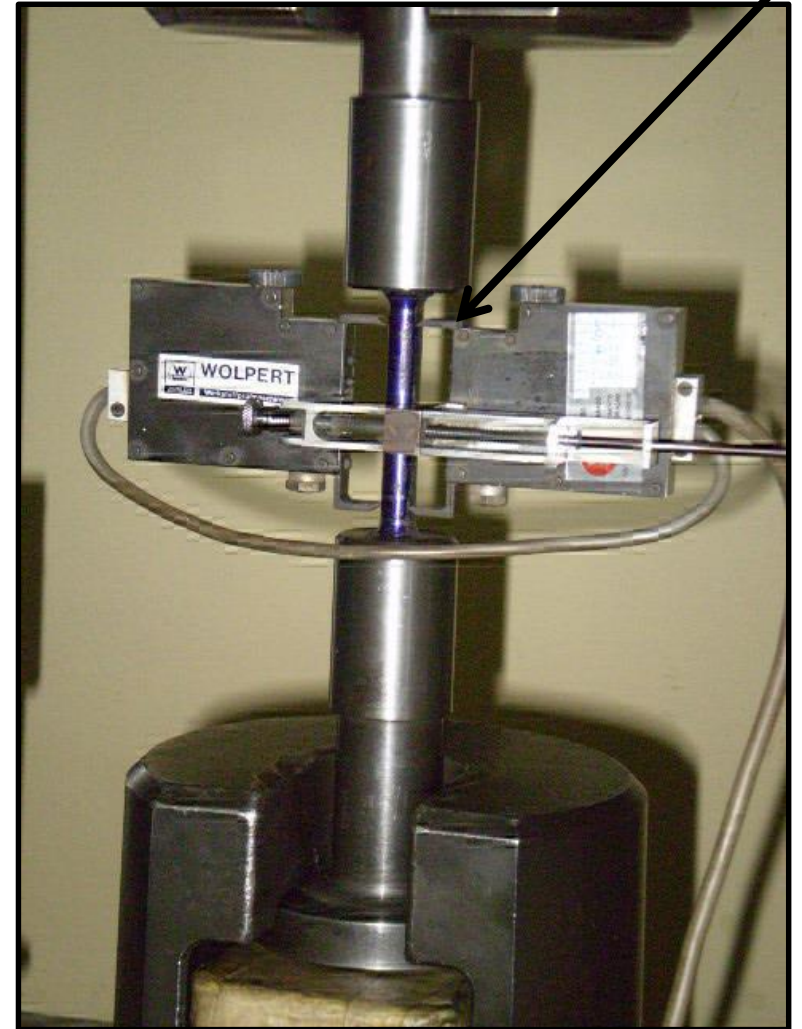
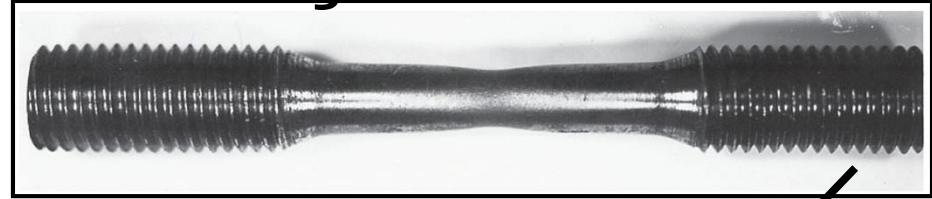
**Cobre e suas ligas:**  $n = 0,5 \% (\epsilon = 0,005)$

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

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

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

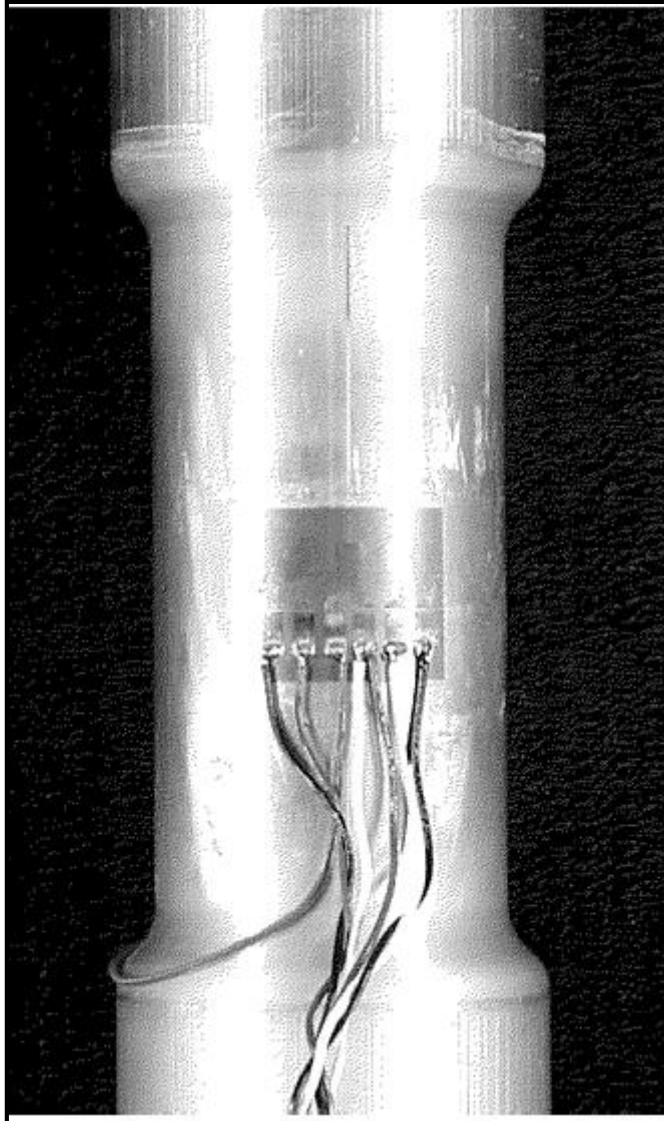
# ENSAIO DE TRACÇÃO





# ENSAIO DE TRAÇÃO

## Extensômetro (“strain Gage”)



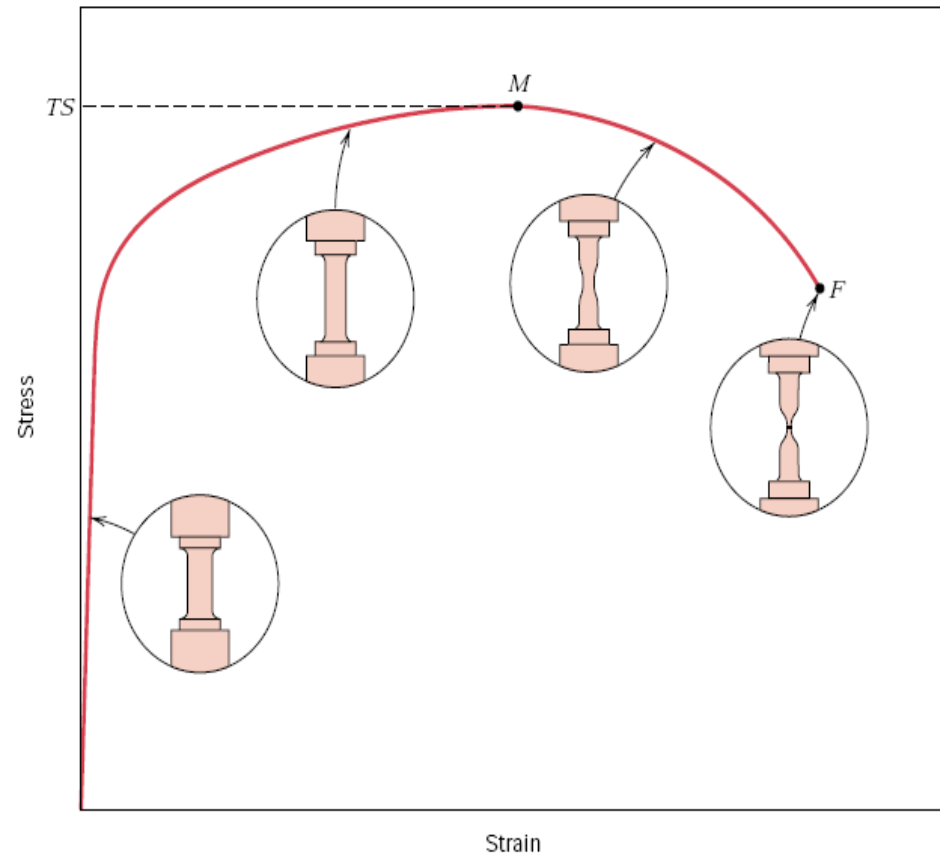
(ASM METALS HANDBOOK, VOL.8)

# 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;

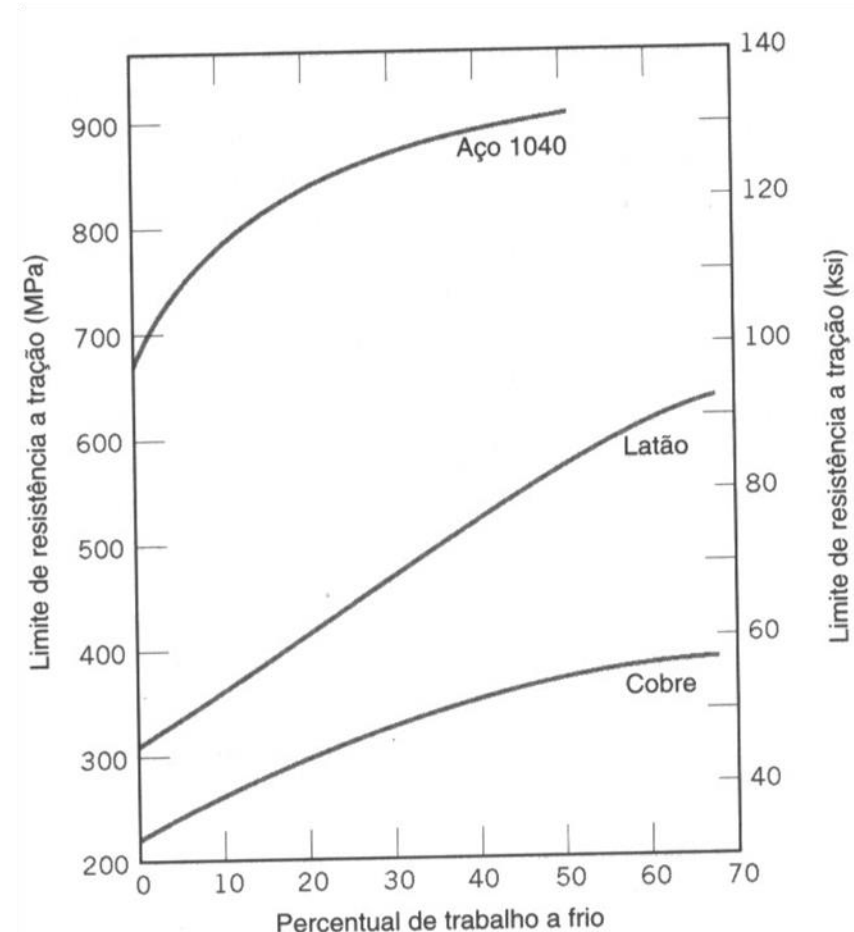
➤ Para um material de alta capacidade de deformação plástica, o  $\phi$  do CP decresce rapidamente ao ultrapassar o ponto M e assim a carga necessária para continuar a deformação, diminui até a ruptura final.



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**).

# 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



# Ductilidade



**Definição:** é uma medida da extensão da deformação 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.
  - Independente de  $A_0$  e  $L_0$  e em geral é  $\neq$  de  $AL\%$

# Tenacidade



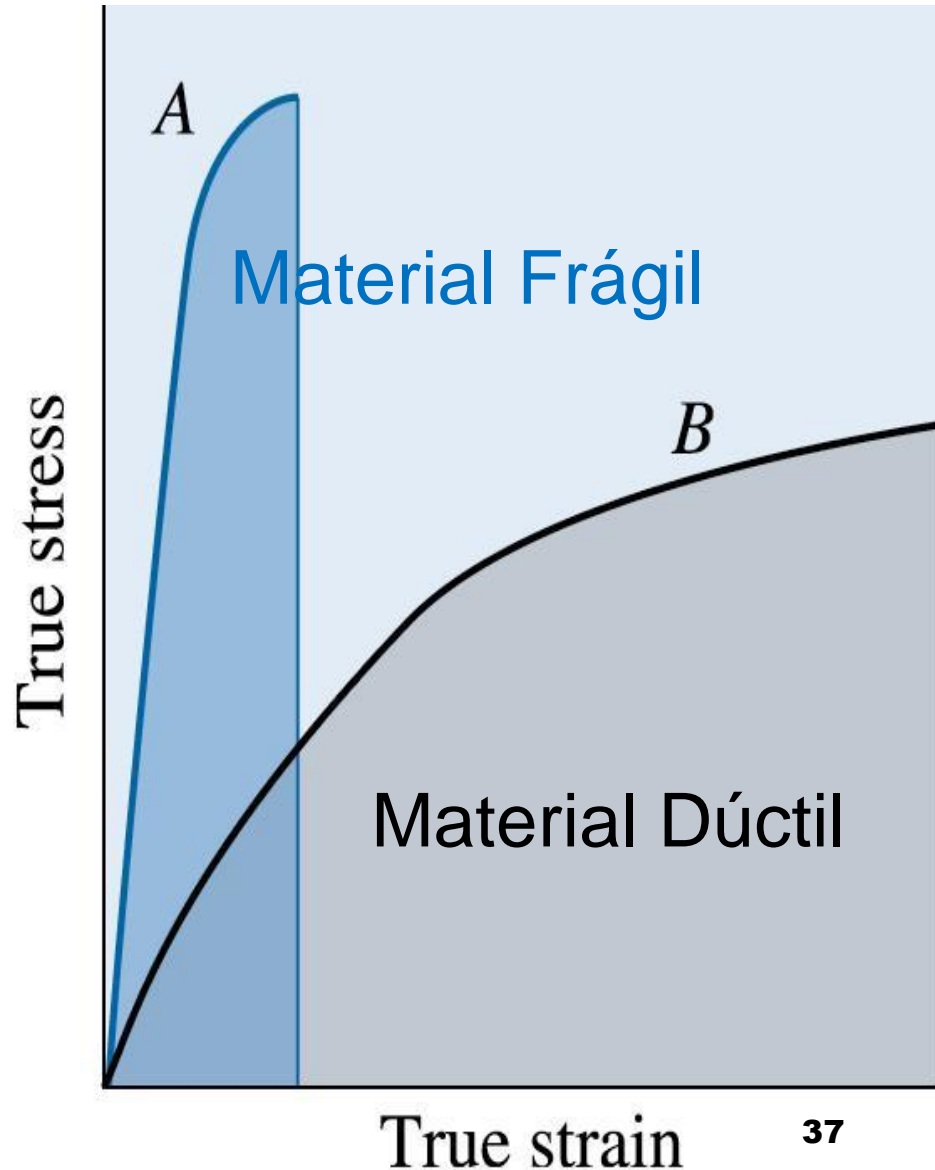
- Representa uma medida da habilidade de um material em absorver energia até a fratura;
- Pode ser determinada a partir da curva  $\sigma \times \epsilon$ . Ela é a área sob a curva;
- Para que um material seja tenaz, deve apresentar certa resistência e ductilidade. Materiais dúcteis são mais tenazes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

Materiais Dúcteis

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

Materiais Frágeis

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



# Resiliência



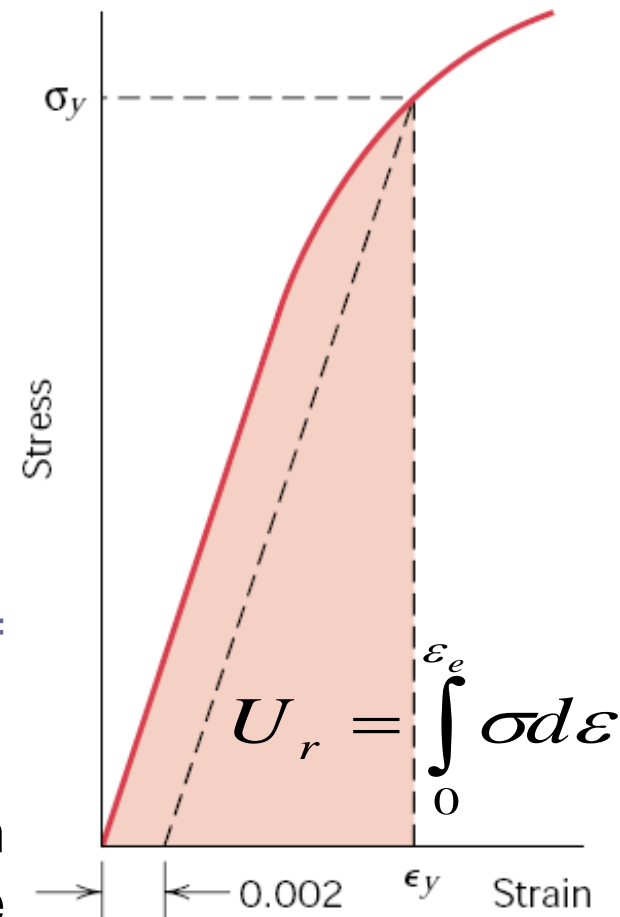
**Definição:** Capacidade de um material absorver energia sob tração quando ele é deformado elasticamente e devolvê-la quando relaxado (recuperar);

✓ para aços carbono varia de 35 a 120 MJ/m<sup>3</sup>

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

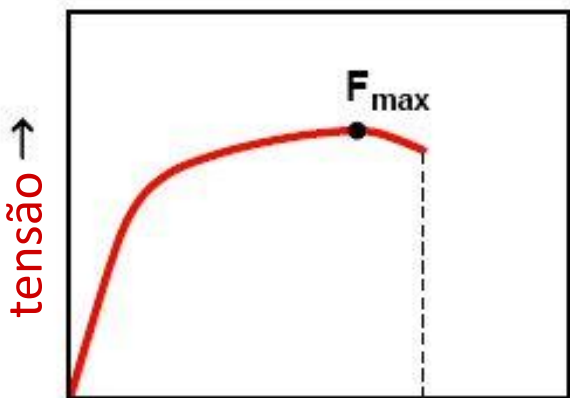
Assim, materiais de alta resiliência possuem alto limite de escoamento e baixo módulo de elasticidade. Estes materiais seriam ideais para uso em molas.





## Propriedades Mecânicas dos Materiais

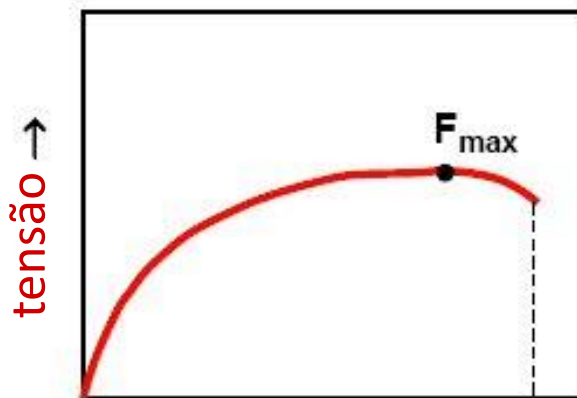
- Tipos de material e as curvas de  $\sigma \times \varepsilon$



deformação →

o

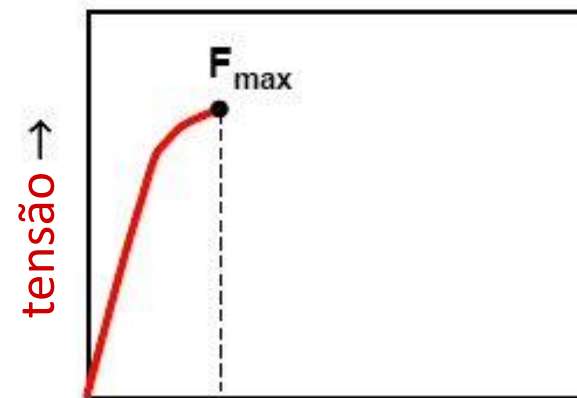
• Normal



deformação →

o

• Material dúctil  
(cobre)

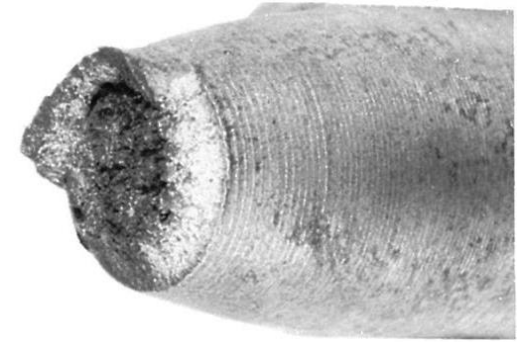


deformação →

o

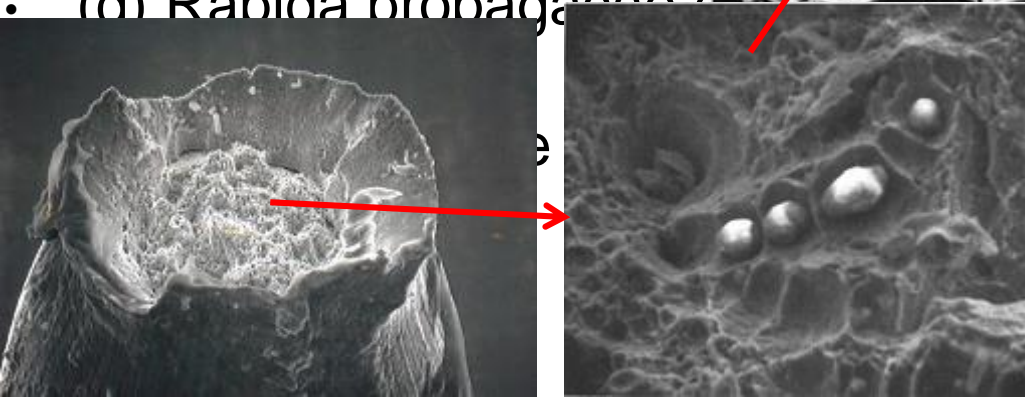
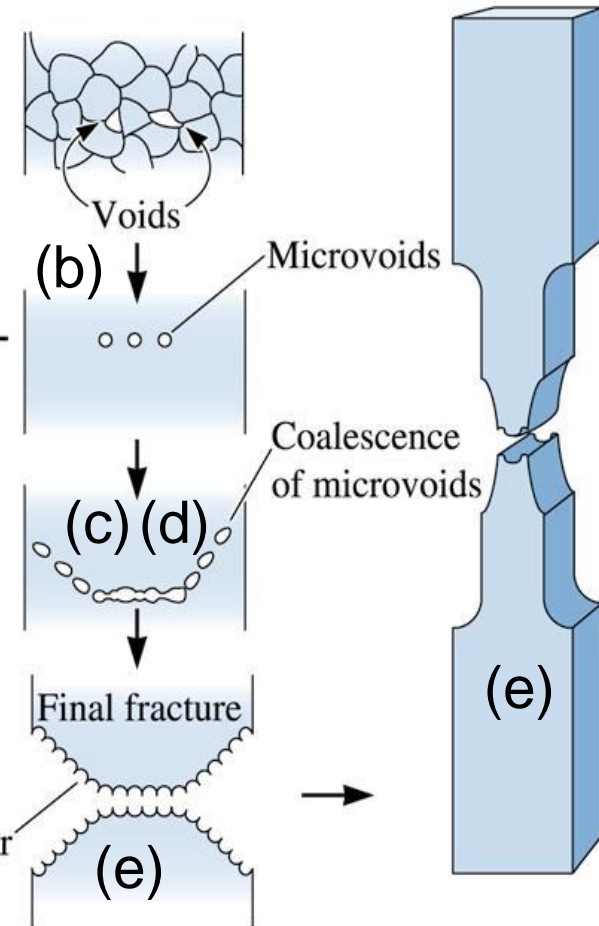
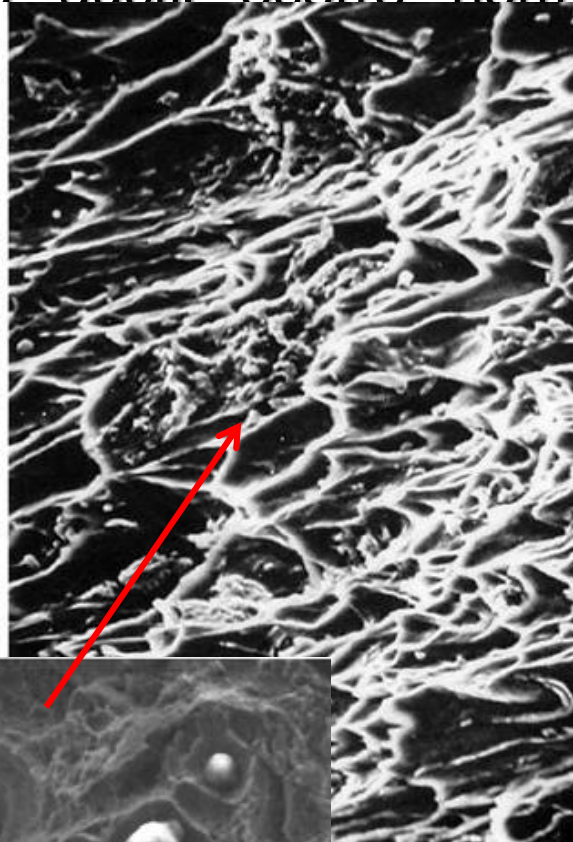
• Material frágil  
(ferro fundido e cerâmicas)

# Fratura dúctil



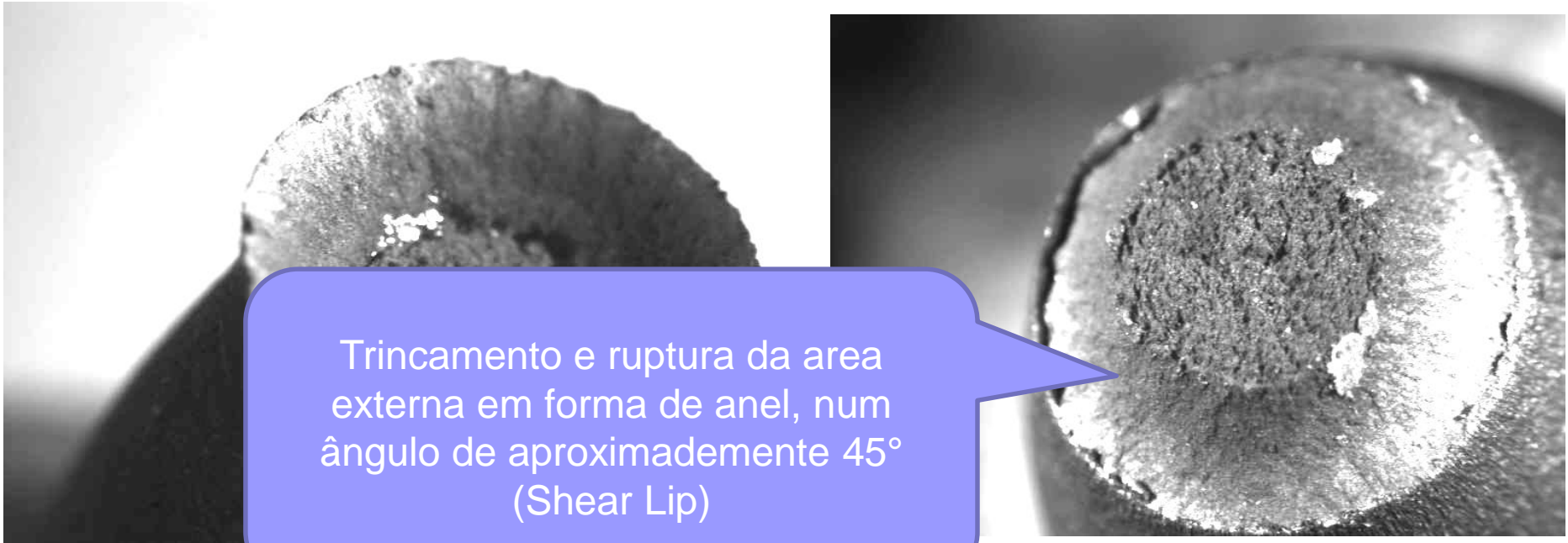
O processo de fratura dúctil ocorre normalmente em vários estágios

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

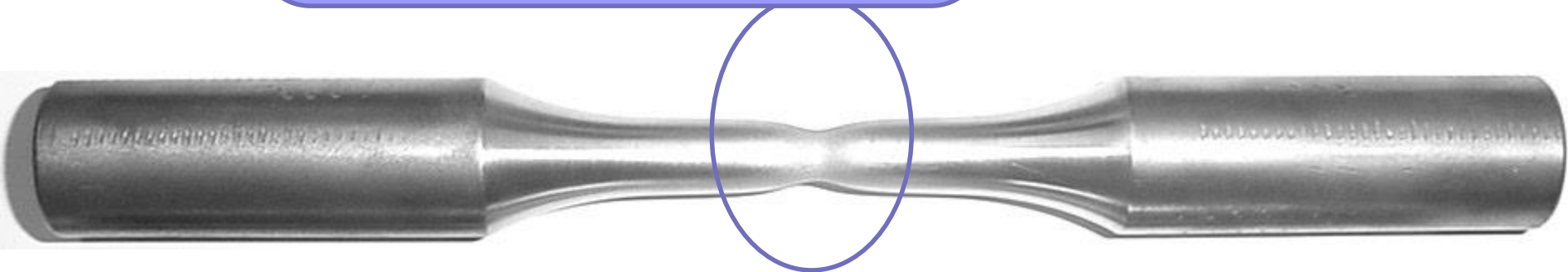




# Fratura dúctil (Tipo Taça Cone)



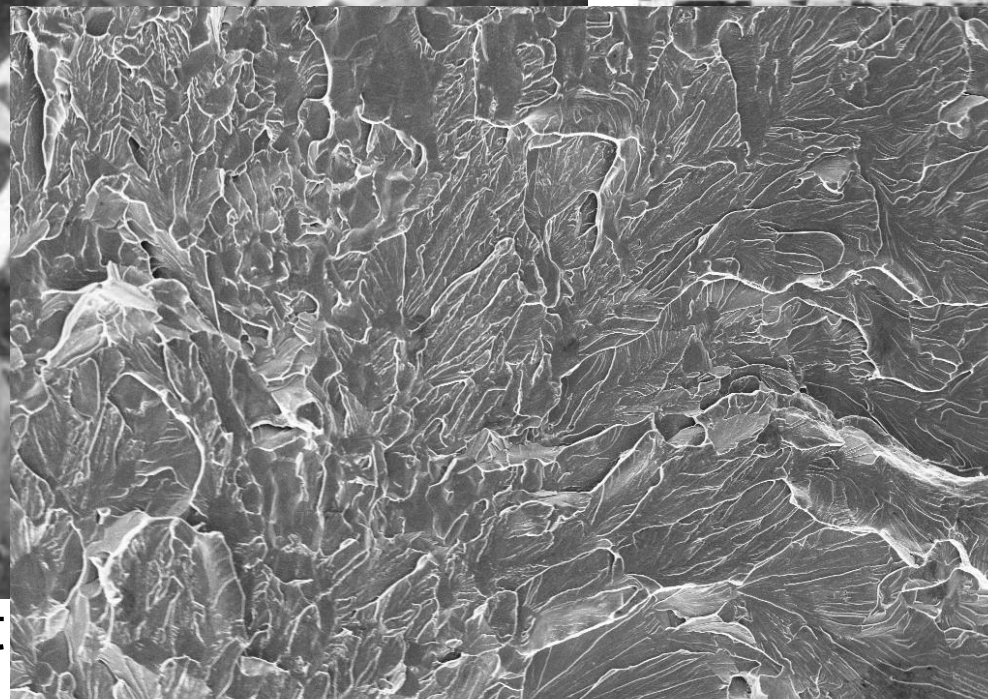
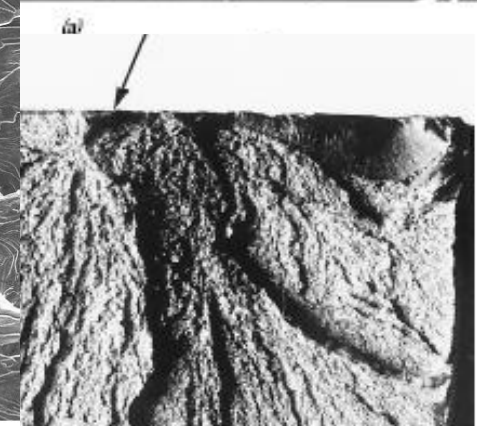
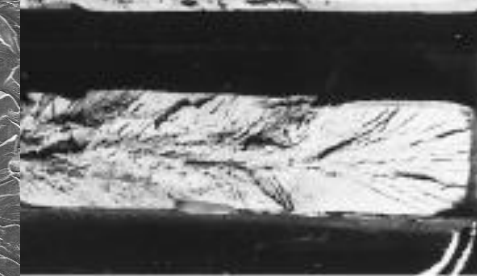
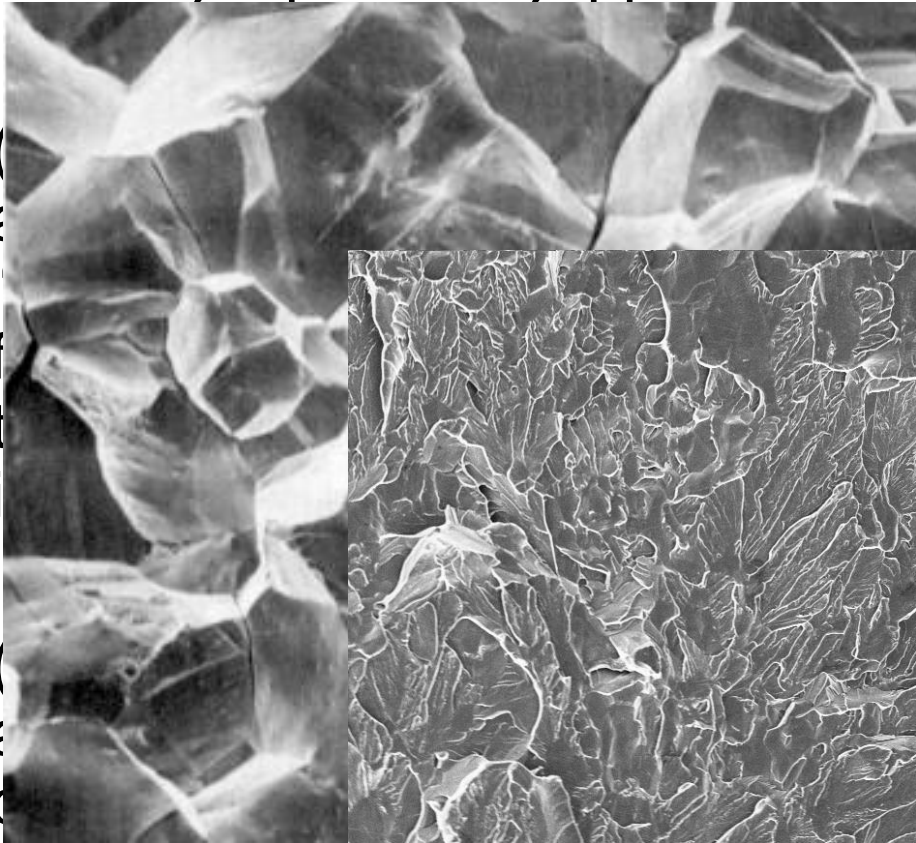
Trincamento e ruptura da area externa em forma de anel, num ângulo de aproximadamente  $45^\circ$  (Shear Lip)



# Fratura frágil



Fratura frágil ocorre sem qualquer deformação apreciável e formação de trincas



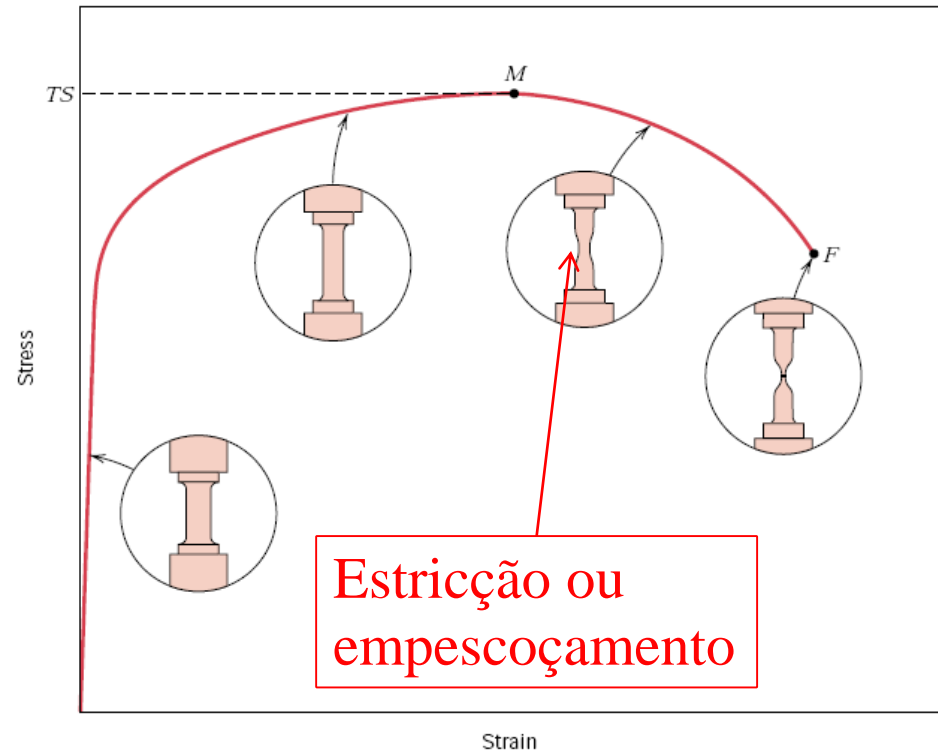
IQSC EHT=20.00 kV WD= 22 mm Mag= 500 X Detector= SE1  
10µm H Photo No.=7 25-Apr-2006

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 da seção original e não leva em conta o pescoço.



# Tensão Verdadeira e Deformação Verdadeira

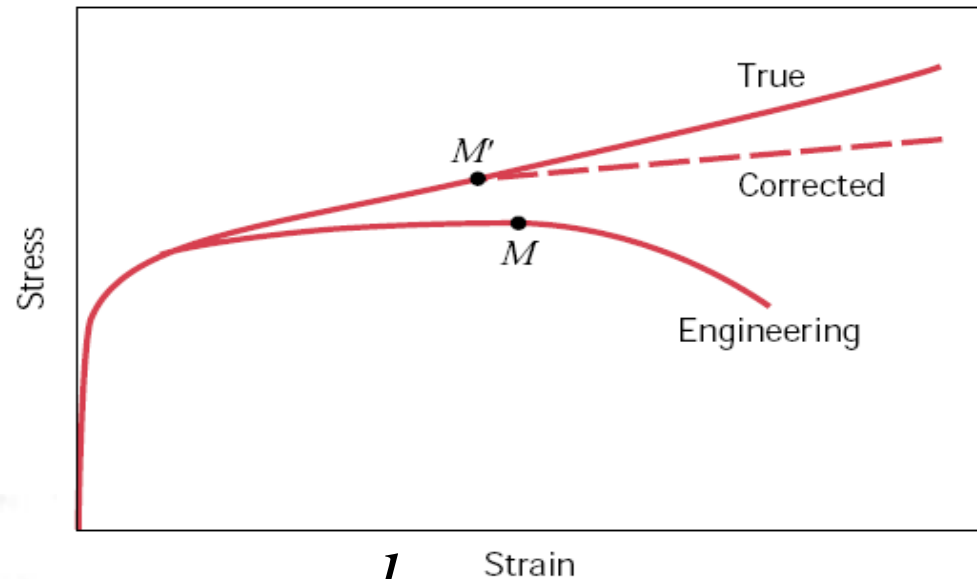


- A Tensão Verdadeira é definida como sendo a carga  $P$  dividido sobre a área instantânea, ou seja, área do pescoço após o limite de resistência à tração

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

- A Deformação Verdadeira é definida pela expressão

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



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

# 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

$$\varepsilon_r = \mathbf{e}$$

## ■ Tensão

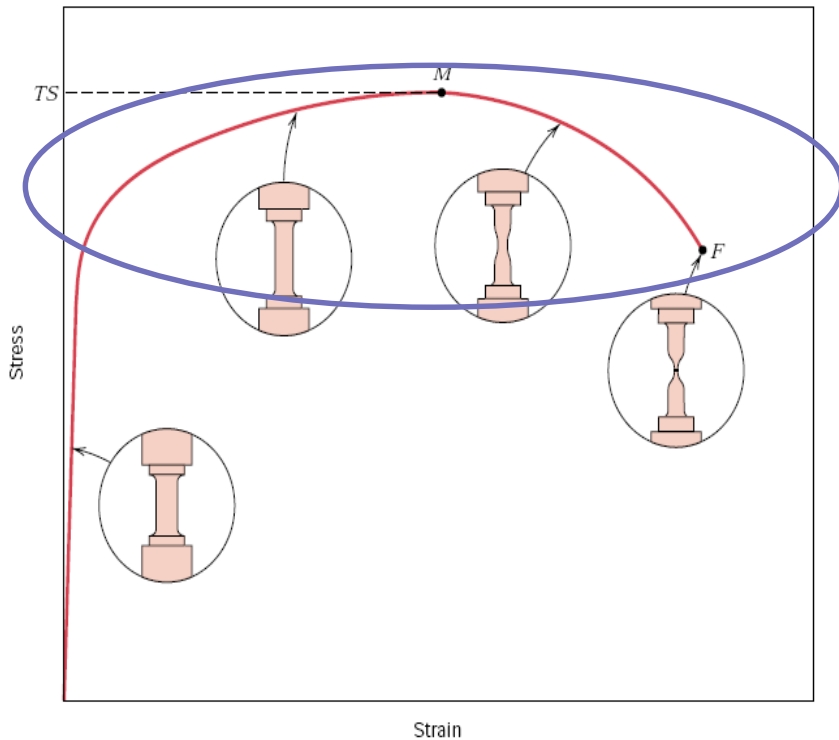
$$\ln \frac{S_0}{S} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon_C)$$

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

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

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

# TENSÃO PARA A REGIÃO DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA



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

**K e n** são constantes que dependem do material e dependem do tratamento dado ao mesmo, ou seja, se foram tratados termicamente ou encruados

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



# K e n para alguns materiais

<b>Material</b>	<b>n</b>	<b>K (MPa)</b>
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



# COMPRESSÃO



## TRAÇÃO X COMPRESSÃO



- Alguns materiais apresentam comportamento em **tração bem diferente** do comportamento em **compressão** (materiais **cerâmicos, FoFo, aços ferramenta, aço rápido**);
- Existem alguns **processos de conformação** onde a peça a ser trabalhada está sujeita a **forças compressivas**.
- O ensaio de **compressão é similar ao ensaio de tração** e como o ensaio de tração foi tratado em detalhes, faremos somente algumas considerações onde estes ensaios diferem entre si.

## $(\sigma_e)$ Limite de Escoamento :

Quando não apresentar um patamar nítido, utiliza-se da convenção de 0,2 % de deformação

## $(\phi)$ Dilatação Transversal :

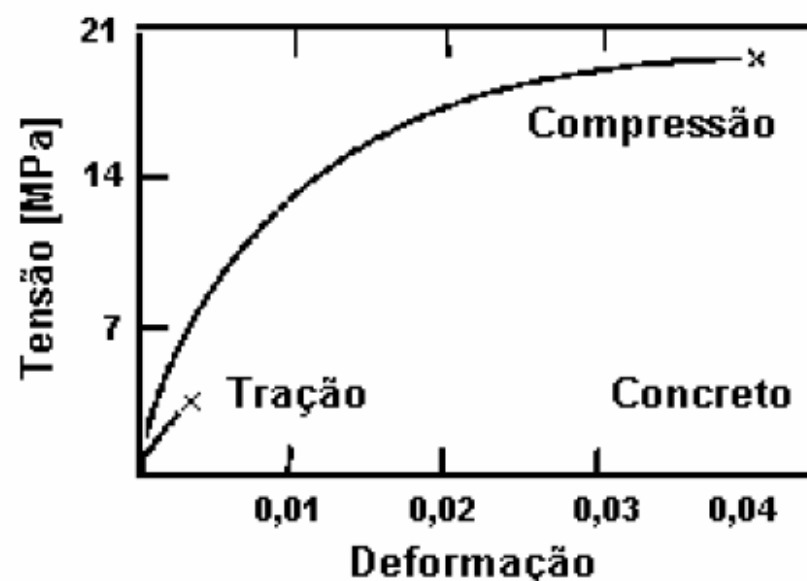
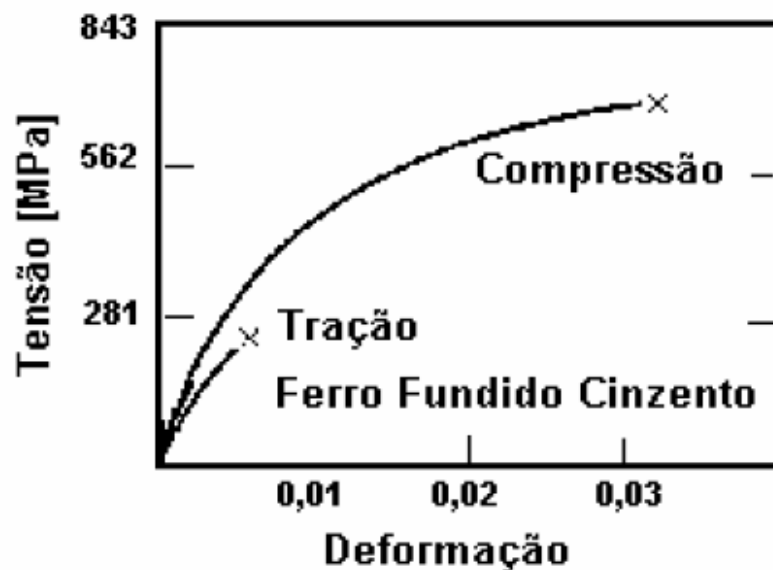
Equivale

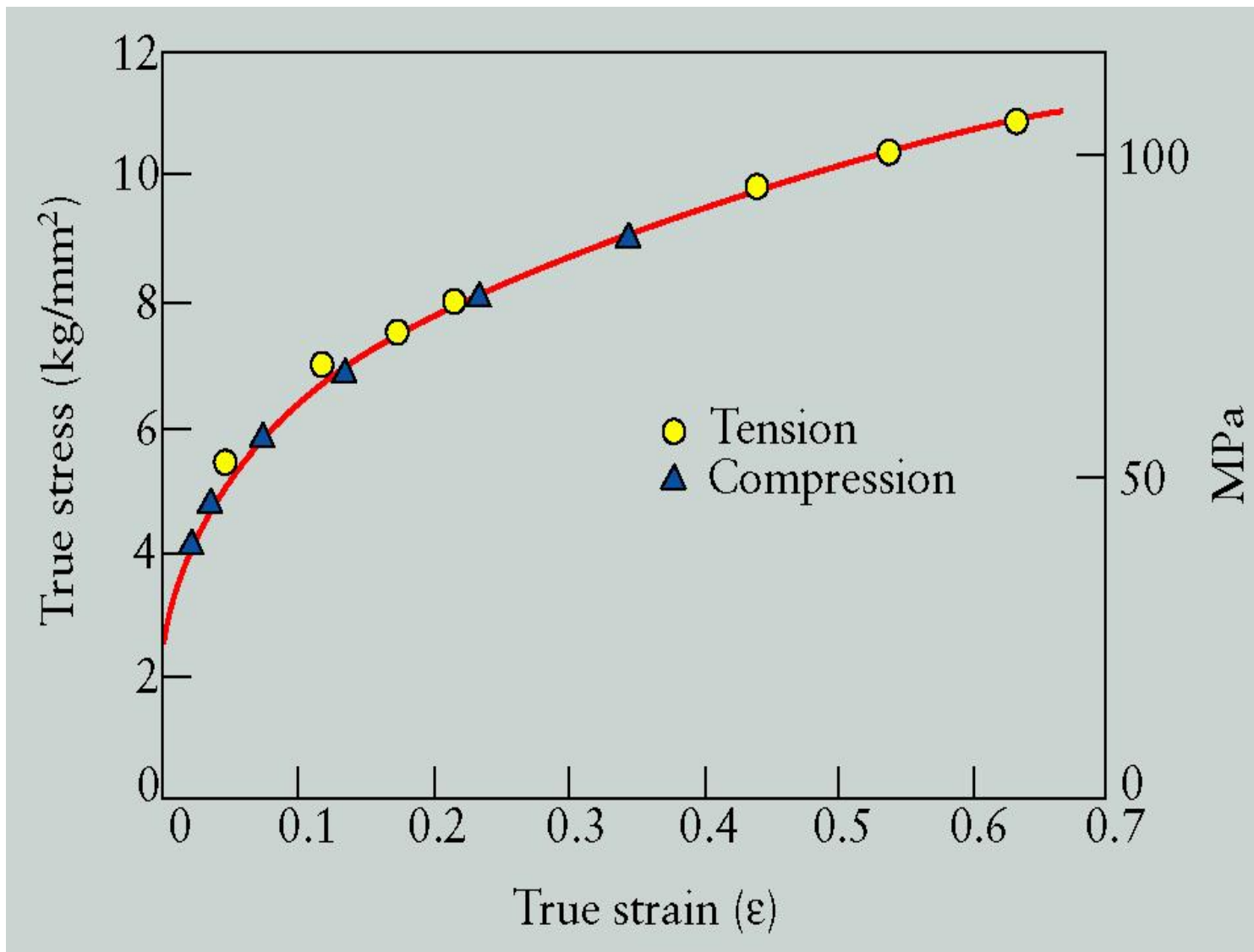
estricção na tração

$$\phi = \frac{S_f - S_o}{S_o}$$

## $(\sigma_u)$ Limite de Resistência à Compressão :

Máxima tensão que pode suportar antes da fratura



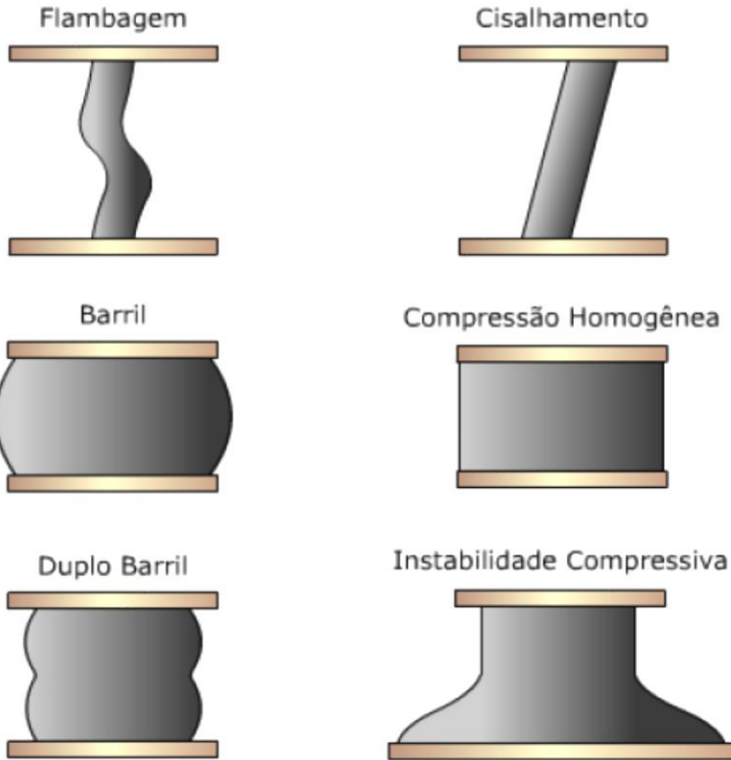


**FIGURA 4** Curva tensão – deformação verdadeira em tração e compressão para o Al.

# Modos de Deformação – Material Dúctil



## Modos de Deformação

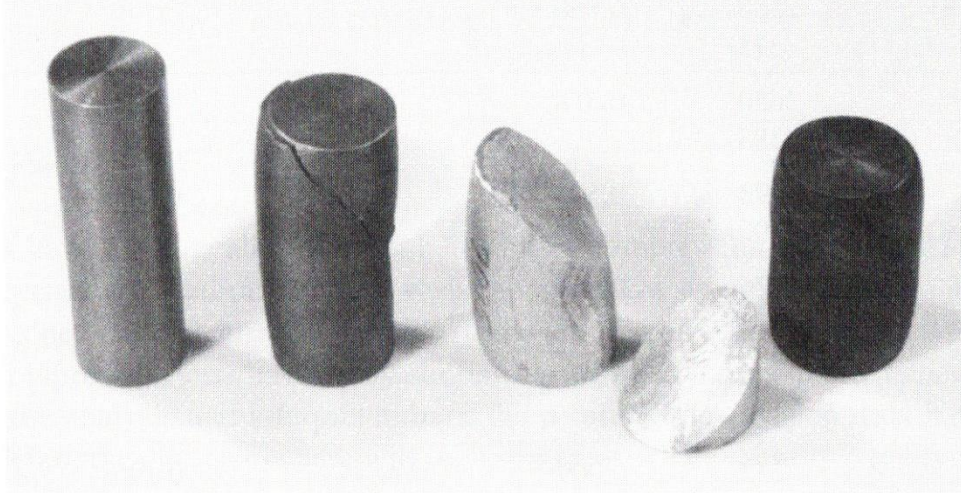


clique nas figuras

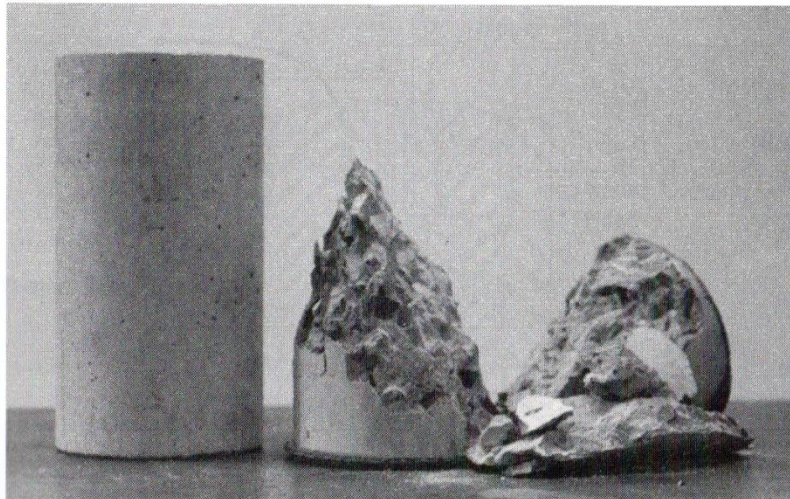
- (a) Flambagem, quando  $L/D > 5$
- (b) Cisalhamento, quando  $L/D > 2,5$
- (c) Barril duplo, quando  $L/D > 2,0$
- (d) Barril , quando  $L/D > 2,0$  e há fricção nas superfícies de contato
- (e) Compressão homogênea, quando  $L/D < 2,0$  e não existe fricção nas superfícies de contato
- (f) Instabilidade compressiva devido ao amolecimento do material por efeito de carga.

**A flambagem, o cisalhamento e a instabilidade devem ser evitados**

# Resultados de ensaios de compressão



**Figure 4.23** Compression specimens of metals (left to right): untested specimen, and tested specimens of gray cast iron, aluminum alloy 7075-T651, and hot-rolled AISI 1020 steel. Diameters before testing were approximately 25 mm, and lengths were 76 mm. (Photo by R. A. Simonds.)



**Figure 4.24** Untested and tested 150 mm diameter compression specimens of concrete with Hokie limestone aggregate. (Photo by R. A. Simonds.)

■ Resultado do ensaio na forma de gráficos: Carga (P) x Deslocamento ( $\Delta L$ ).

**CORPO DE PROVA:**

geralmente barra cilíndrica, mas pode ser aplicado para qualquer geometria (esforços normais e radiais); comprimento  $l$  e diâmetro  $D$ ;

**PROPRIEDADES OBTIDAS:**

**Tensão Convencional :**

$$\sigma_c = \frac{P}{S_0} = \frac{4.P}{(\pi.D_0^2)}$$

**Tensão Real :**

$$\sigma_r = \frac{P}{S} = \frac{4.P}{(\pi.D^2)}$$

como  $V = V_0$

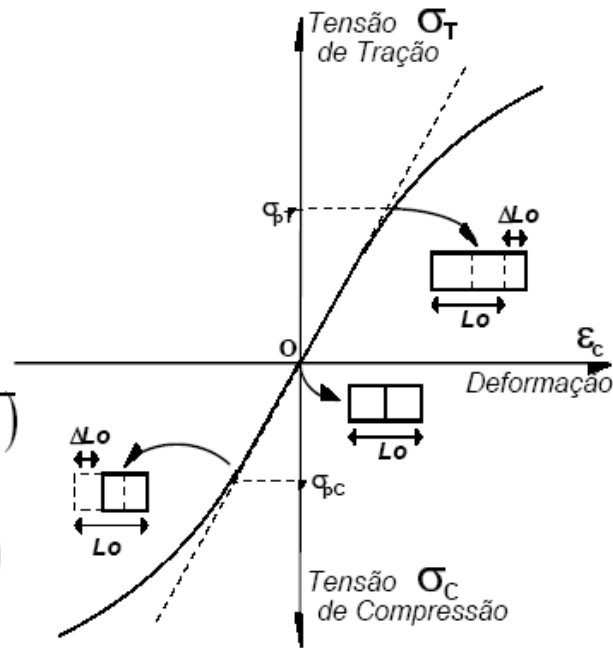
$$\frac{\pi.D_0^2}{4}.h_0 = \frac{\pi.D^2}{4}.h \quad D^2 = D_0^2 \cdot \left(\frac{h_0}{h}\right)$$

$$\sigma_r = \frac{4.P.h}{\pi.D_0^2.h_0}$$

**Deformação Real :**

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h - h_0}{h_0} = -\left(1 - \frac{h}{h_0}\right)$$

$$\varepsilon_r = \int_{h_0}^h \frac{dh}{h} = \ln \frac{h}{h_0} = -\ln \frac{h_0}{h}$$



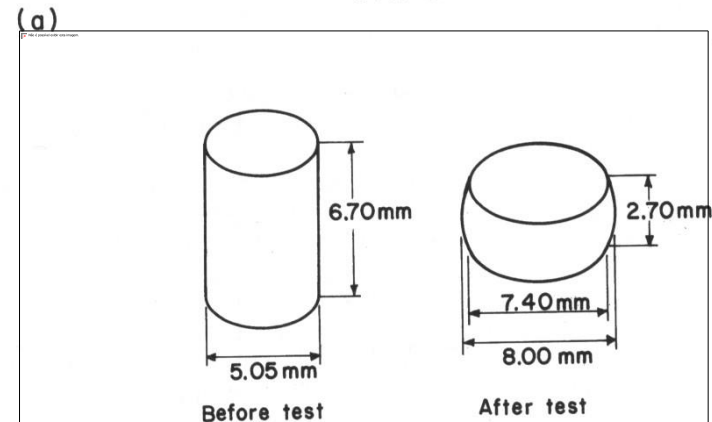
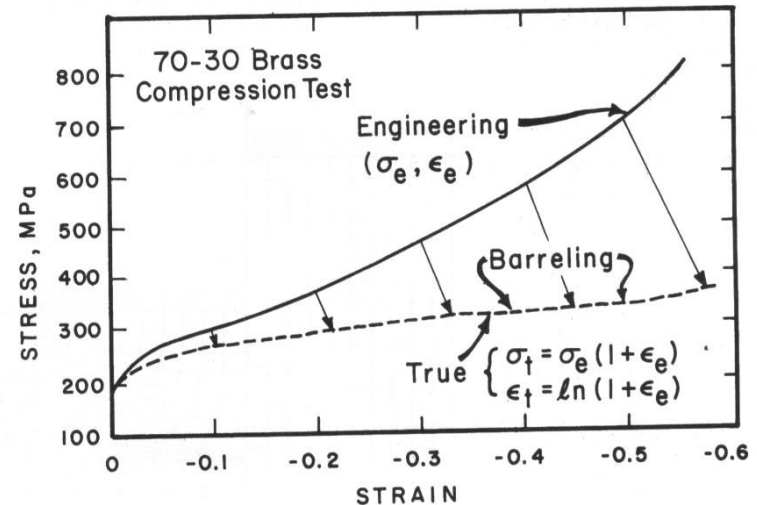
# Tensões e Compressões Verdadeiras

## ➤ Tensão Verdadeira:

$$\sigma_r = \frac{4.P.h}{\pi.D_0^2.h_0}$$

## ➤ Deformação Verdadeira:

$$\varepsilon_r = -\ln \frac{h_0}{h}$$



(b)

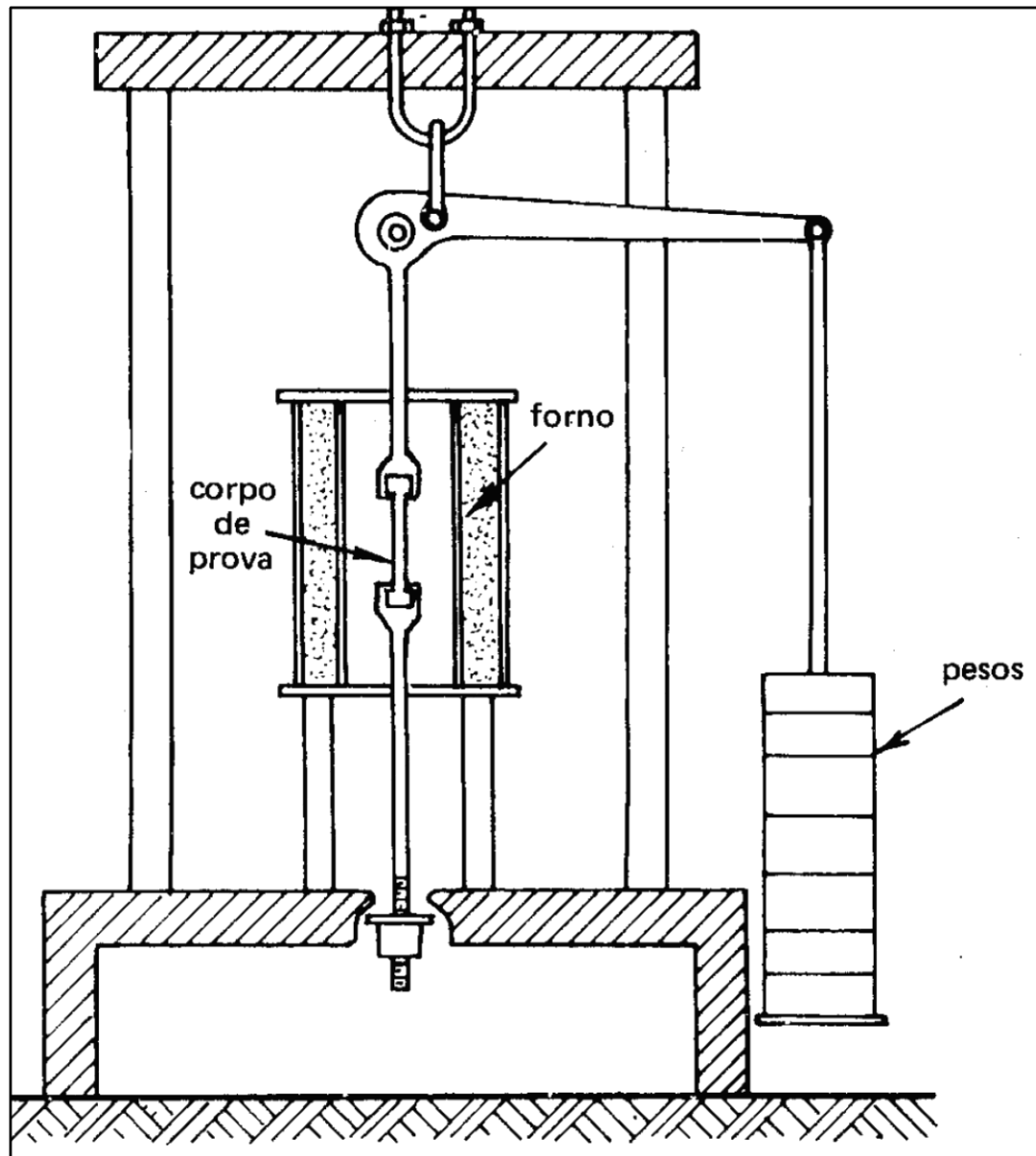
**Figure 3.14** (a) Stress-strain (engineering and true) curves for 70-30 brass in compression. (b) Change of shape of specimen and barreling.



# FLUÊNCIA



# ENSAIO DE FLUÊNCIA



# Ensaio de Fluência

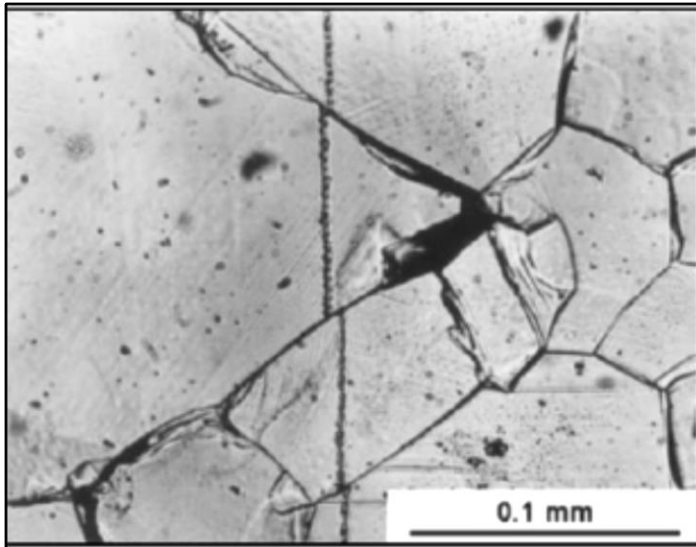


O ensaio de fluência pode ser dividido em três estágios:

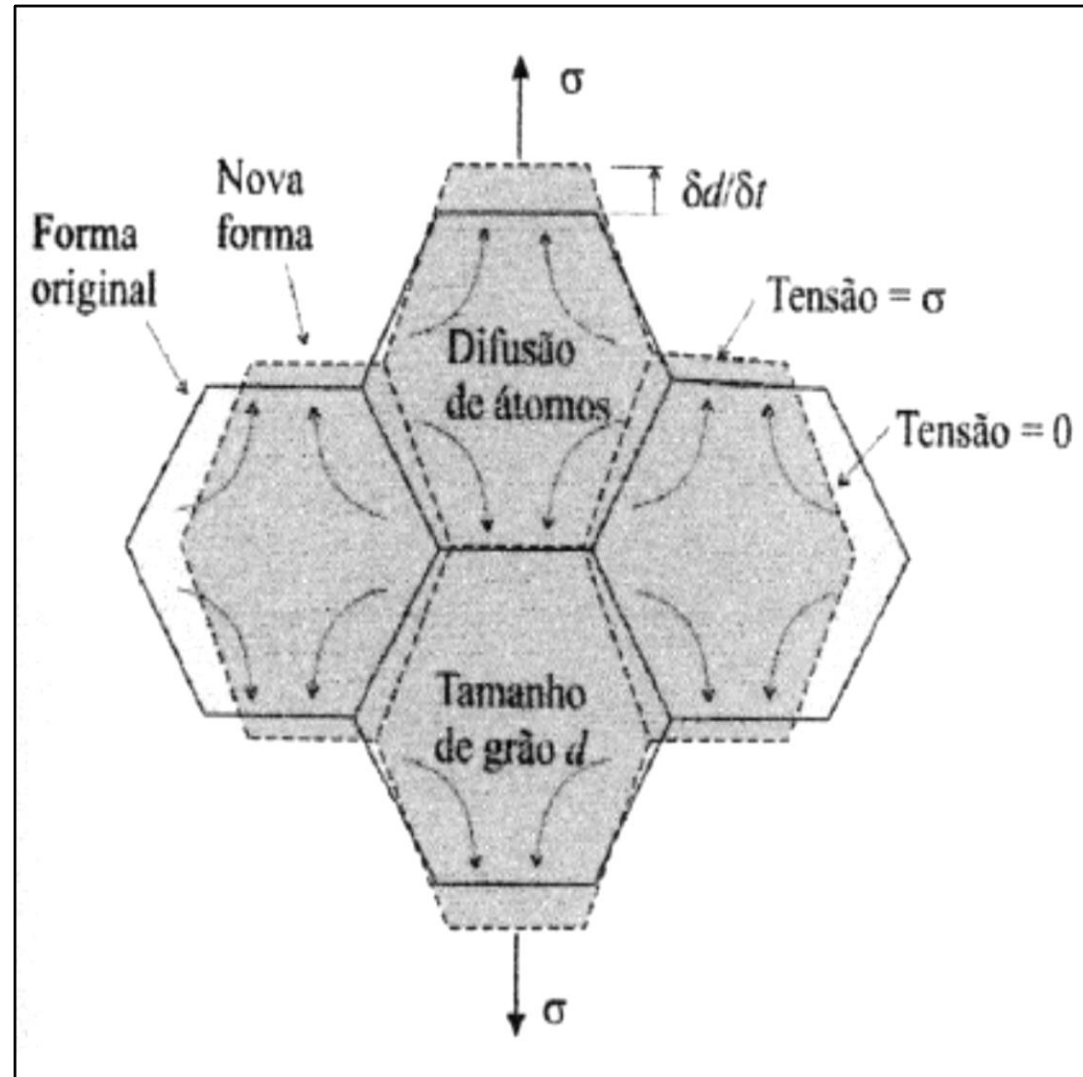
- Primário: decréscimo contínuo da taxa de fluência ( $d\varepsilon/dt$ ) em função do aumento de resistência devido ao encruamento
- Secundário: taxa de fluência constante, função do equilíbrio entre encruamento e recuperação (devido temp.). O parâmetro mais importante (**taxa mínima de fluência**) consiste na inclinação da curva nesse estágio
- Terciário: aceleração da taxa de fluência devido a estricção do CP culminando na ruptura devido à formação e propagação de trincas



## MECANISMOS DE NABARRO-HERRING



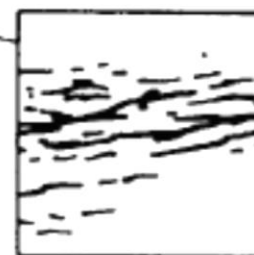
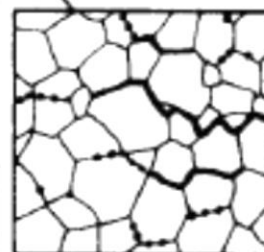
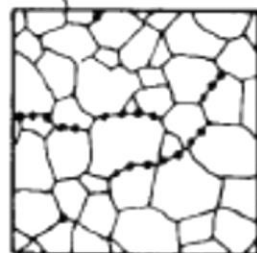
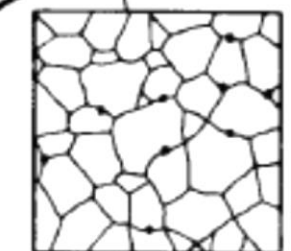
### DESLIZAMENTO DE CONTORNOS DE GRÃO



DEFORMAÇÃO

PARÂMETRO DE DANO	AÇÕES RECOMENDADAS
A	NENHUMA ATÉ A PRÓXIMA PARADA PROGRAMADA
B	RE-INSPEÇÃO POR RÉPLICAS EM 1 1/2 A 3 ANOS
C	REPARO OU SUBSTITUIÇÃO EM 6 MESES
D	REPARO OU SUBSTITUIÇÃO IMEDIATA

**RÉPLICA METALGRÁFICA**



Fracture

TEMPO

Avaliação de vida sob fluência segundo Neubauer e Wendel



## *Conjunto de Máquinas INSTRON*





# FADIGA

# PROPRIEDADES MECÂNICAS

## FADIGA

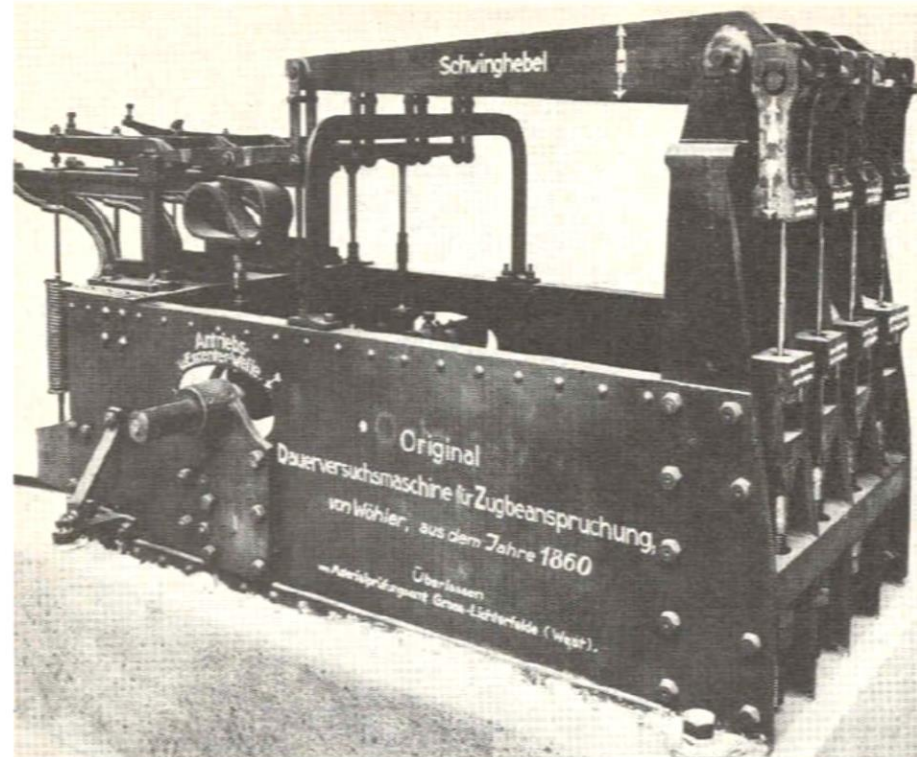
- **Definição:** Fadiga mecânica é a degradação das propriedades mecânicas levando à falha do material ou de um componente sob carregamento cíclico;
- **Exemplos:** automóveis nas ruas, aviões (principalmente nas asas) no ar, navios em alto mar, constantemente em choque com as ondas, reatores nucleares etc...(perceba então a importância do fenômeno de fadiga).



Mais de 90% das falhas: fadiga ou combinada à fadiga

- Fadiga **de alto ciclo (controlado por tensão)**;
- Fadiga **de baixo ciclo (controlada por deformação)**;
- **Propagação** de trinca por fadiga;
- Avaliação da **sensibilidade ao entalhe**;
- Fadiga **por fretting**;
- Fadiga **multiaxial**;
- Fadiga térmica: **isotérmica e termomecânica**;
- Fadiga em **meios agressivos**: iniciação e propagação;
- **Fadiga-fluência**.

○ August Wöhler 1819 – 1914



Sistema de ensaios de fadiga axial para quatro corpos de prova (Wöhler, 1860)

FADIGA

# Jatos Comet



(Prof.Dr. Claudio Ruggieri)

**FADIGA**

# **Jatos Comet**

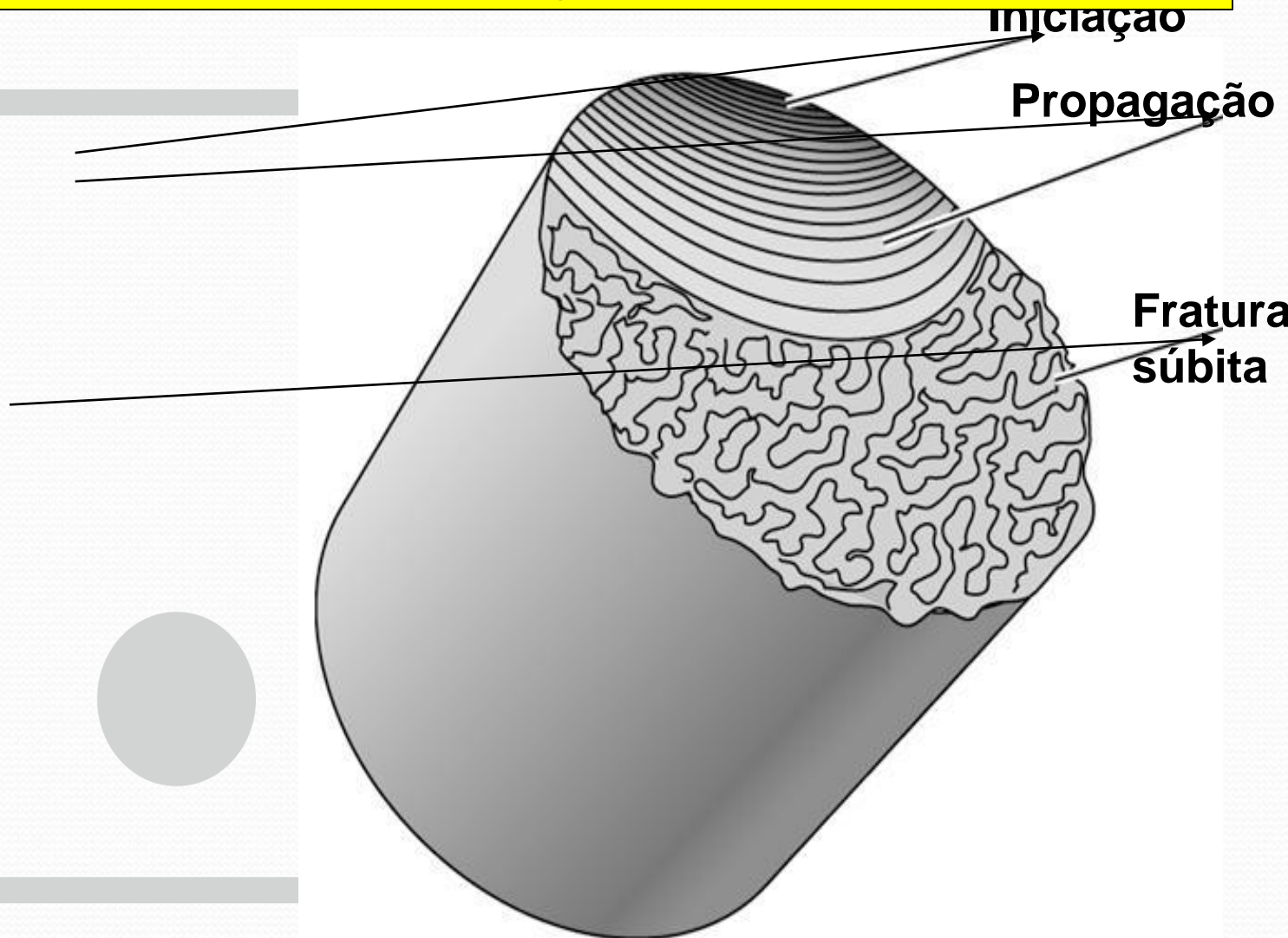


**Falha Iniciada a Partir de Furo de Rebite  
Próximo à Janela**

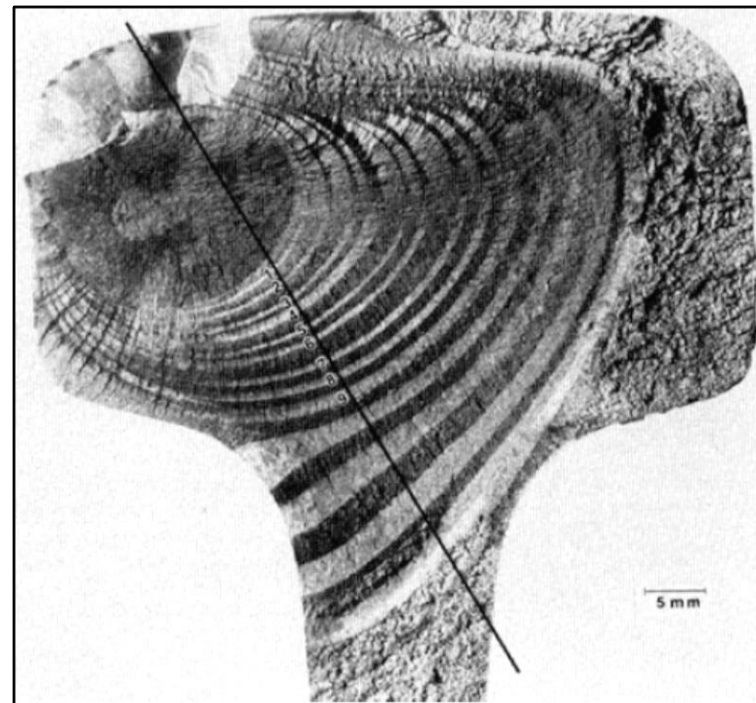
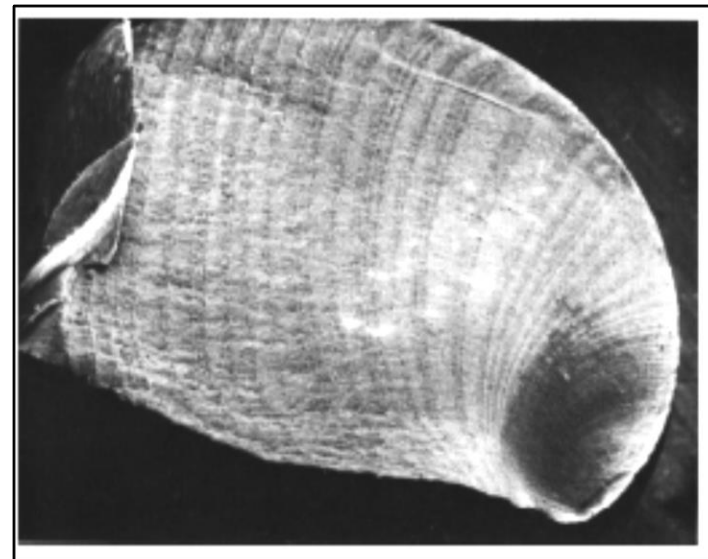
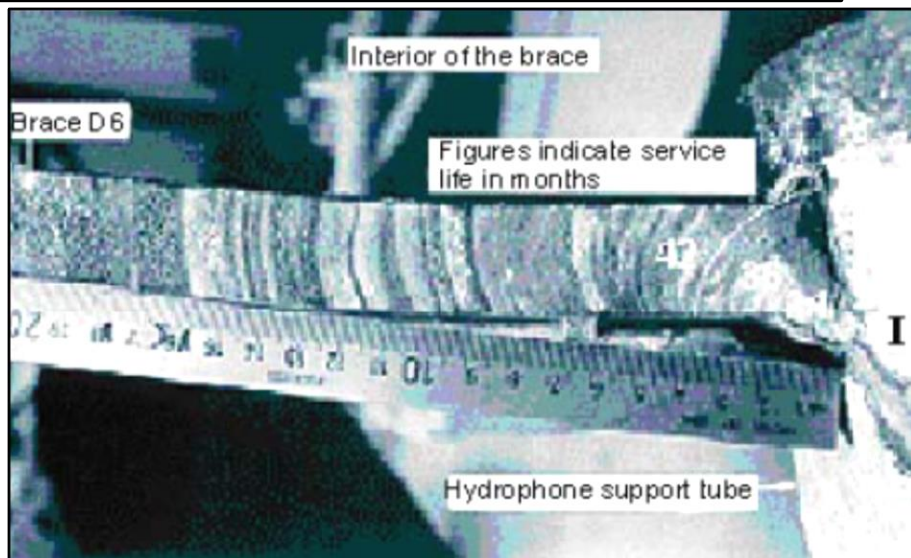
(Prof.Dr. Claudio Ruggieri)

# Fraturas de Fadiga e Características Macroscópicas

Ocorre em níveis de tensões muito mais baixos do que sobre carregamento monotônico (ensaio de tração).



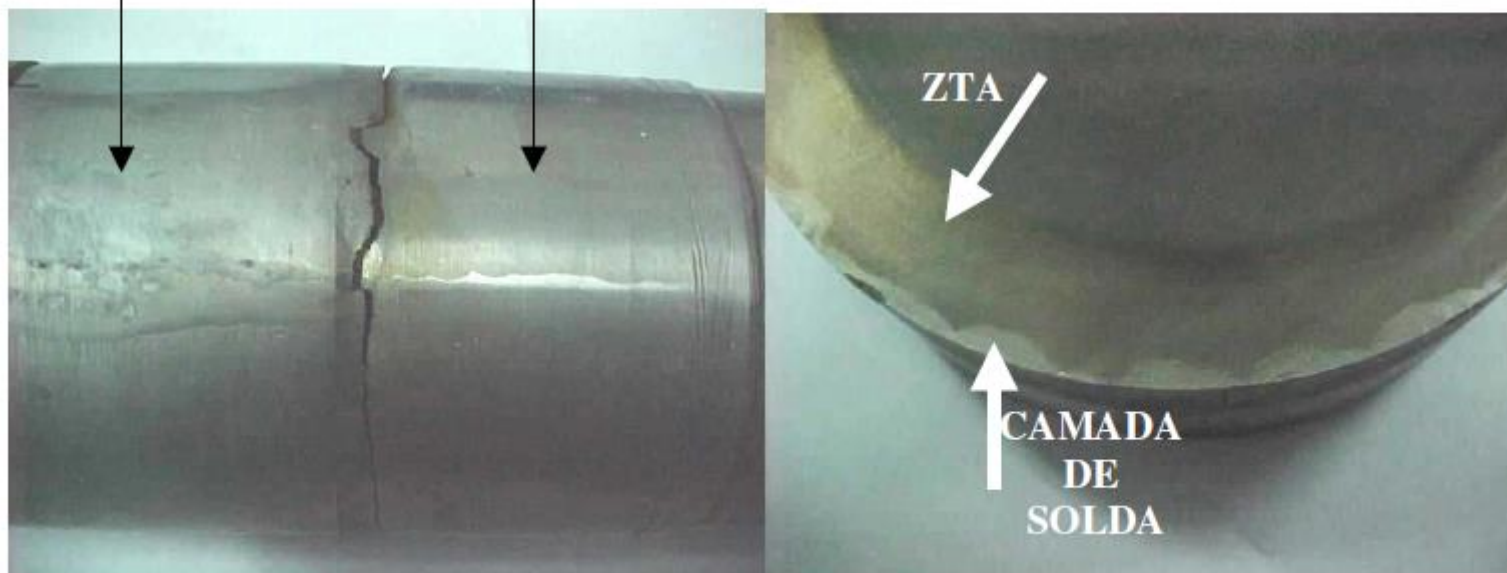
# FADIGA- MARCAS DE PRAIA



**A TRINCA POR FADIGA É NUCLEADA NA SUPERFÍCIE, A NÃO SER QUE OCORRA UMA DESCONTINUIDADE SUBSUPERFICIAL.**

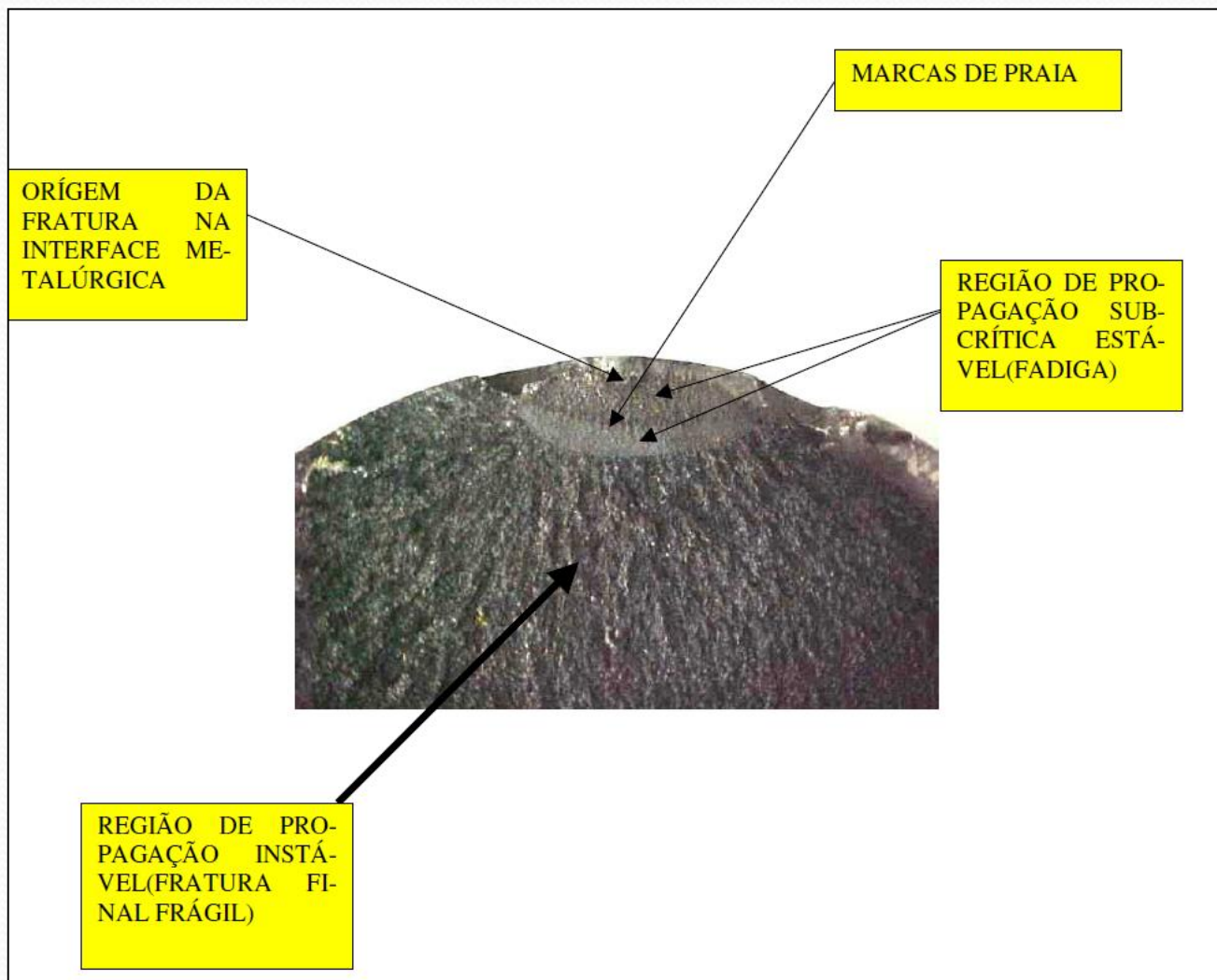
**CAMADA DE  
SOLDA**

**SOLDA REVELADA POR NITAL  
(MATOU A PEÇA E TENTOU CONSERTAR COM  
SOLDA SEM TT)**

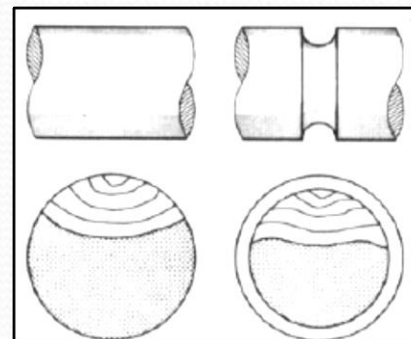


**ANÁLISE DE FALHAS – EIXO – AÇO SAE4140 – T+R - 2005.**

**A TRINCA POR FADIGA É NUCLEADA NA SUPERFÍCIE, A NÃO SER QUE OCORRA UMA DESCONTINUIDADE SUBSUPERFICIAL.**

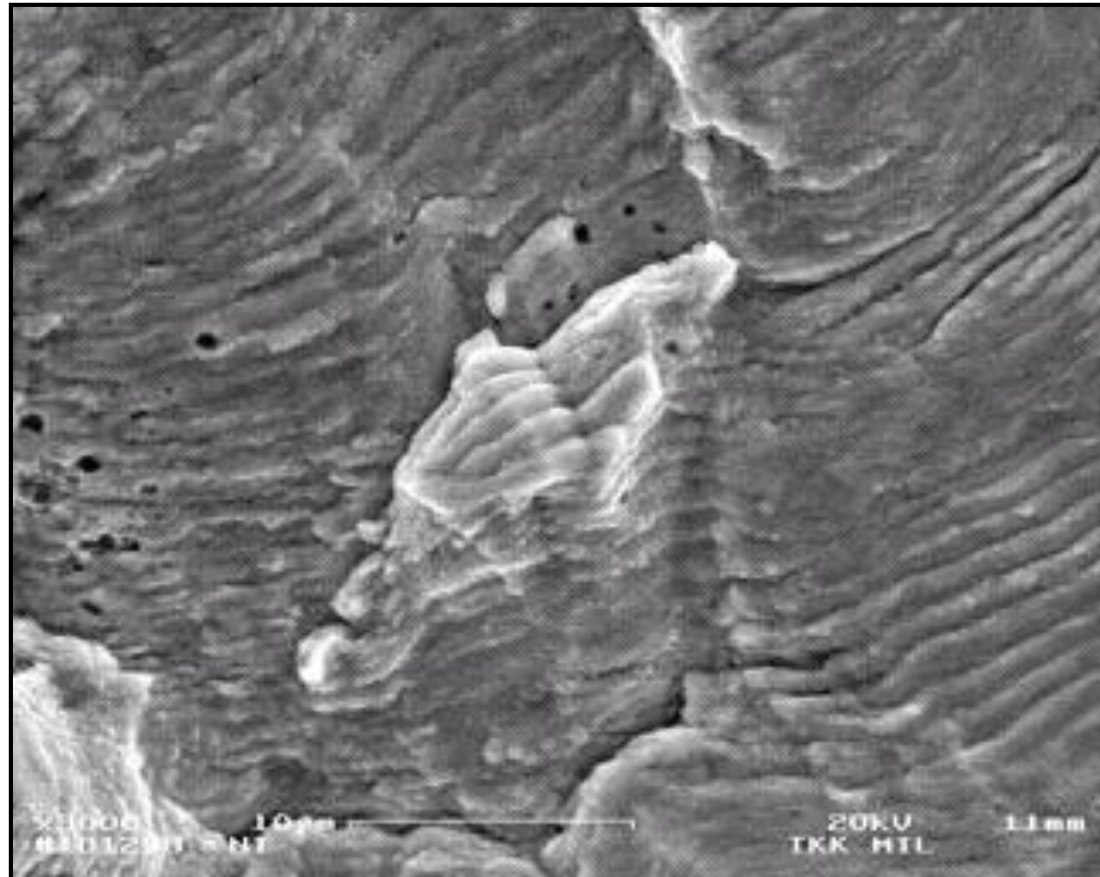


ALTAS TENSÕES





# FADIGA



**ESTRIAS – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA**

# FADIGA

## solicitação cíclica

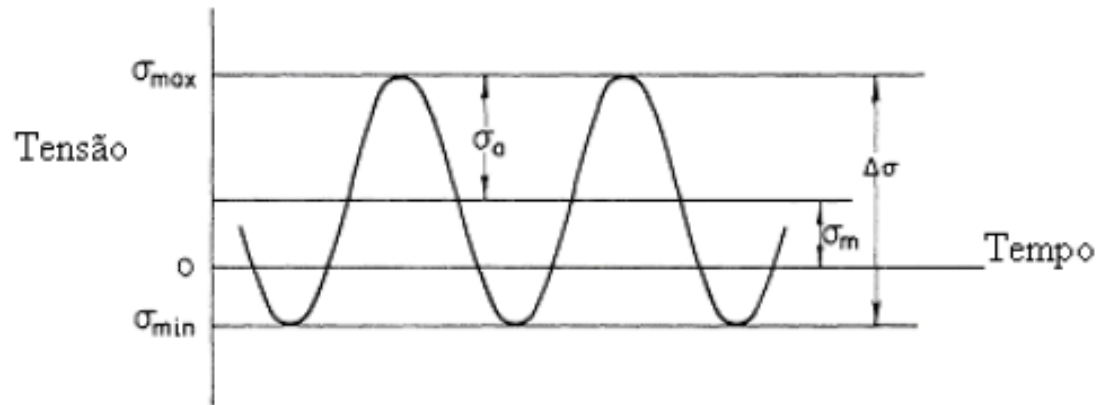


Figura 8 – Parâmetros de fadiga.

Intervalo da tensão cíclica:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

Amplitude da tensão cíclica:

$$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$$

Tensão média:

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$$

Razão de tensão:

$$R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max},$$

onde  $\sigma_{\max}$  e  $\sigma_{\min}$  são os máximos e mínimos níveis de tensões, respectivamente.

## FADIGA

### ● Fadiga de Alto Ciclo

#### FADIGA CONTROLADA PELA TENSÃO

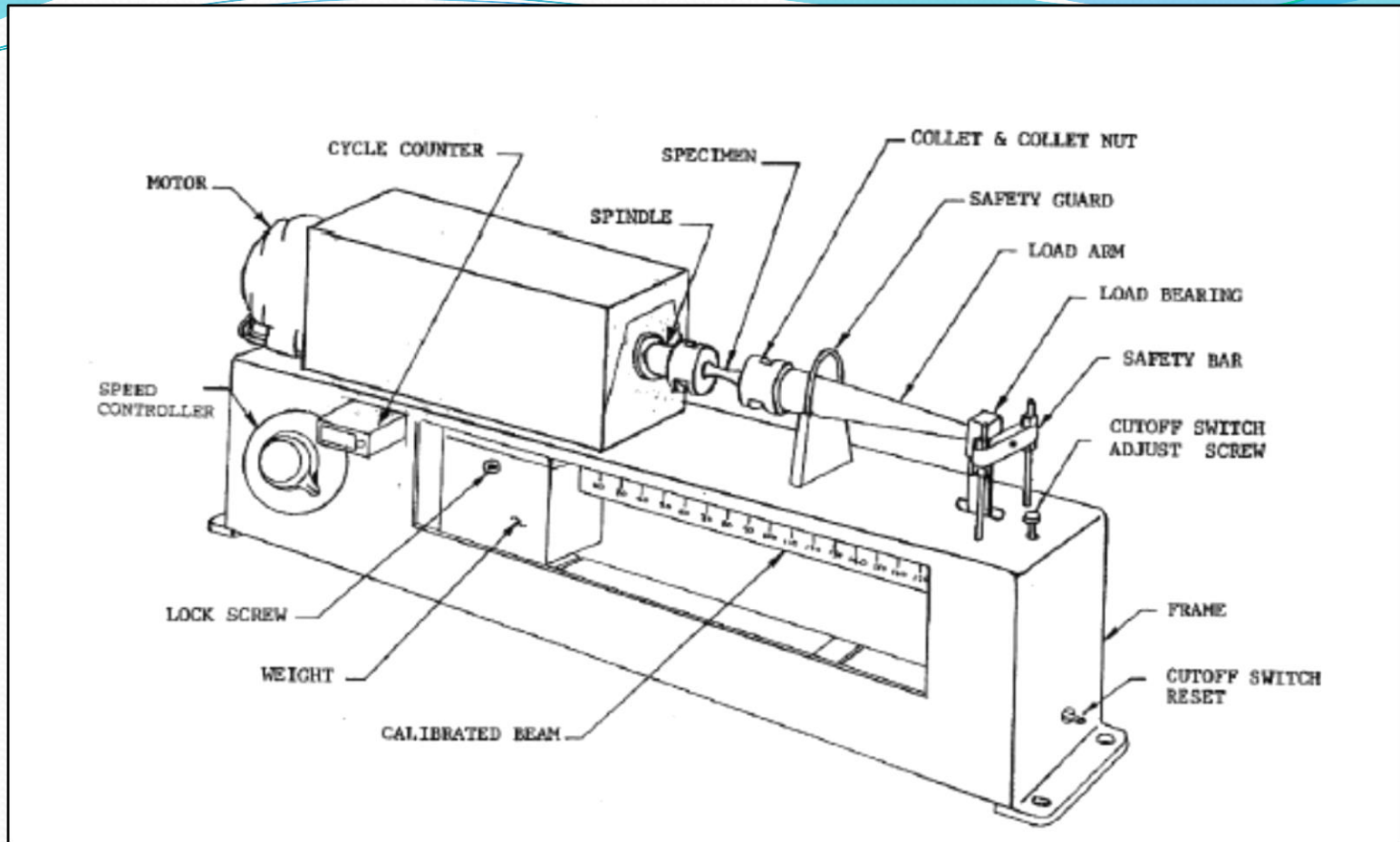
Tensões cíclicas com valor máximo e mínimo menores que o limite de escoamento. N<sup>o</sup> de ciclos >1000. Ex: virabrequim, biela, máquinas operatrizes.

### ● Fadiga de Baixo Ciclo

#### FADIGA CONTROLADA PELA DEFORMAÇÃO

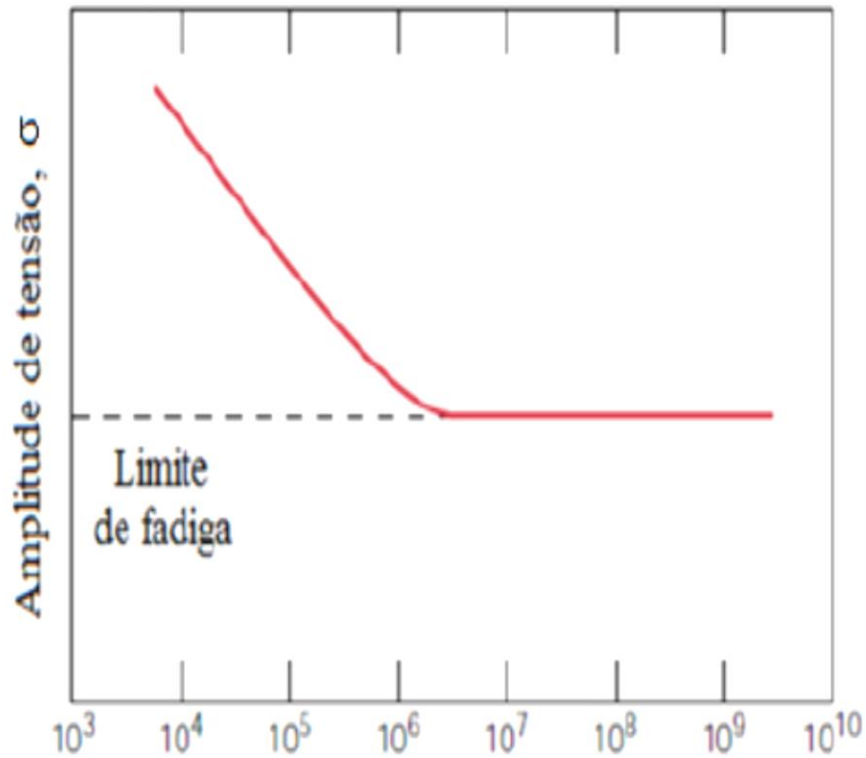
Tensões cíclicas com valor máximo e mínimo maiores que o limite de escoamento. N<sup>o</sup> de ciclos <1000. Ex: Cilindros de laminação, fadiga térmica, reatores químicos e petroquímicos.

# FADIGA

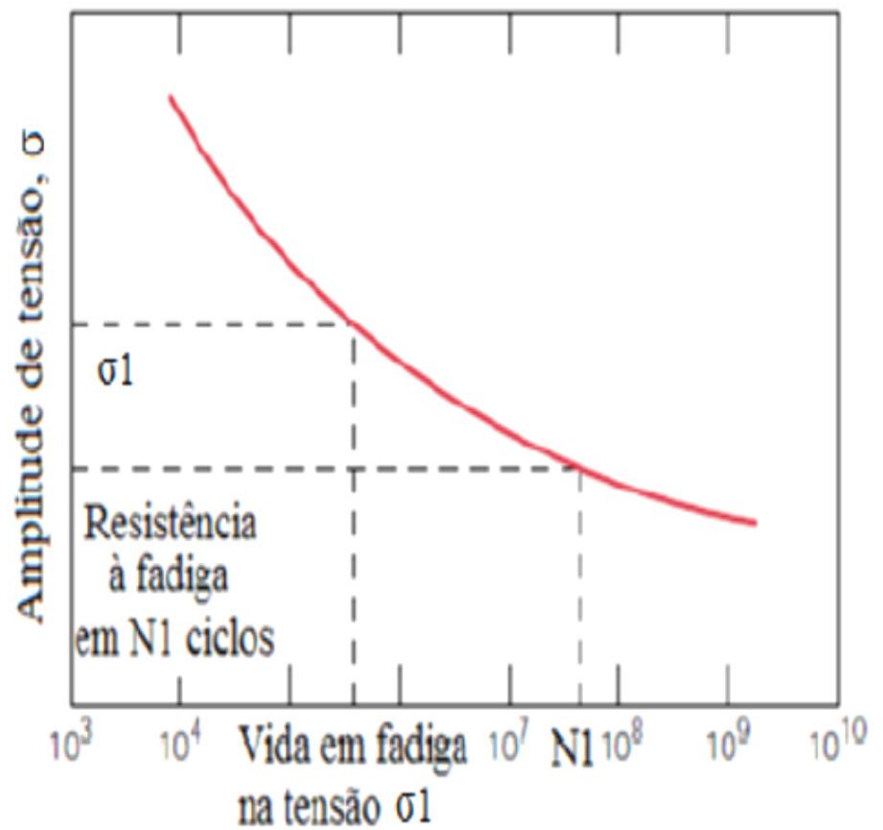


•Wöhler (1852) – Conclui, entre outras que o fenômeno da fadiga de alto ciclo é dependente de condições macroscópicas e microscópicas o que leva a uma dispersão estatística, aleatória.

# FADIGA

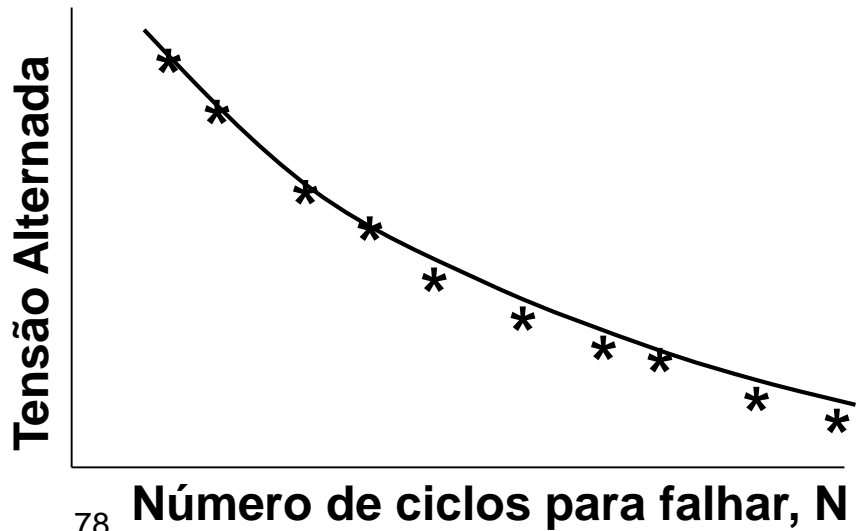
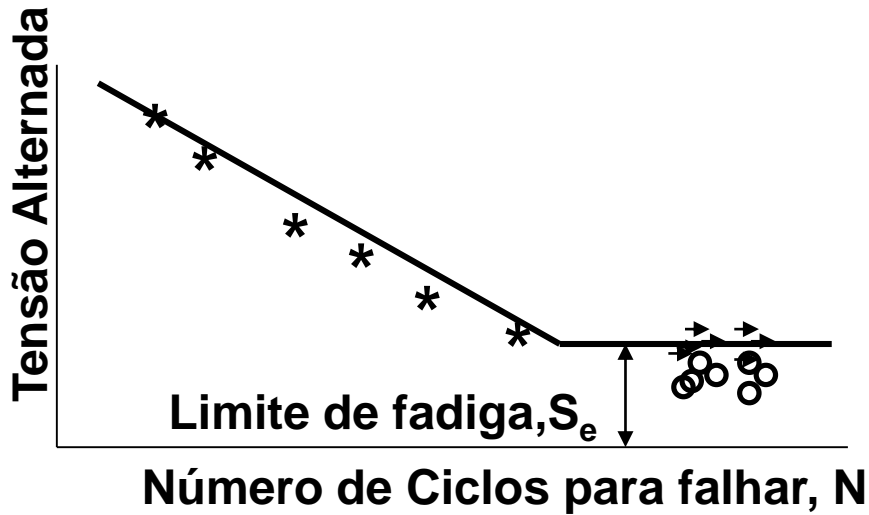


(a) Ciclos para a falhas (escala logarítmica)



(b) Ciclos para a falhas (escala logarítmica)

# Curva S-N e Limite de Fadiga



Ligas não Ferrosas: Não exibem claramente o limite de fadiga

# Relações Empíricas entre Limite de Fadiga e Propriedades Estáticas

Ligas Ferrosas - CP polido sob flexão reversa

Em termo de tensão limite de resistência,  $S_u$

$$S_e = 0,5 * S_u, \text{ para } S_u \leq 1400 \text{ MPa}$$

$$S_e = 700 \text{ MPa}, \text{ para } S_u > 1400 \text{ MPa}$$

Em termo de dureza Brinell

$$S_e = 0,25 * BHN, \text{ para } BHN \leq 400$$

$$S_e = 100 \text{ ksi}, \text{ para } BHN > 400$$

$$\text{Note, } S_u = 0,5 * BHN$$



# FIM