

# **SMM0193 – ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS I**

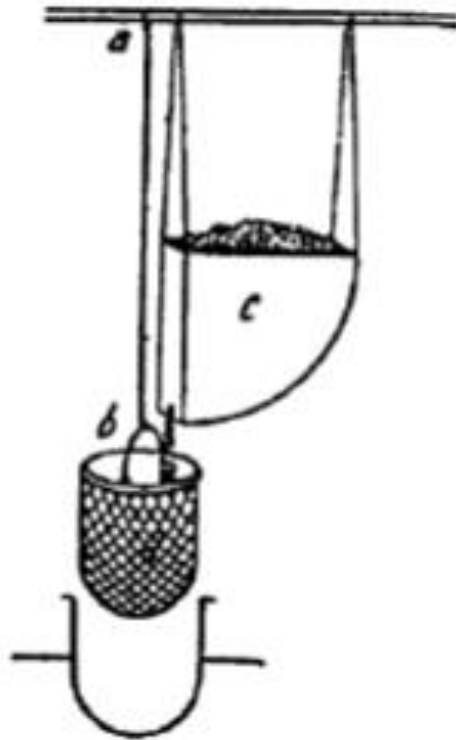
**Prof. Dr. José Benedito Marcomini**

# **ENSAIOS DE TRAÇÃO, COMPRESSÃO, FLUÊNCIA E FADIGA**

**TRAÇÃO**

# ENSAIO DE TRAÇÃO

Leonardo Da Vinci (1452-1519)

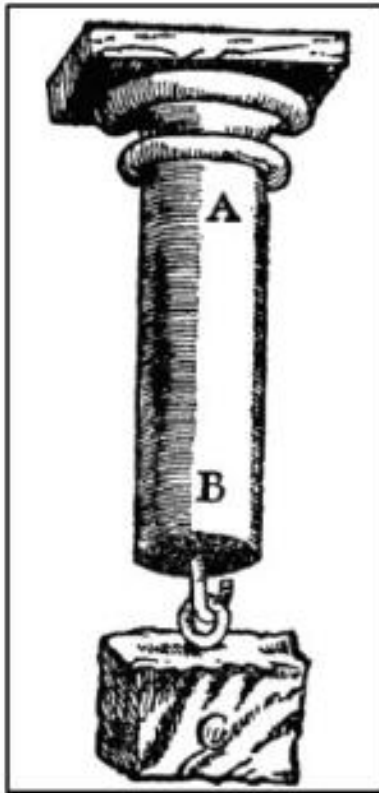


Testar as propriedades dos fios de ouro que laminava: a probabilidade de um arame metálico apresentar trincas era diretamente proporcional ao seu comprimento

Esquema do ensaio de tração idealizado por Leonardo Da Vinci.

# ENSAIO DE TRAÇÃO

**Galileu Galilei (1564-1642)**



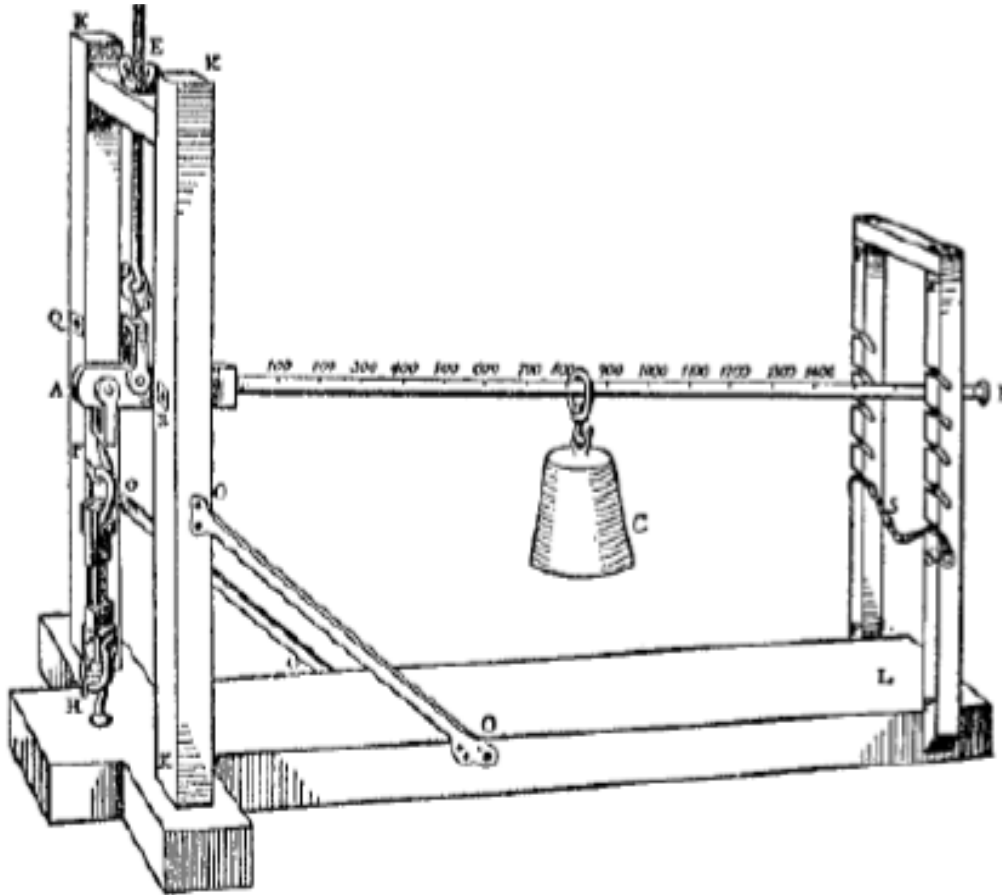
**A resistência à tração de uma barra era proporcional à área da secção transversal e independente do comprimento: “Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno à due nuove Scienze” (1638).**

Ilustração de Galileu para o ensaio de tração.

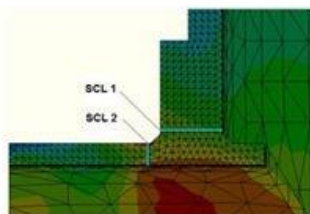
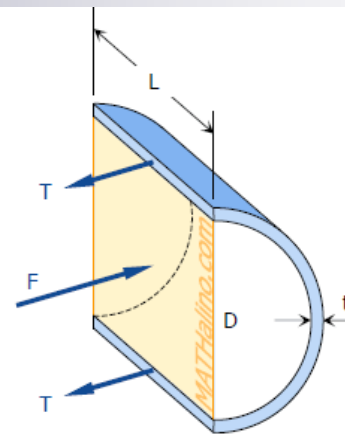
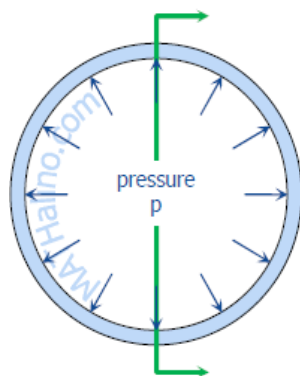
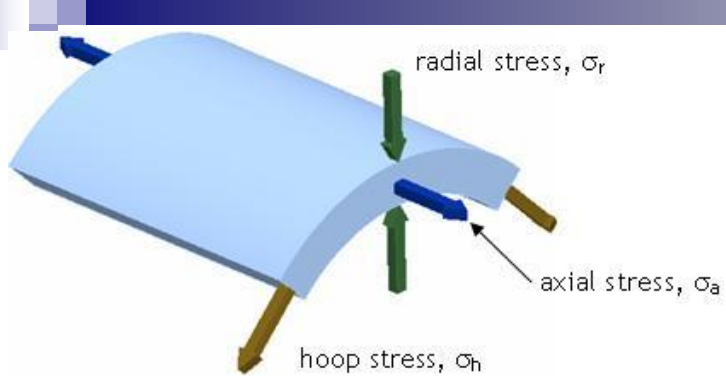
# ENSAIO DE TRAÇÃO

P. Van Musschenbroek (1692-1761)

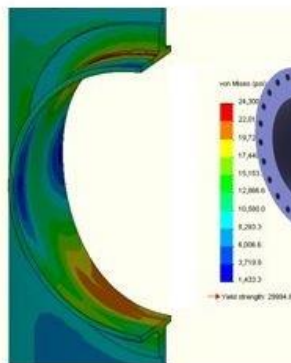
Máquina de tração de Musschenbroek.



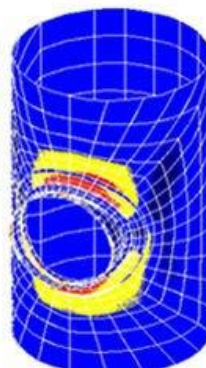
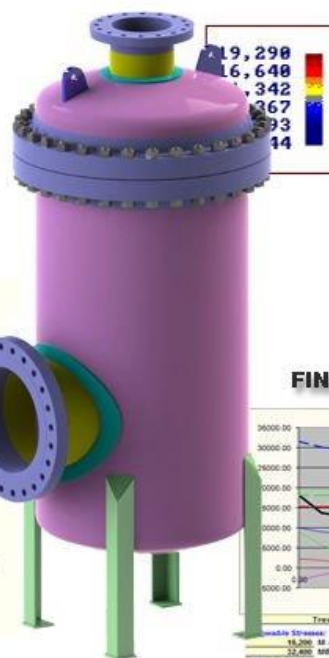
“Physicae  
Experimentales et  
Geometricae”,  
publicado em 1729



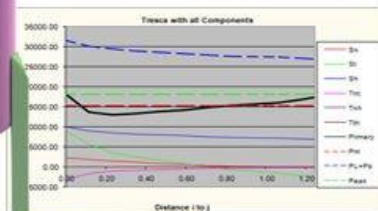
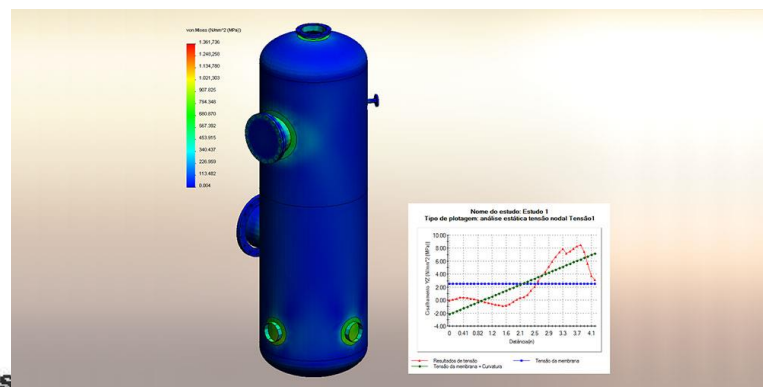
STRESS LINEARIZATION



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	Membrane-Bending Allowable (Max Pin for girth or Pin/1.5 for Local)

Actual Tensile Stresses:

15,200	Acceptable	Membrane
15,200	Acceptable	Bending
27,650	Acceptable	Membrane + Bending
15,198	Acceptable	Peak

3 nodes found on the stress classification line (SCL) and they could appear interpolated to 75 equally spaced nodes.

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

# Ensaio de Tração: Procedimentos Normalizados

**Os Ensaio Mecânicos podem ser realizados em:**

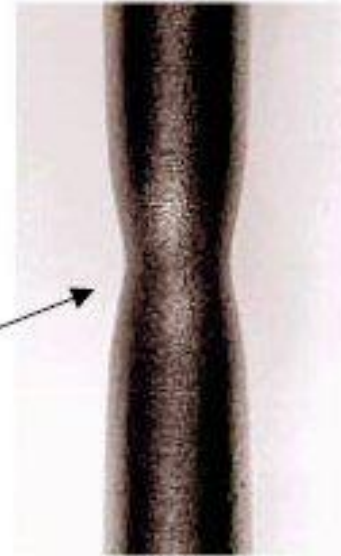
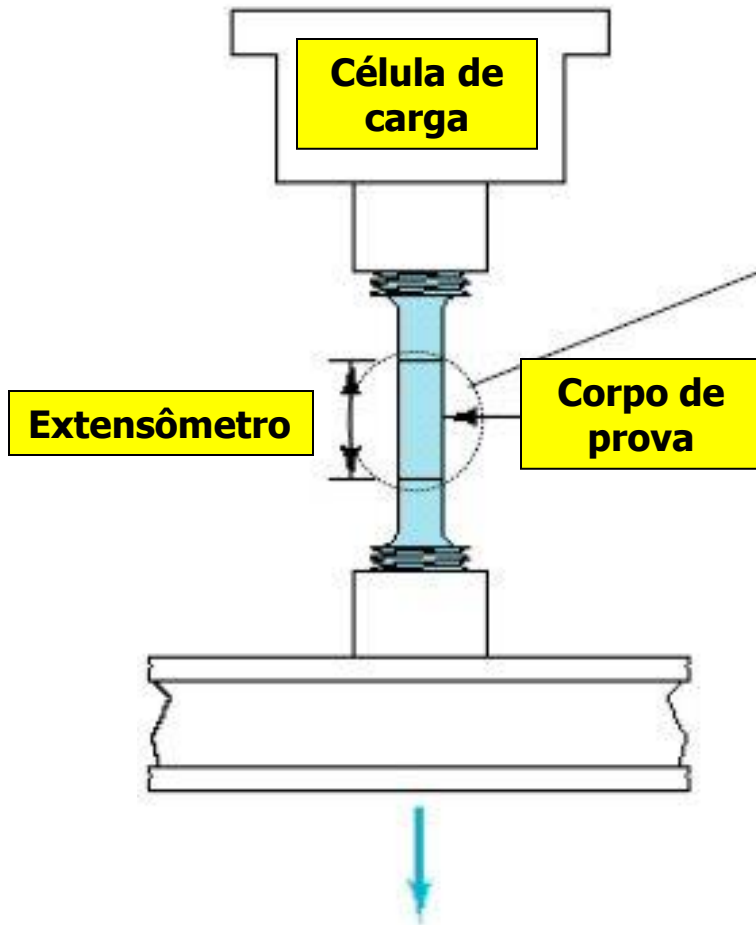
- **Produtos acabados:** os ensaios têm maior significado pois procuram simular as condições de funcionamento do mesmo (Ex: **Barras de protensão**). Mas na prática isso nem sempre é realizável;
- **Corpos de prova:** Avalia a propriedades dos materiais independentemente das estruturas em que serão utilizados. 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.



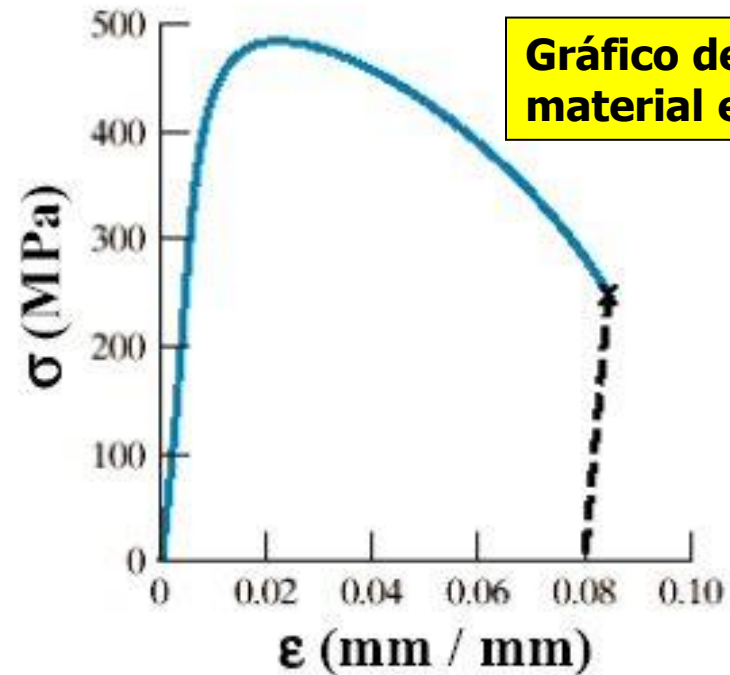
Para padronizar: Utilizam-se as **NORMAS**



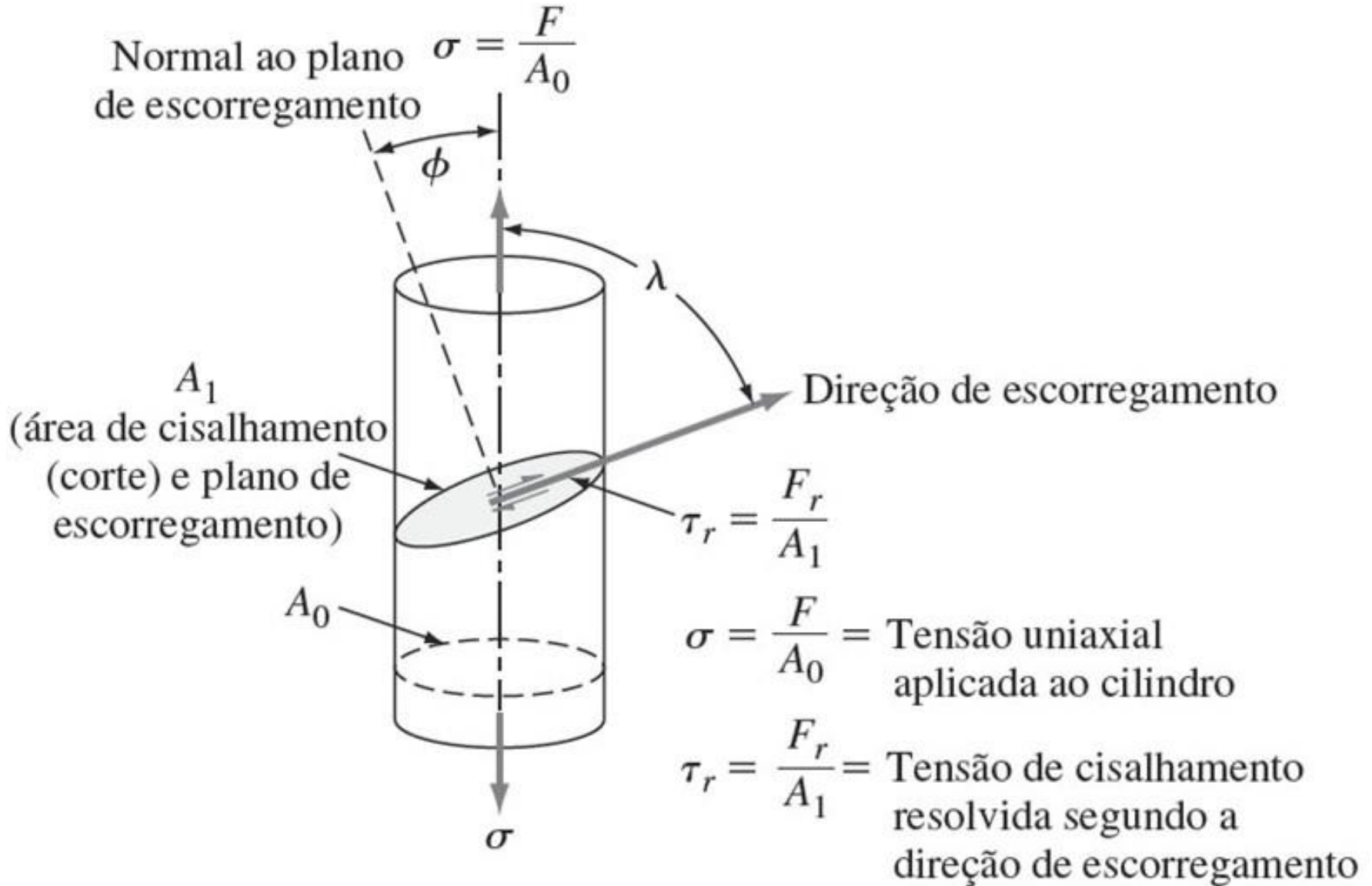
# ENSAIO DE TRAÇÃO



**Detalhe do início da estrição do material**



# Lei de Schmidt

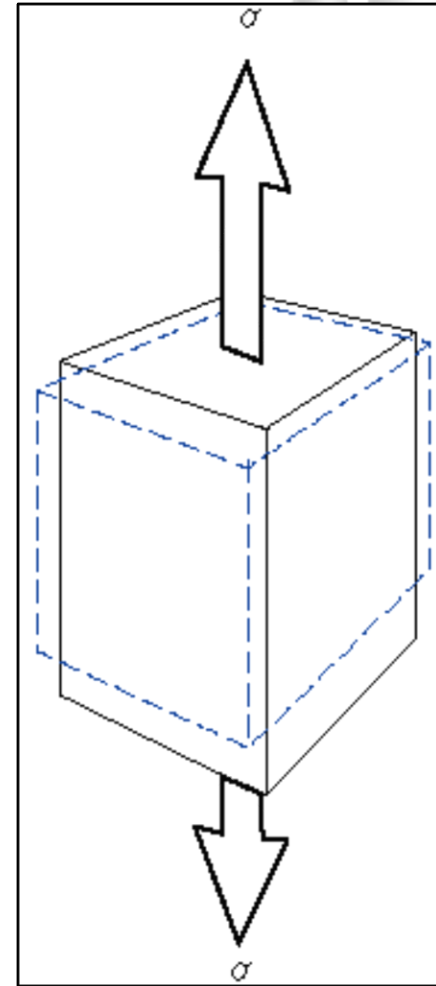


# Coeficiente de Poisson

- 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)**



# DEFINIÇÕES



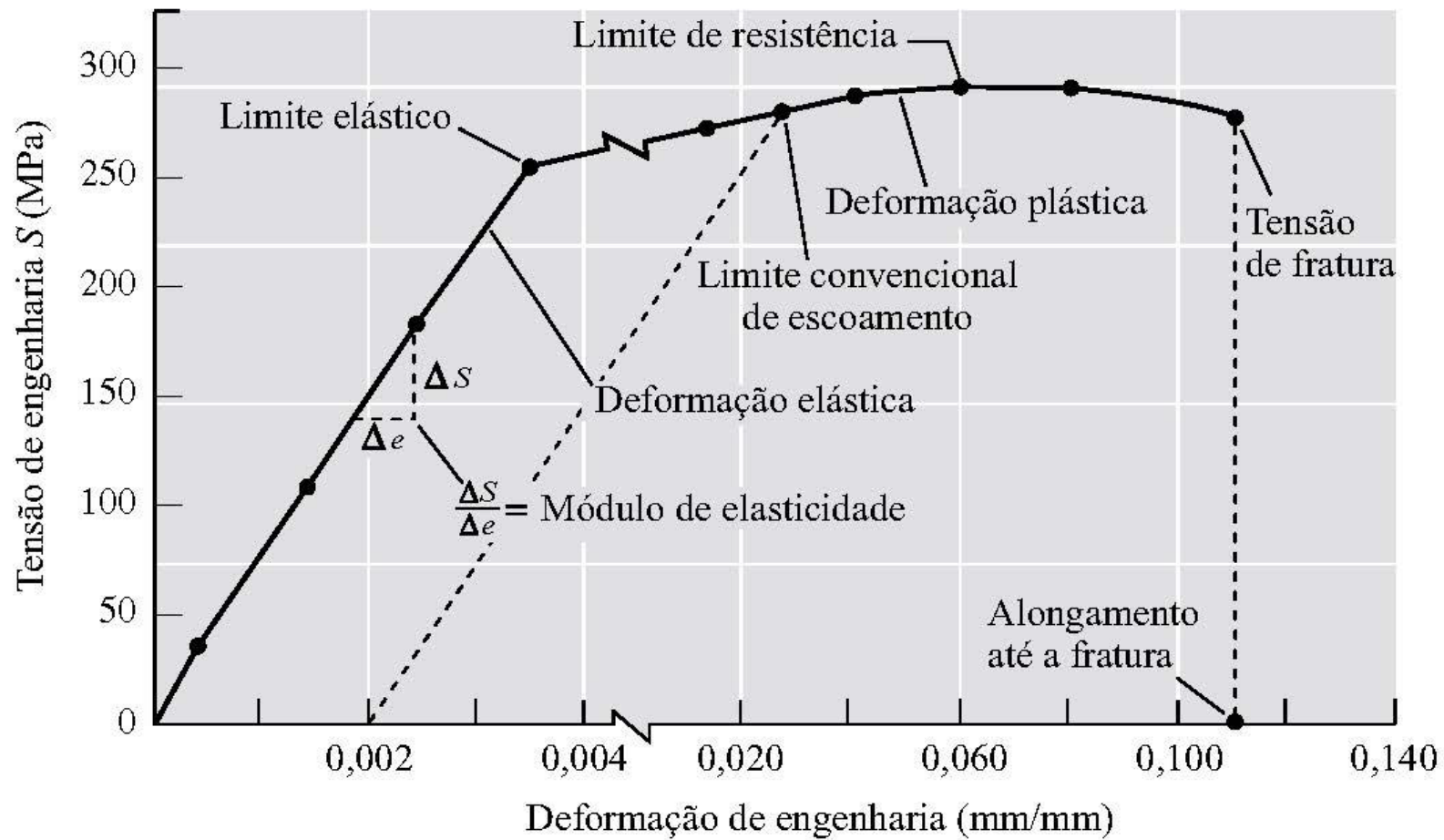
Tensão ( $\sigma$ ), Força ( $F$ ), Área inicial ( $S_0$ )

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

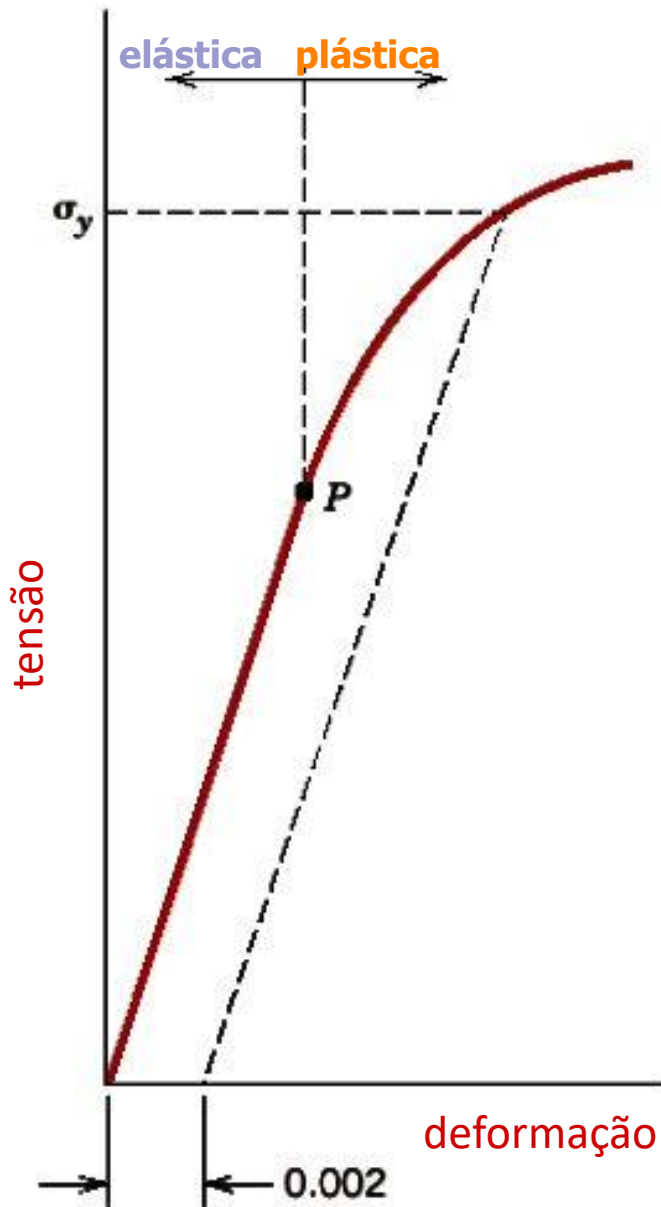
Deformação ( $\varepsilon$ ),  $\Delta L = L - L_0$ , Comprimento final ( $L$ ), Comprimento inicial ( $L_0$ ), Módulo de Elasticidade ( $E$ )

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$\sigma = E\varepsilon$$



## 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;

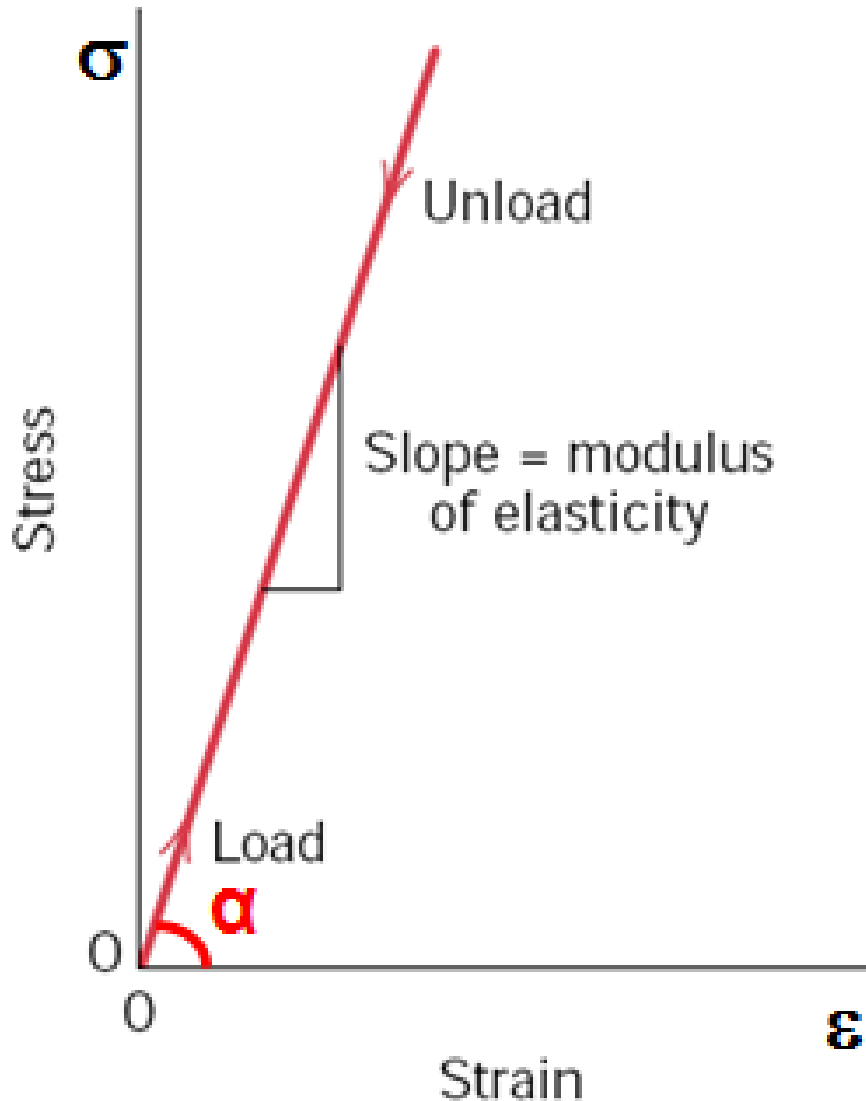
- ✓ numa curva de  $\sigma \times \varepsilon$ , a região elástica é a parte linear inicial do gráfico.

- **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) 15

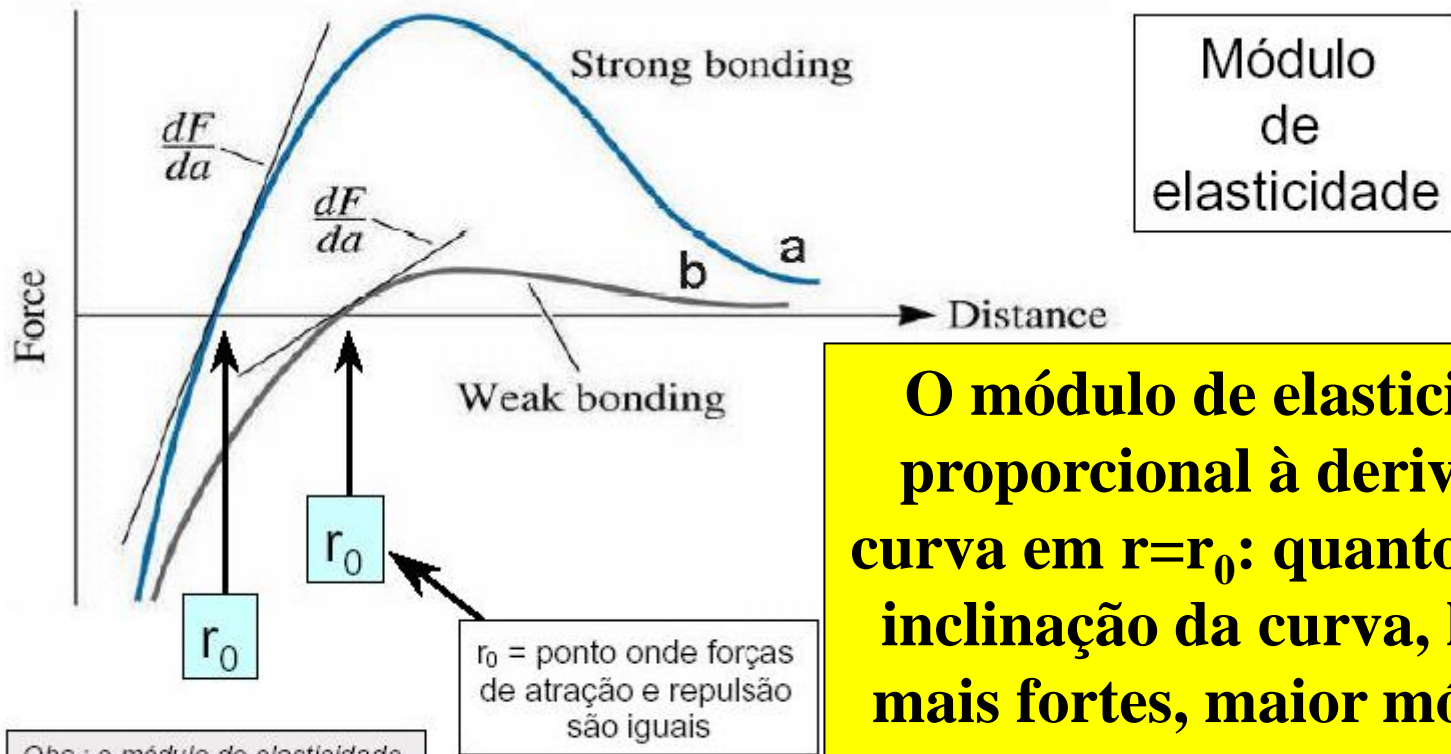
# Módulo de Elasticidade (E)

## 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

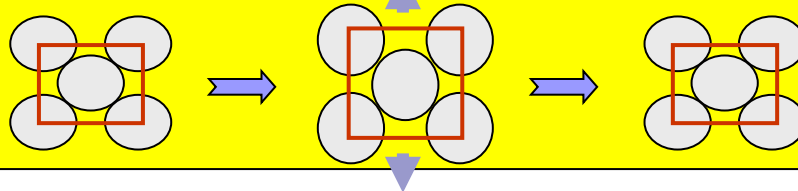
$r_0$  = ponto onde forças de atração e repulsão são iguais

**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!**

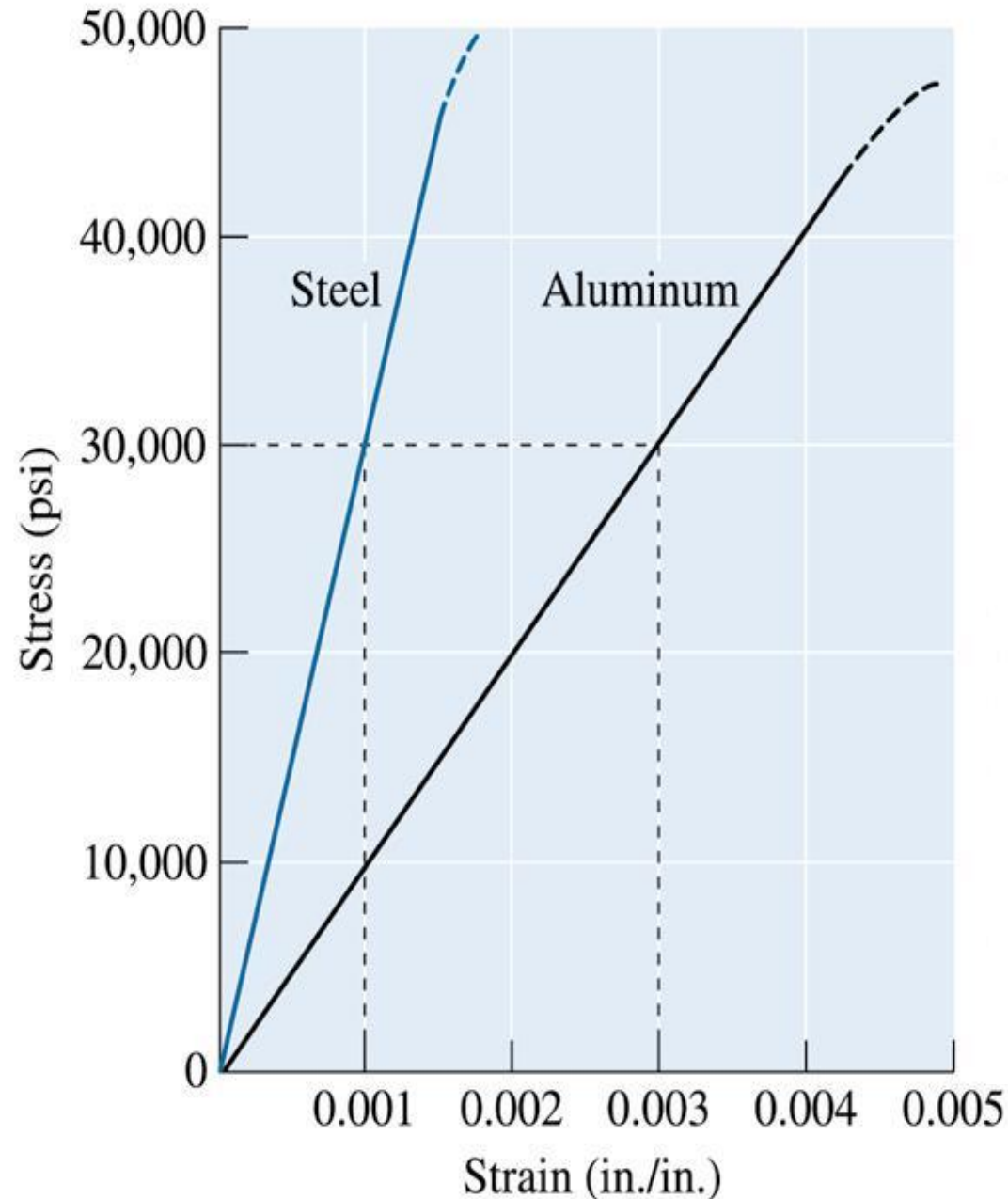
# Deformação Elástica

## 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*  $E$



# 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

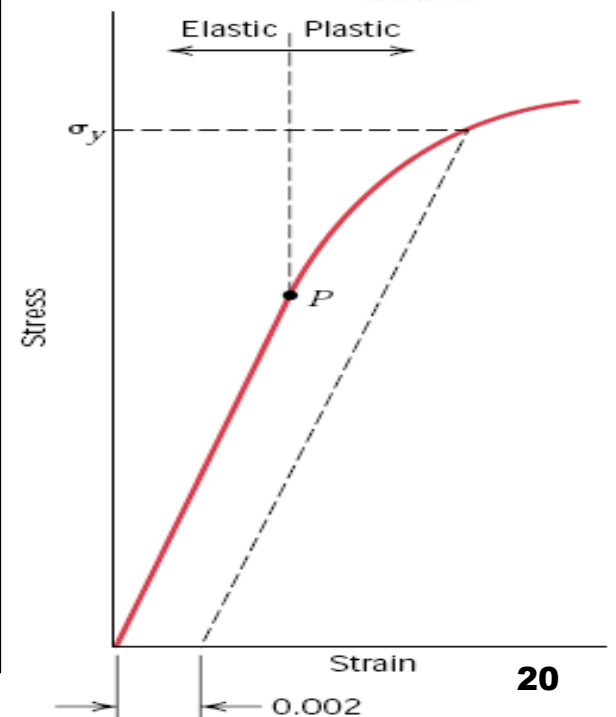
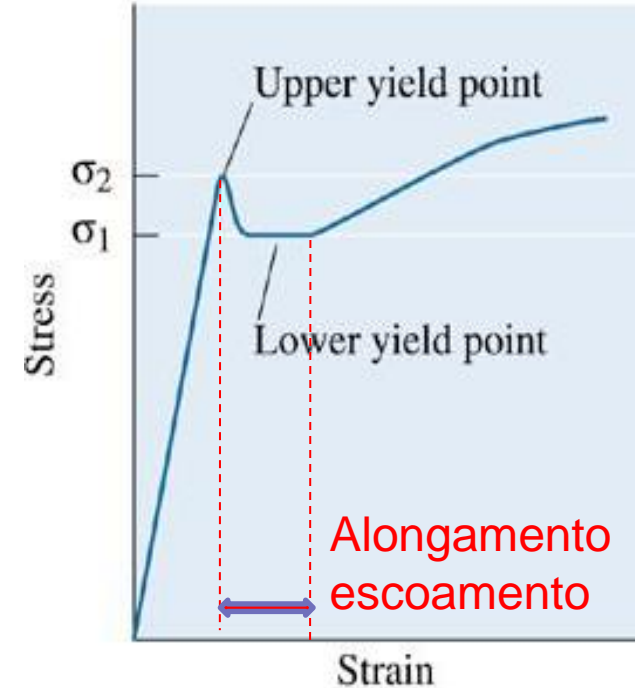
<sup>a</sup> Adapted with permission from R. W. Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Material*, New York: John Wiley, 1976, p. 8.

# 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*).

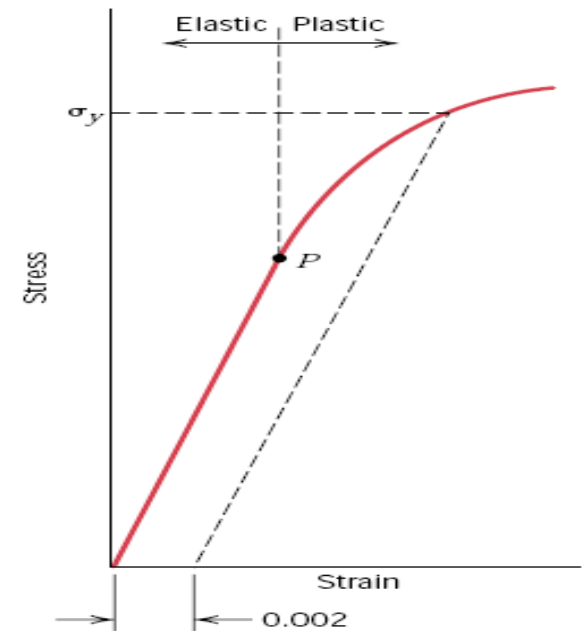
➤ A posição deste ponto pode não ser determinada com precisão. Por consequência foi adotada uma convenção: é construída uma linha paralela à região elástica a partir de uma pré-deformação de 0,002 ou 0,2%.

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



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

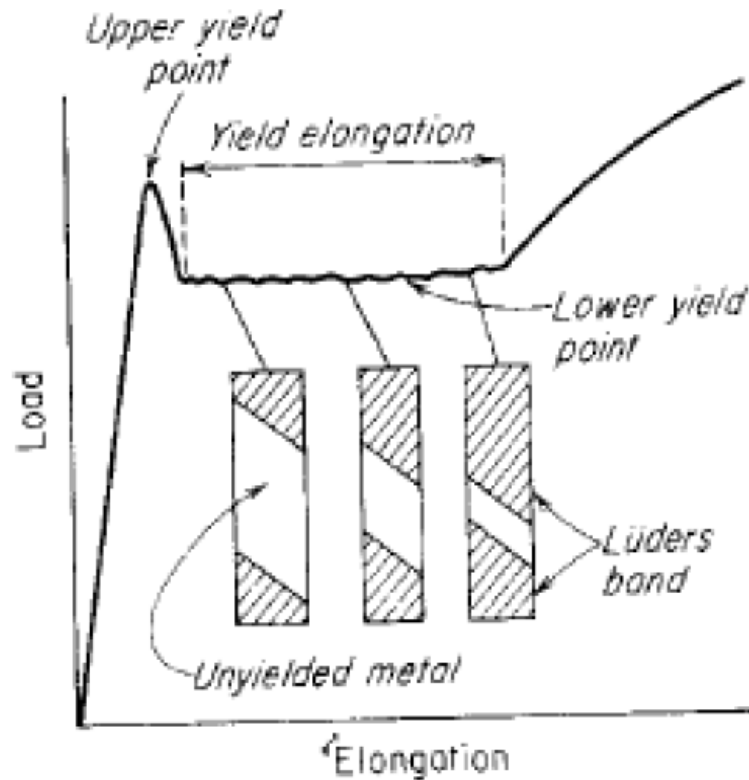
**Cobre e suas ligas:**  $n = 0,5 \%$  ( $\epsilon = 0,005$ )

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

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

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

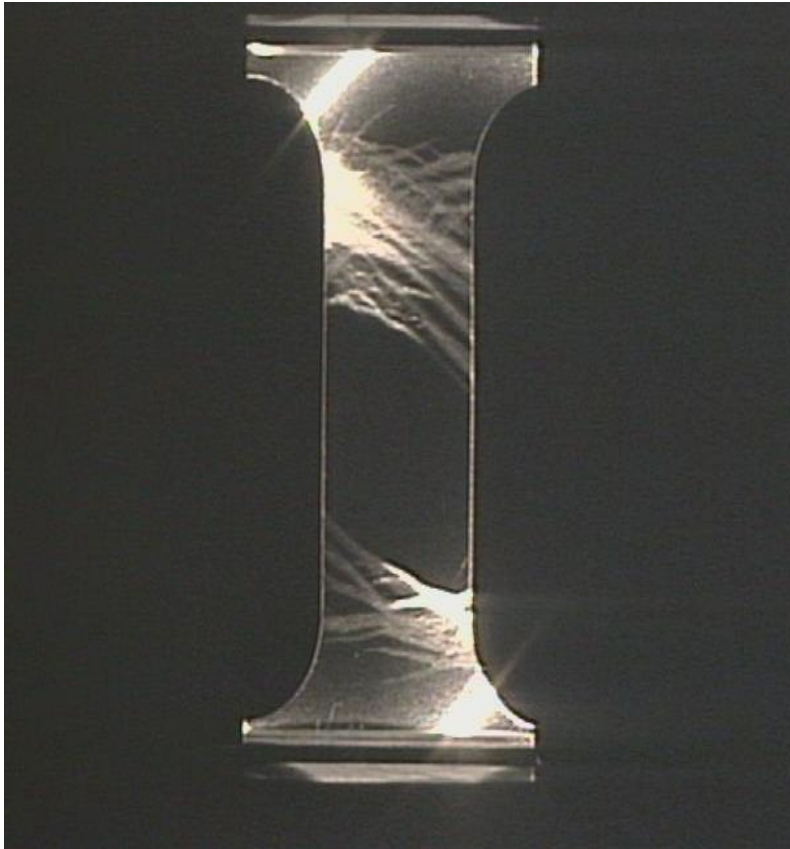
# LIMITE DE ESCOAMENTO DESCONTÍNUO



**Atmosferas de Cotrel (Cotrel e Bilby, 1949) e geração e movimentação de LD (Johnston e Gilman (1959) e Johnston (1962), )**

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

# BANDAS DE LÜDER



- 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** ( $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ ), em tração;

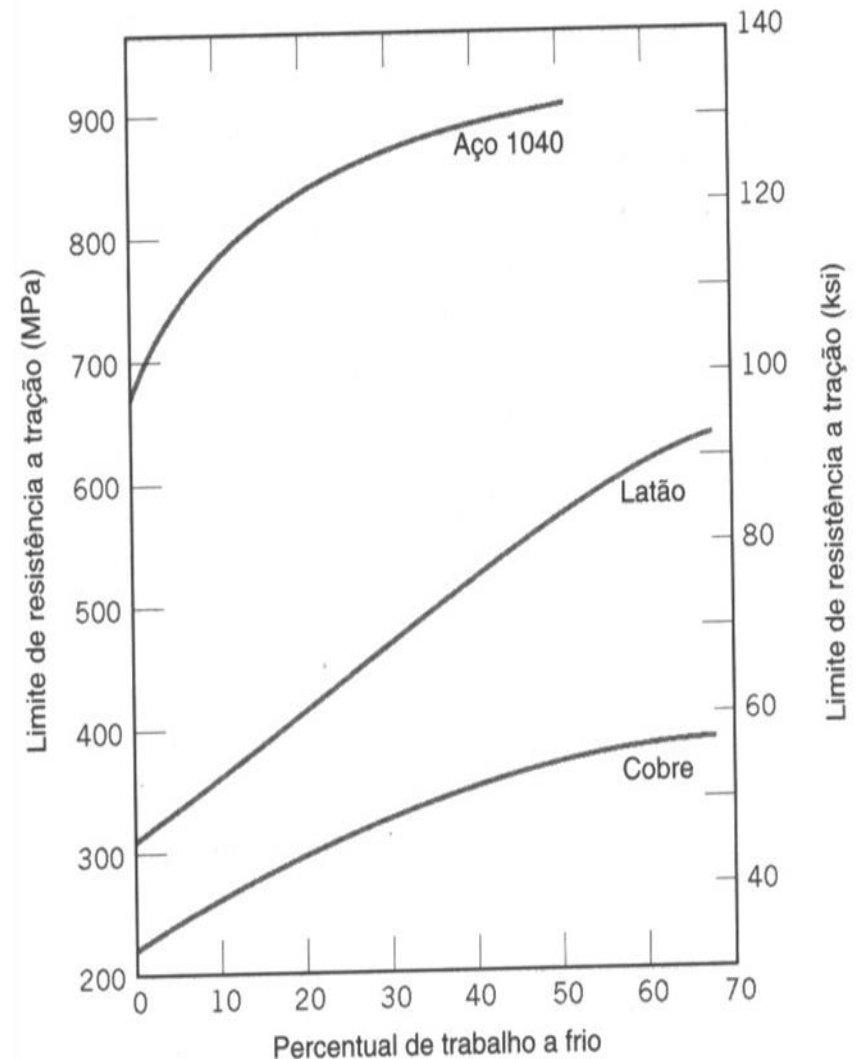
# Deformação Plástica

- 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.



# 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

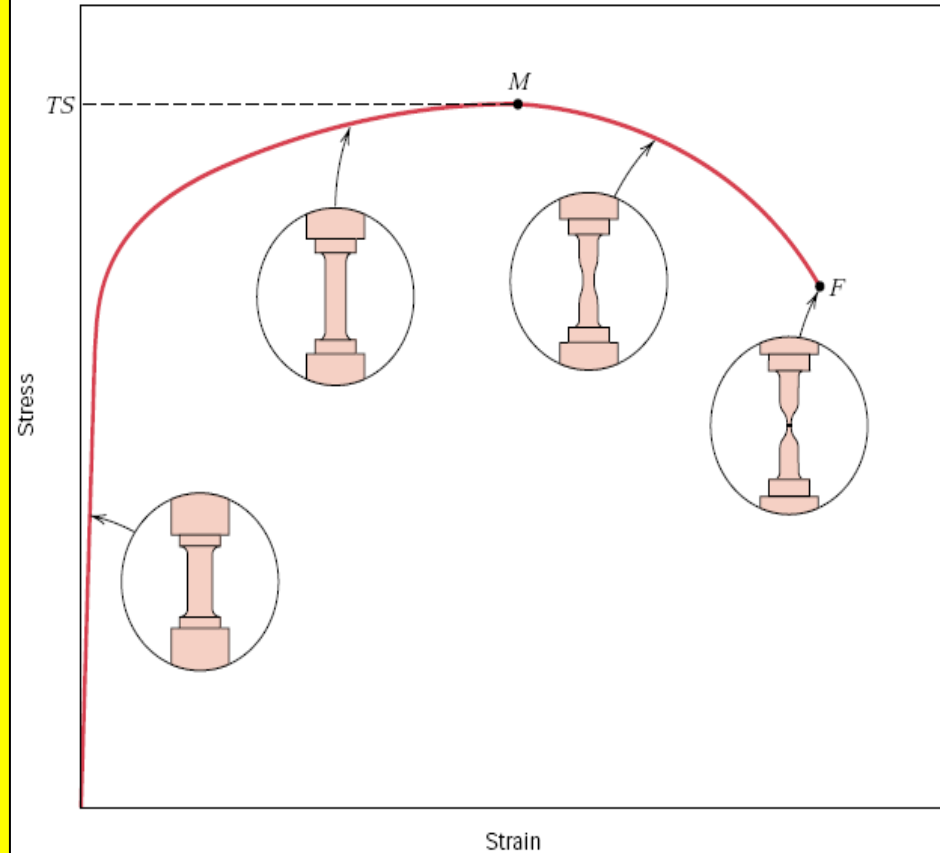


# Limite de resistência à tração



➤ 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  $\phi$  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**).

# 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**;

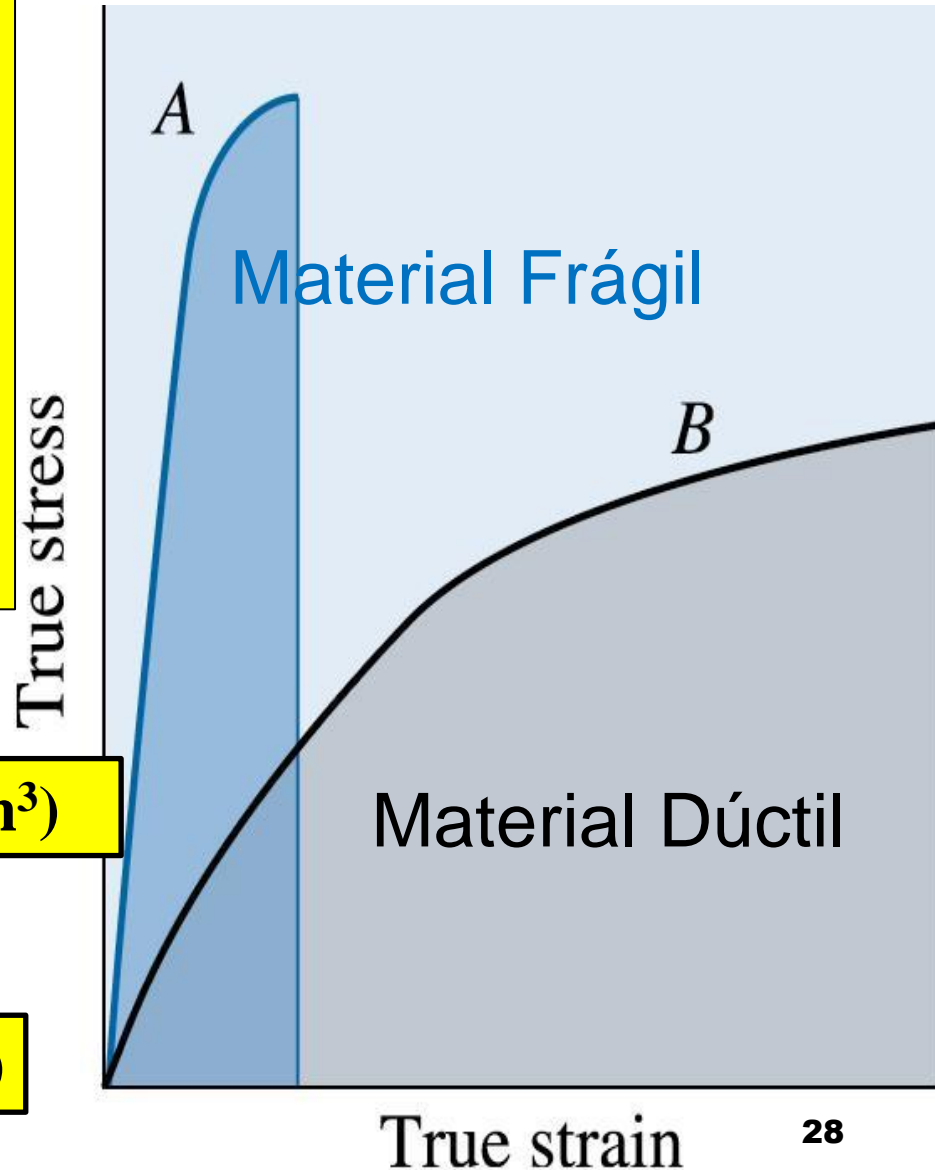
Pode ser determinada a partir da **curva  $\sigma \times \epsilon$** . Ela é a área sob a curva; Para que um material seja tenaz, deve apresentar certa resistência e ductilidade. **Materiais dúcteis são mais tenazes que os frágeis.**

**Materiais Dúcteis**

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

**Materiais Frágeis**

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



# Módulo de Resiliência



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

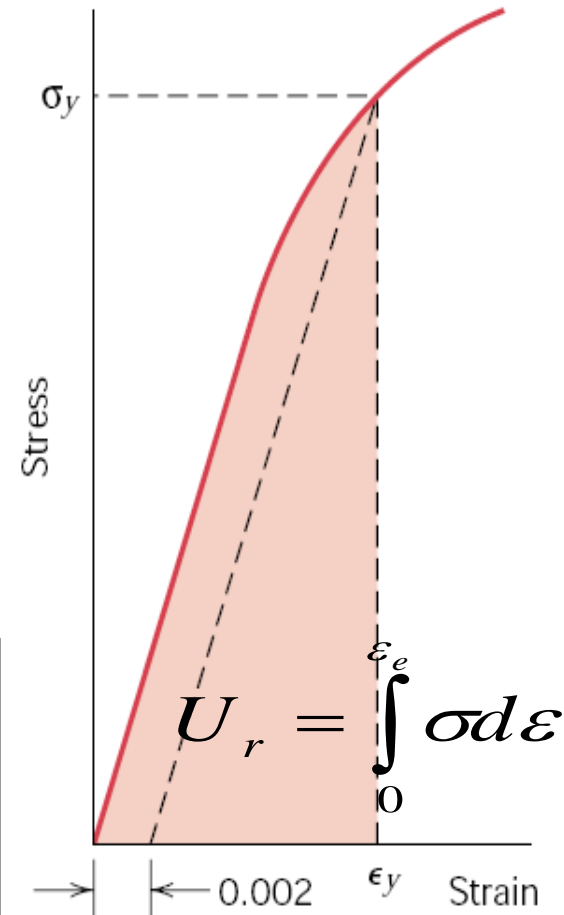
Para **aços carbono** varia de **35 a 120 MJ/m<sup>3</sup>**

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**.

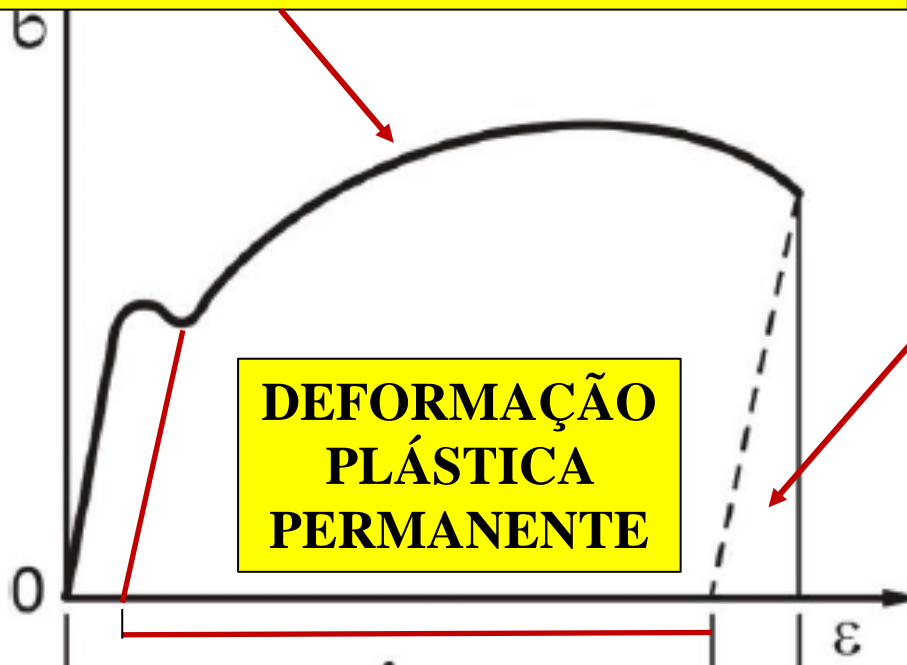


# DEFORMAÇÃO NA CURVA $\sigma \times \epsilon$

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

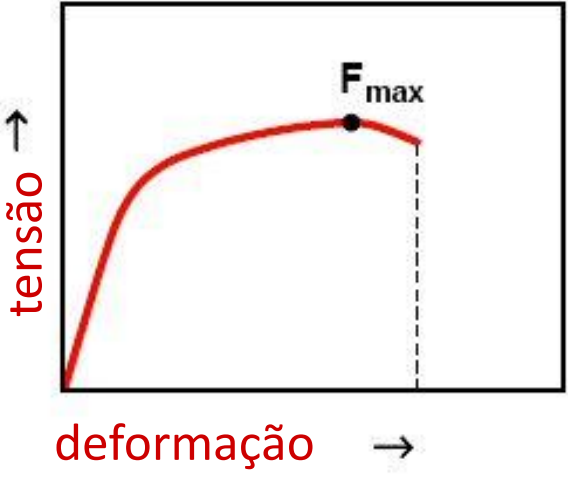
**ENCRUAMENTO: AUMENTO DA TENSÃO NECESSÁRIA À DEFORMAÇÃO PLÁSTICA ATÉ O LR**

**RECUPERAÇÃO ELÁSTICA**





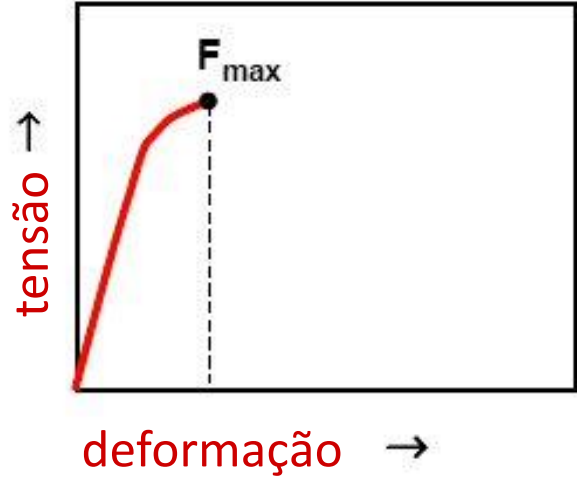
# Tipos de material e as curvas de $\sigma \times \epsilon$



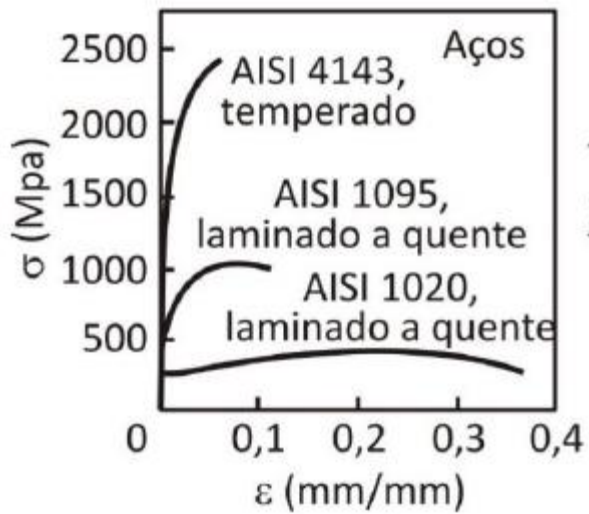
• Normal



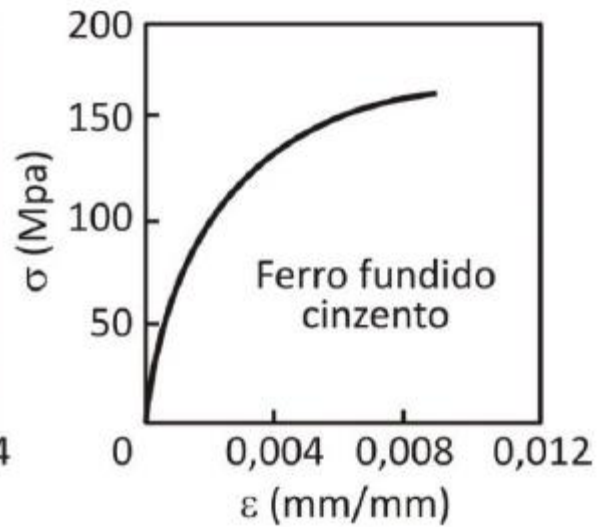
• Material dúctil (cobre)



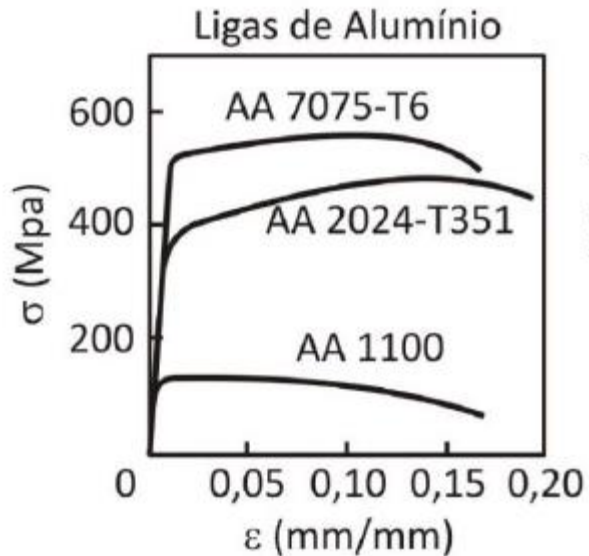
• Material frágil (ferro fundido e cerâmicas)



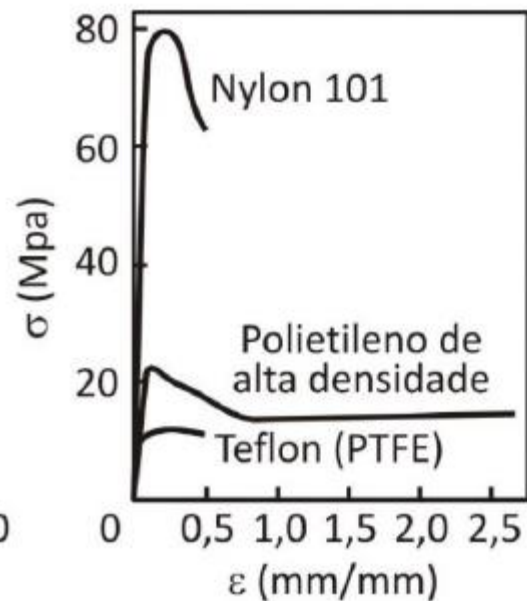
(a)



(b)



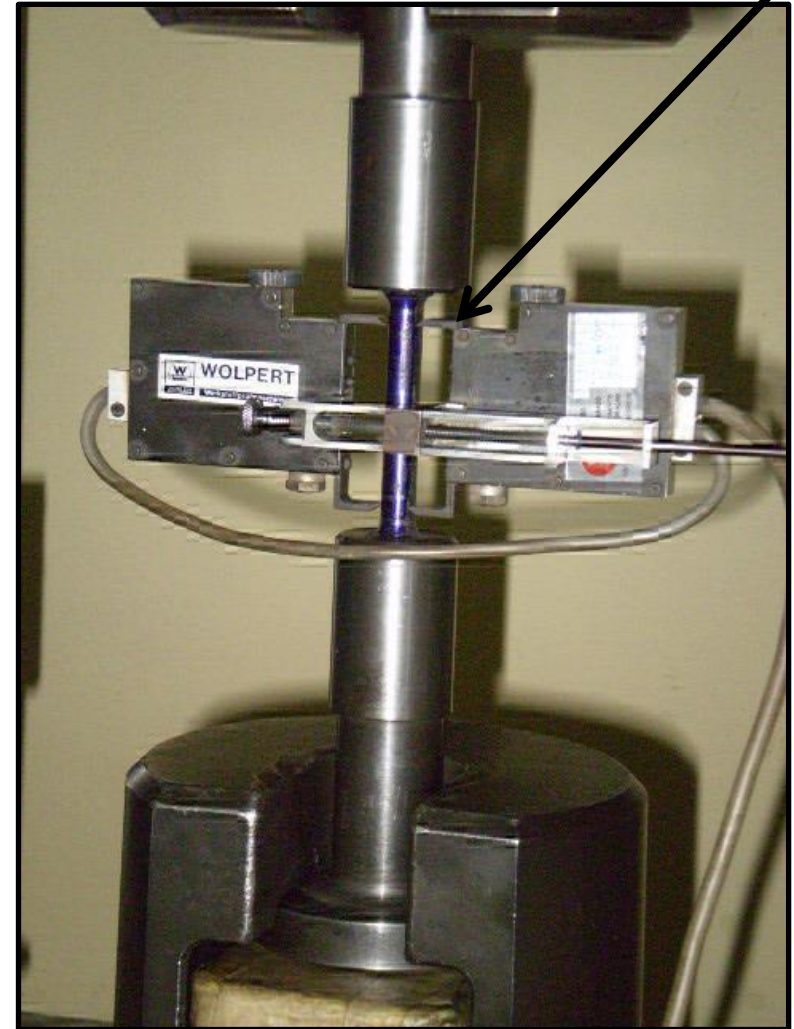
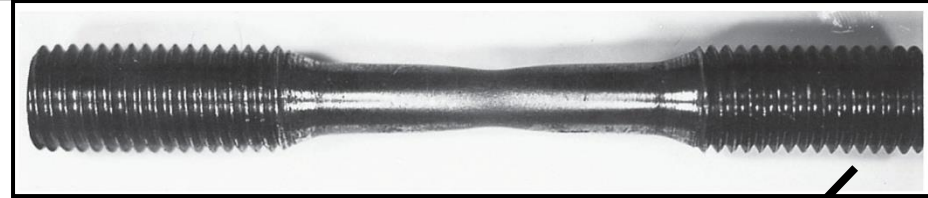
(c)



(d)

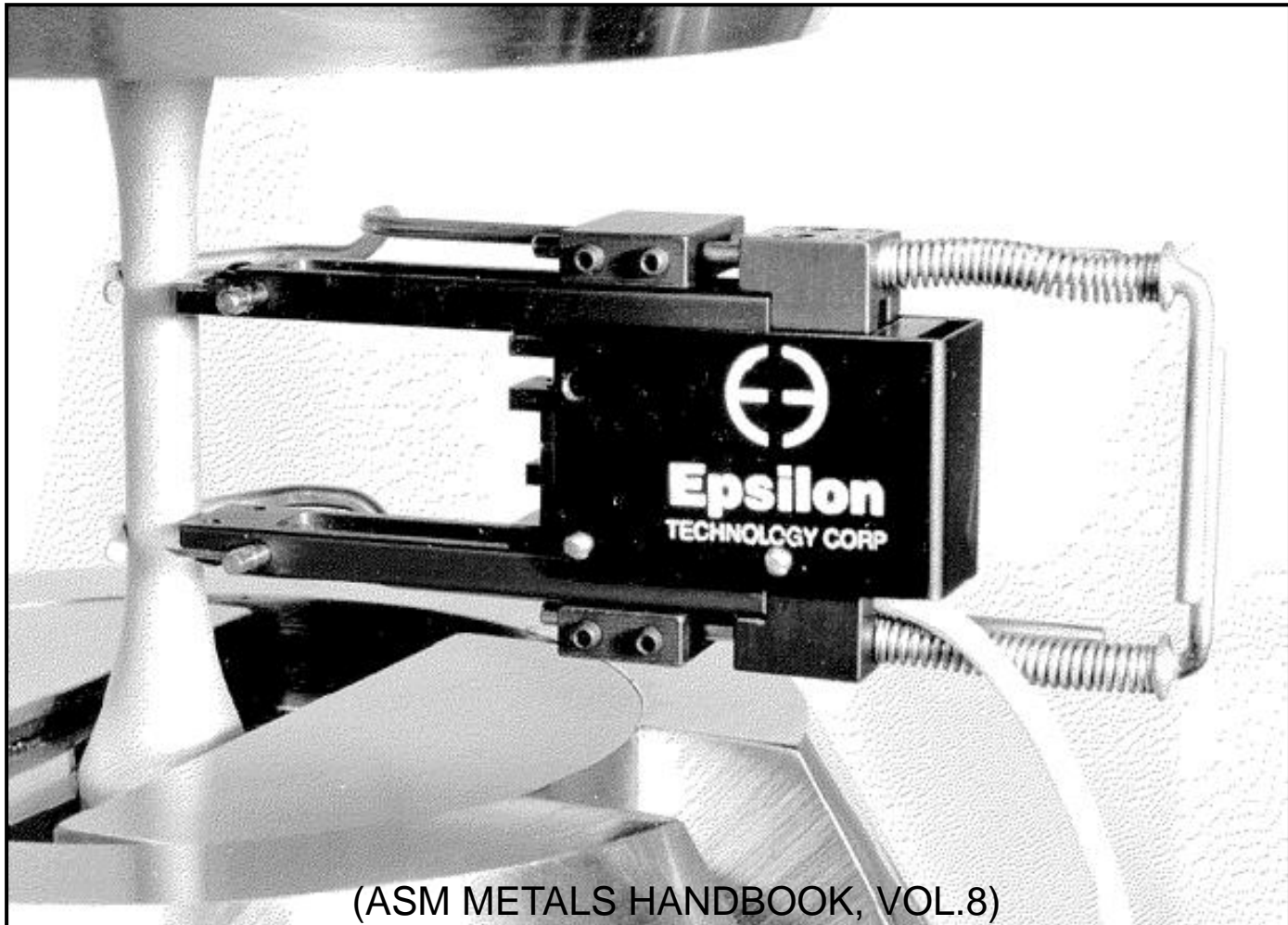


# ENSAIO DE TRAÇÃO



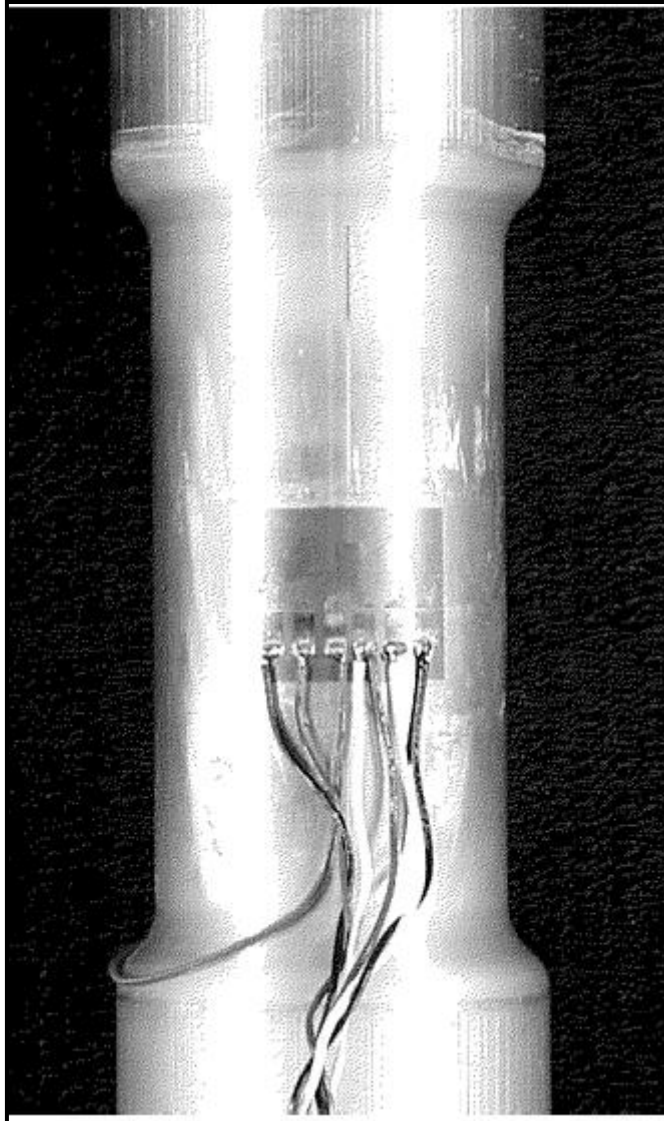
# ENSAIO DE TRAÇÃO

## EXTENSÔMETRO: DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE ESCOAMENTO



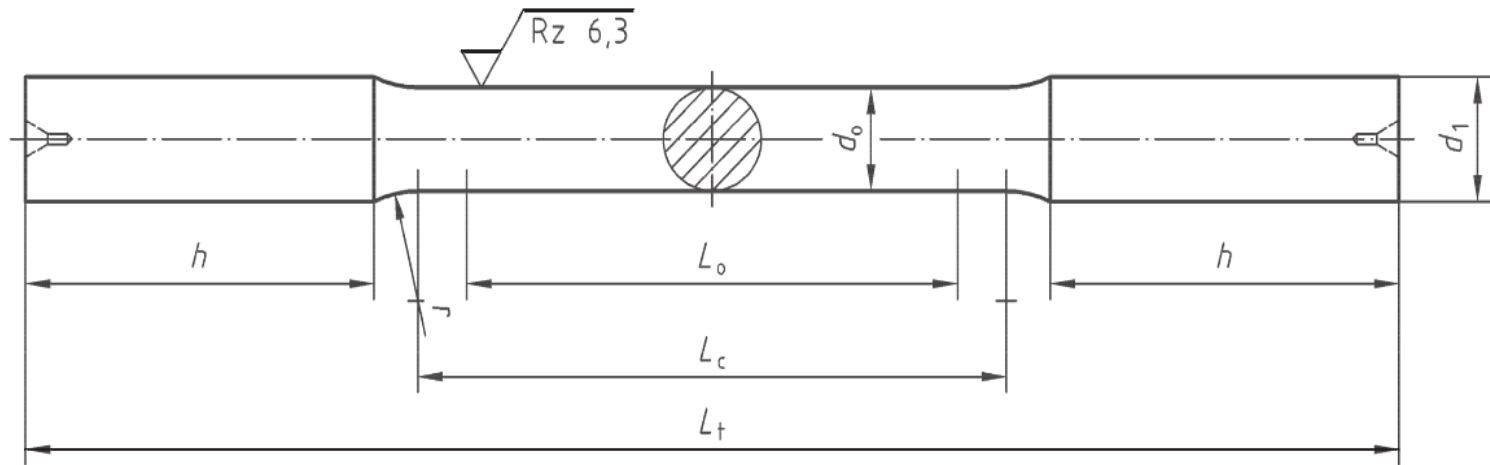
# ENSAIO DE TRAÇÃO

## Extensômetro (“strain Gage”)



(ASM METALS HANDBOOK, VOL.8)

## 4.2 Type A test pieces

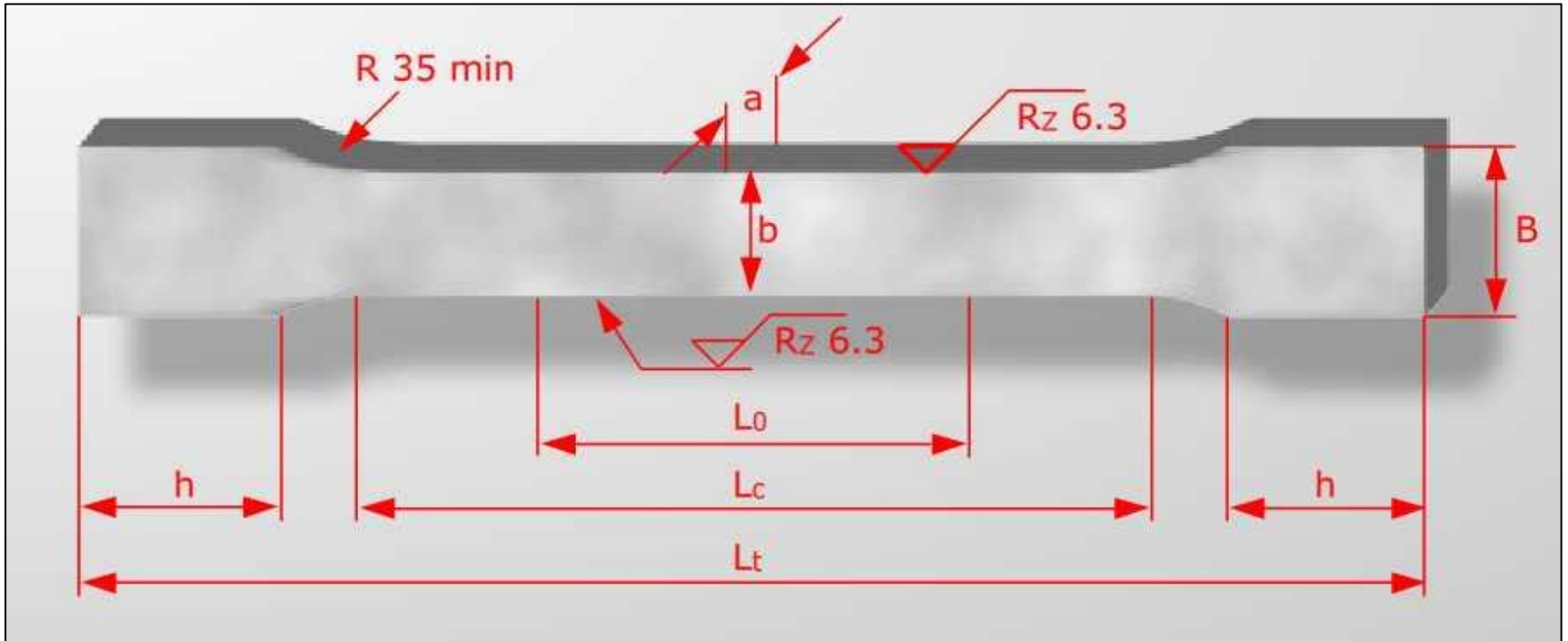
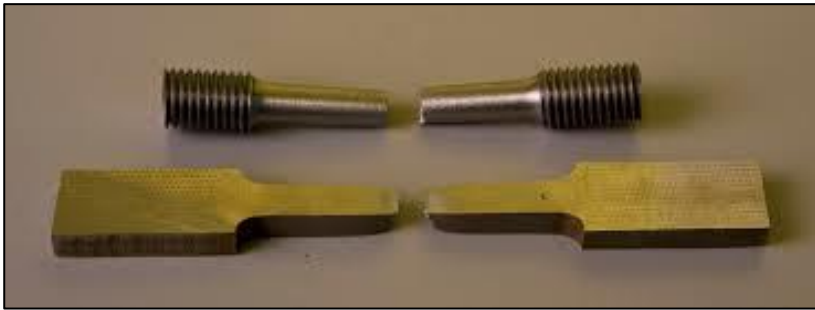



### Key

$d_0$	test piece diameter	$L_0$	original gauge length ( $L_0 = 5 d_0$ )
$d_1$	diameter of gripped ends ( $\geq 1,2 d_0$ )	$L_c$	parallel length ( $L_c \geq L_0 + d_0$ )
$h$	length of gripped ends	$L_t$	total length of test piece

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







- 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 :

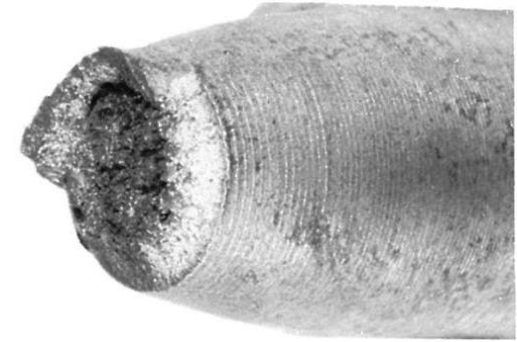
- **ASTM E8M**;

- **DIN50125**;

- **ASTM A 370**;

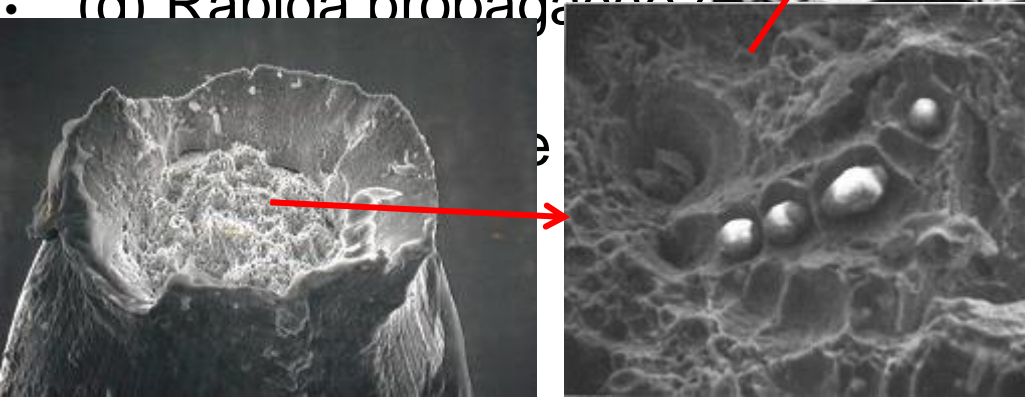
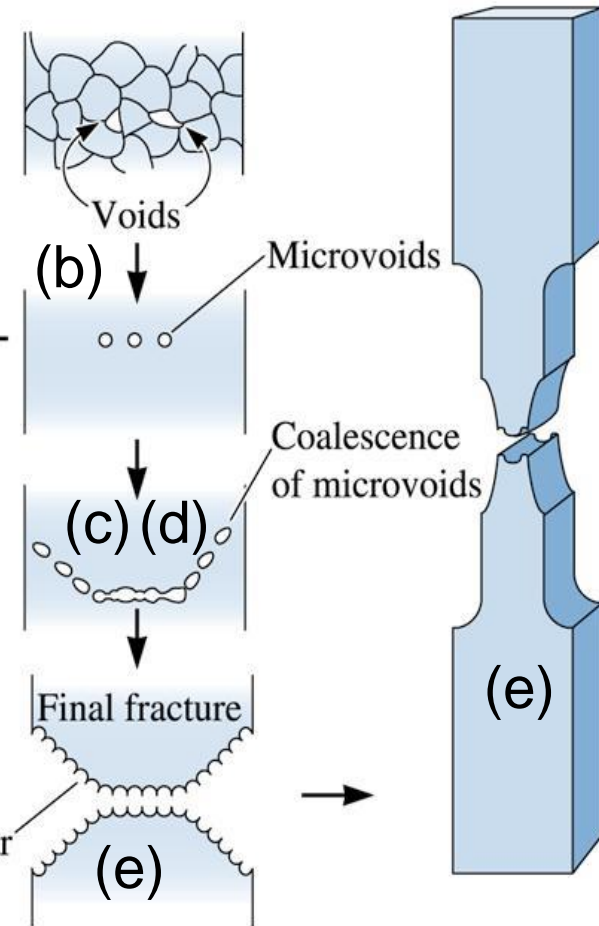
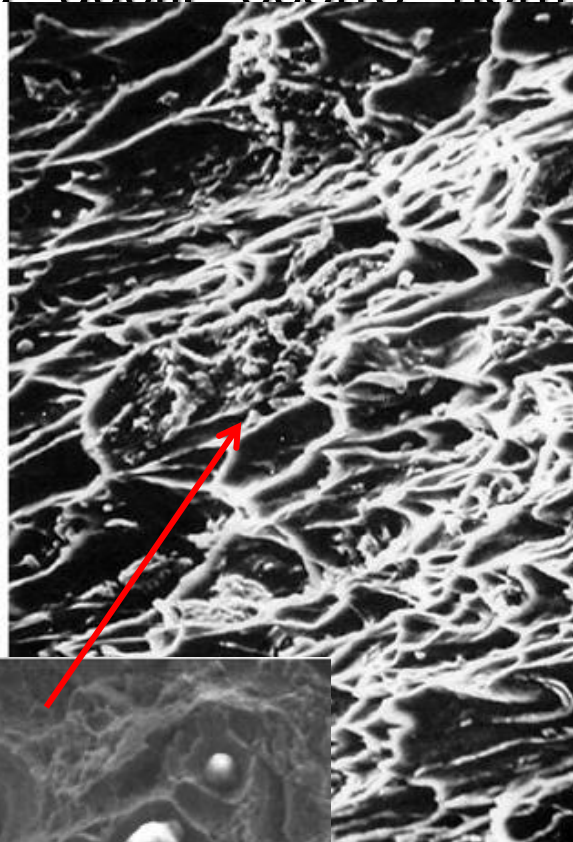
- **ABNT NBR ISO 6892-1:2013**.

# Fratura dúctil

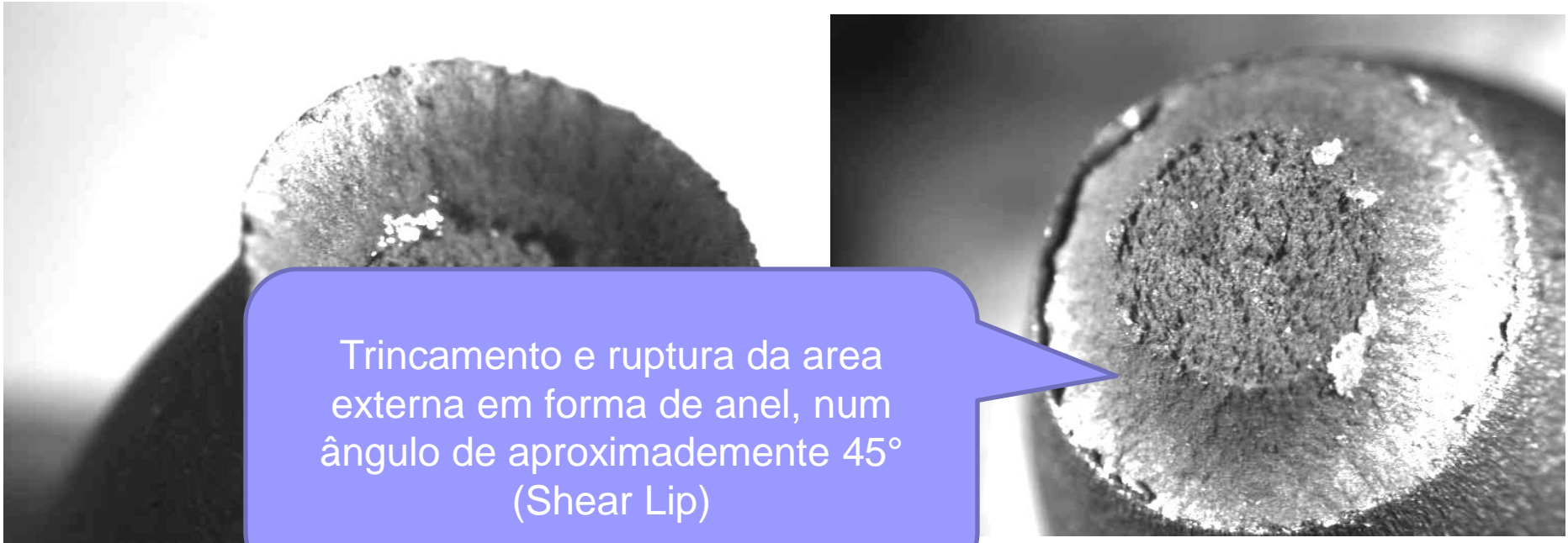


O processo de fratura dúctil ocorre normalmente em vários estágios

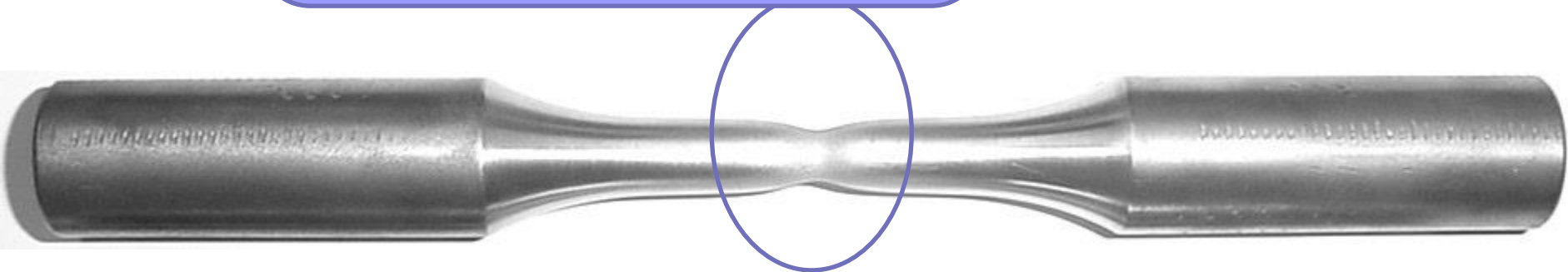
- (a) Empescoçamento inicial
- (b) Pequenas cavidades microvazios se formam
- (c) Microvazios aumentam e coalescem para formar elíptica
- (d) Rápida propagação



# Fratura dúctil (Tipo Taça Cone)



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

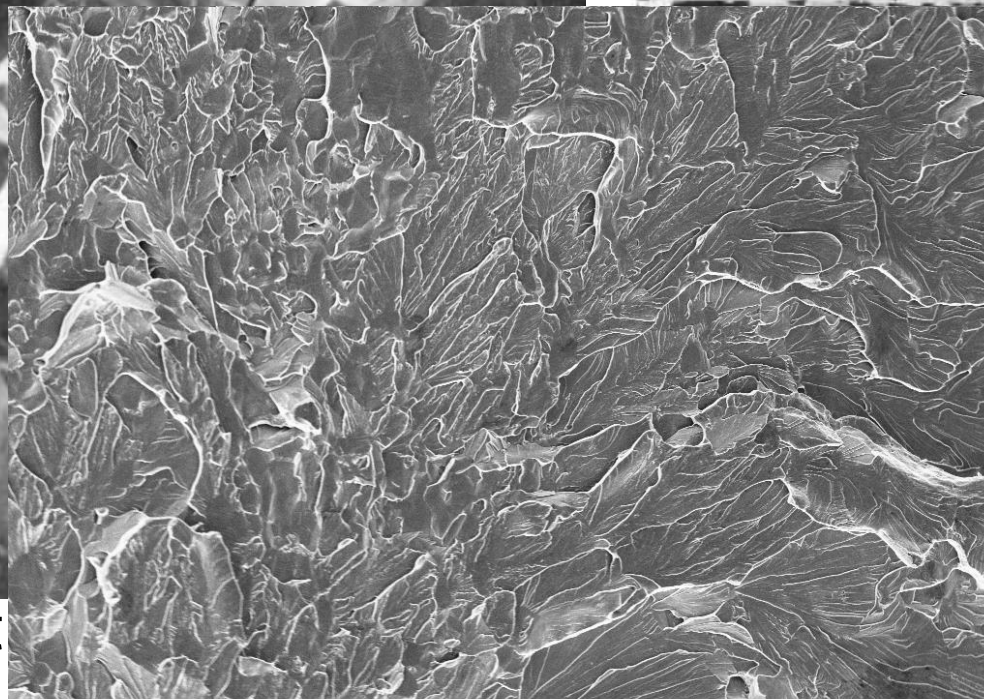
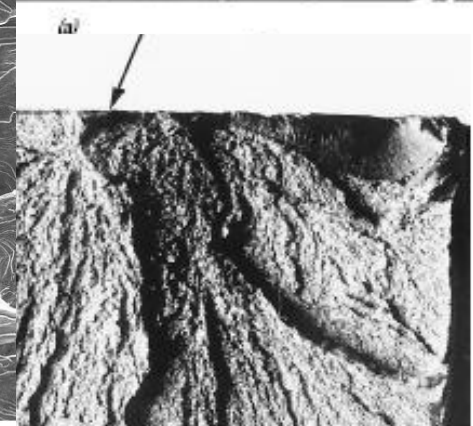
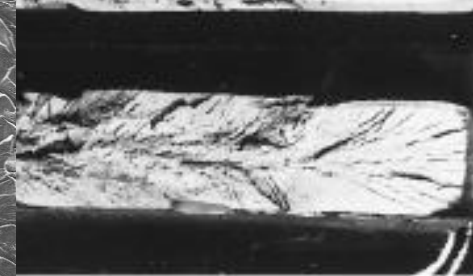
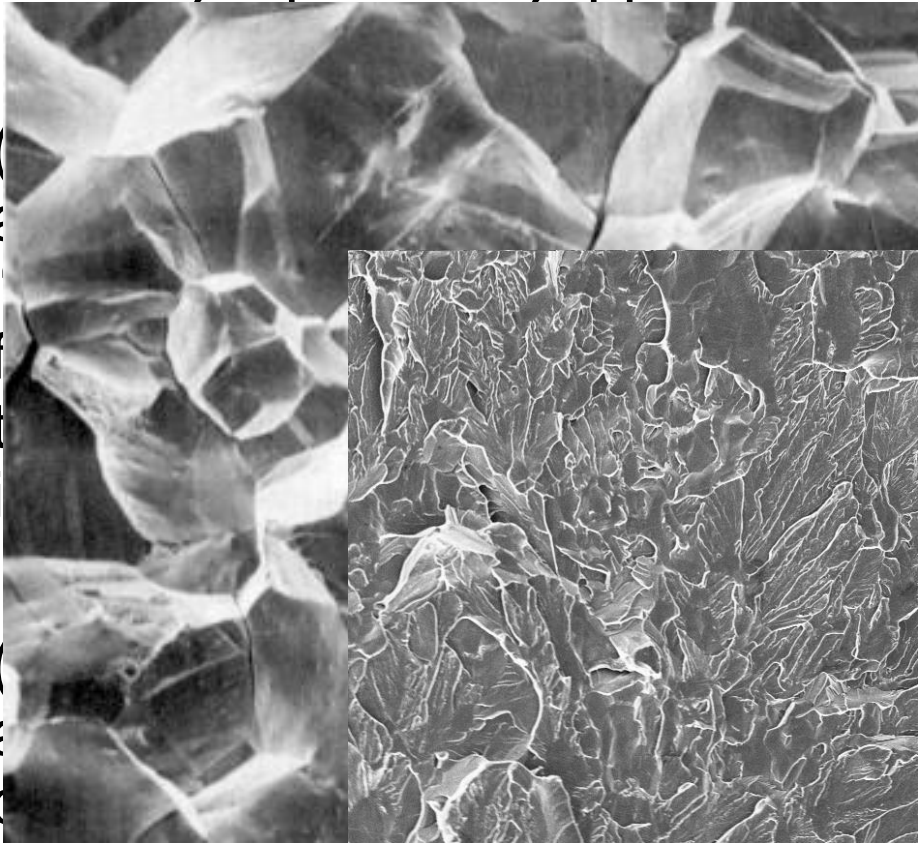




# Fratura frágil



Fratura frágil ocorre sem qualquer deformação apreciável e formação de trincas

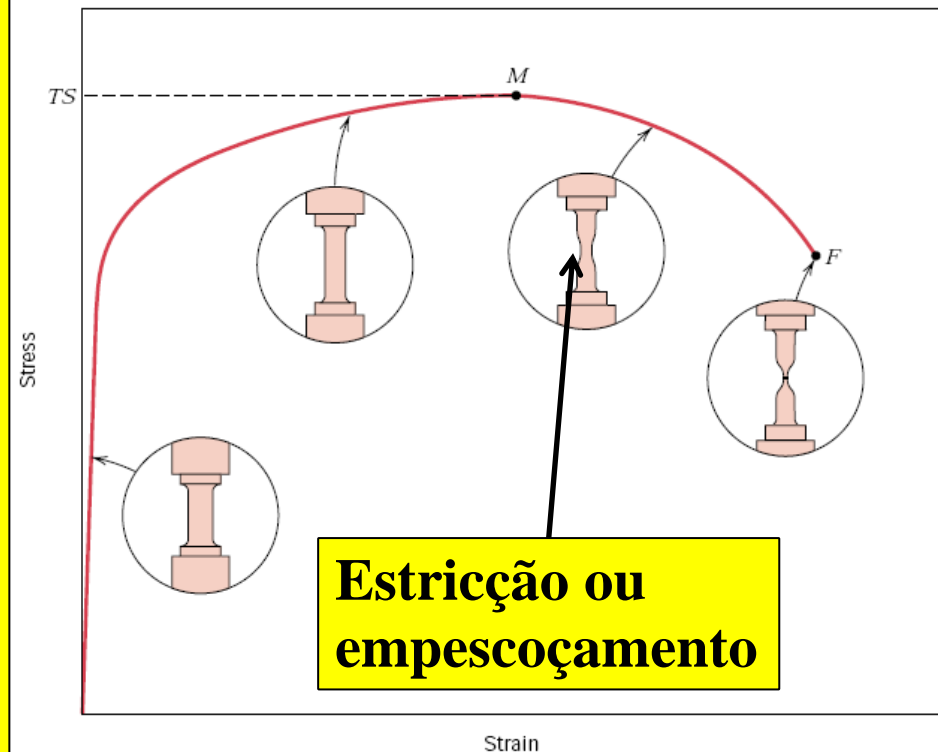


IQSC EHT=20.00 kV WD= 22 mm Mag= 500 X Detector= SE1  
10µm H Photo No.=7 25-Apr-2006

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 inicial** e não leva em conta o **pescoço**.



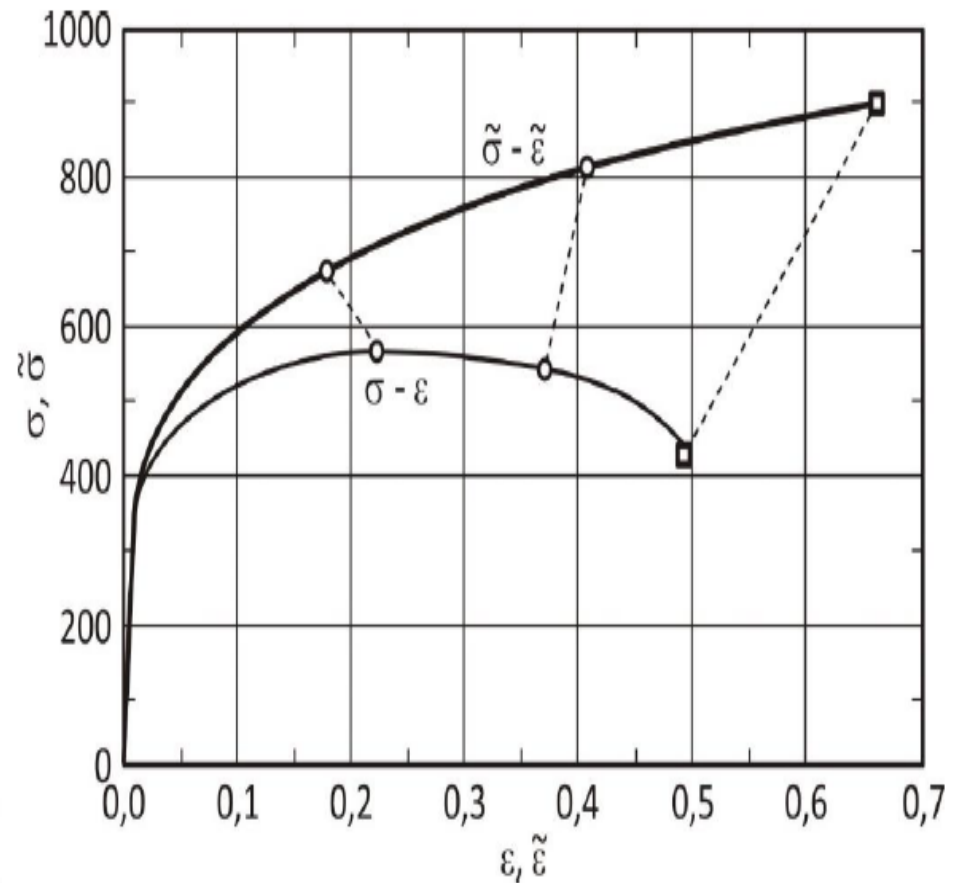
# Tensão Verdadeira e Deformação Verdadeira

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

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

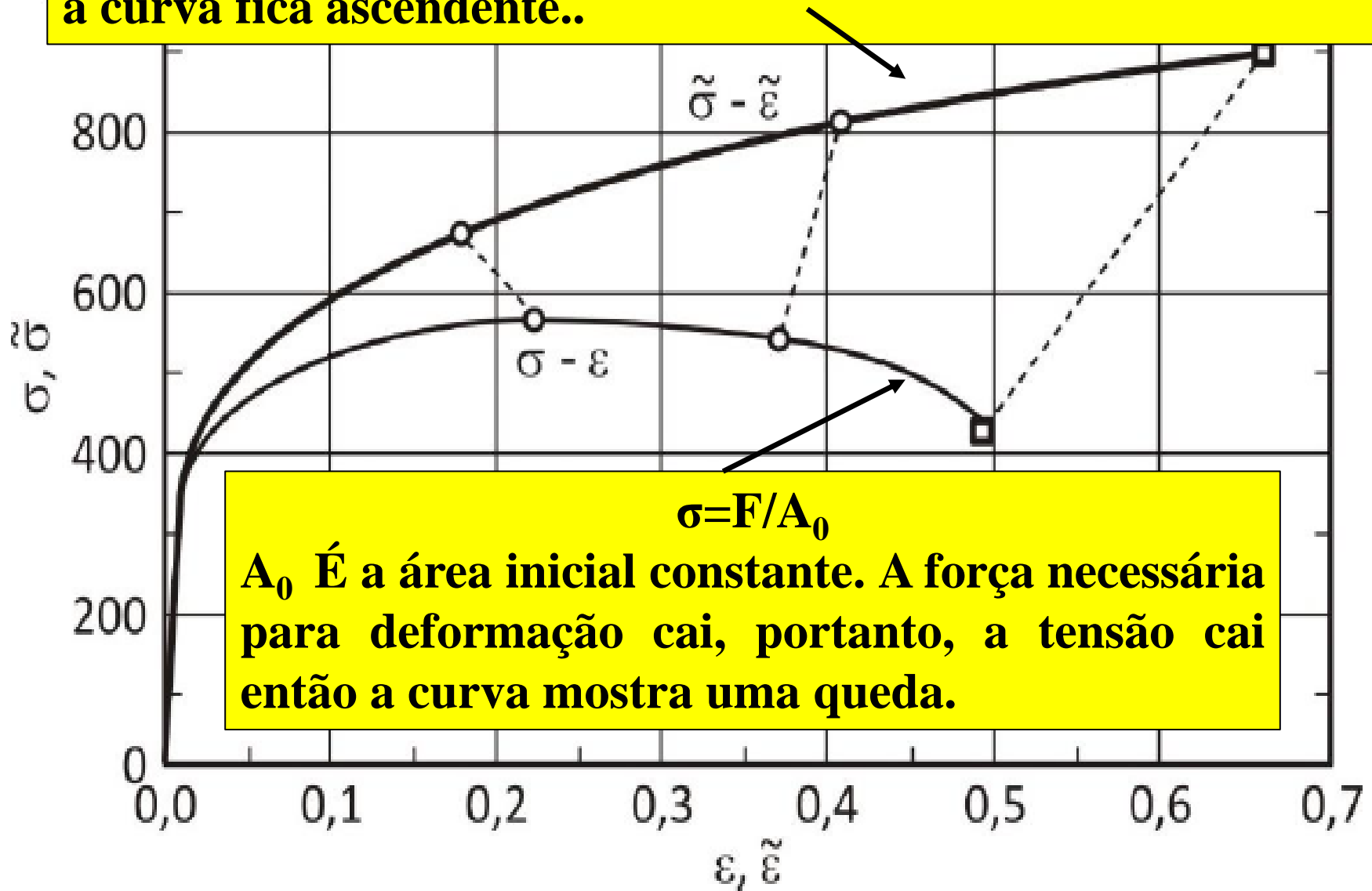
A Deformação Verdadeira é definida pela expressão

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



$$\sigma = F/A_i$$

**$A_i$  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

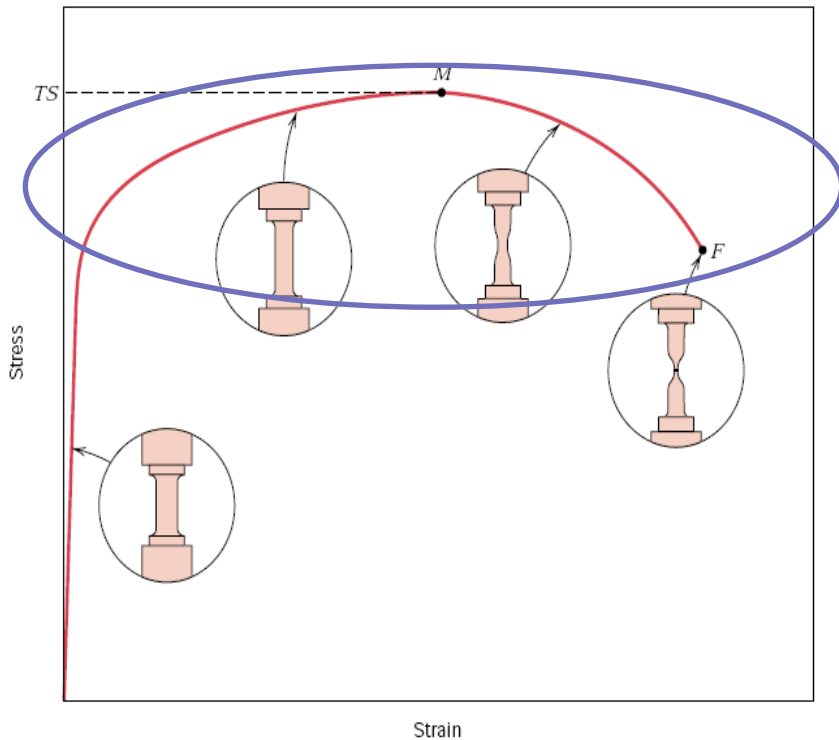
$$\ln \frac{S_0}{S} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon_C)$$

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

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

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

# TENSÃO PARA A REGIÃO DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA



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

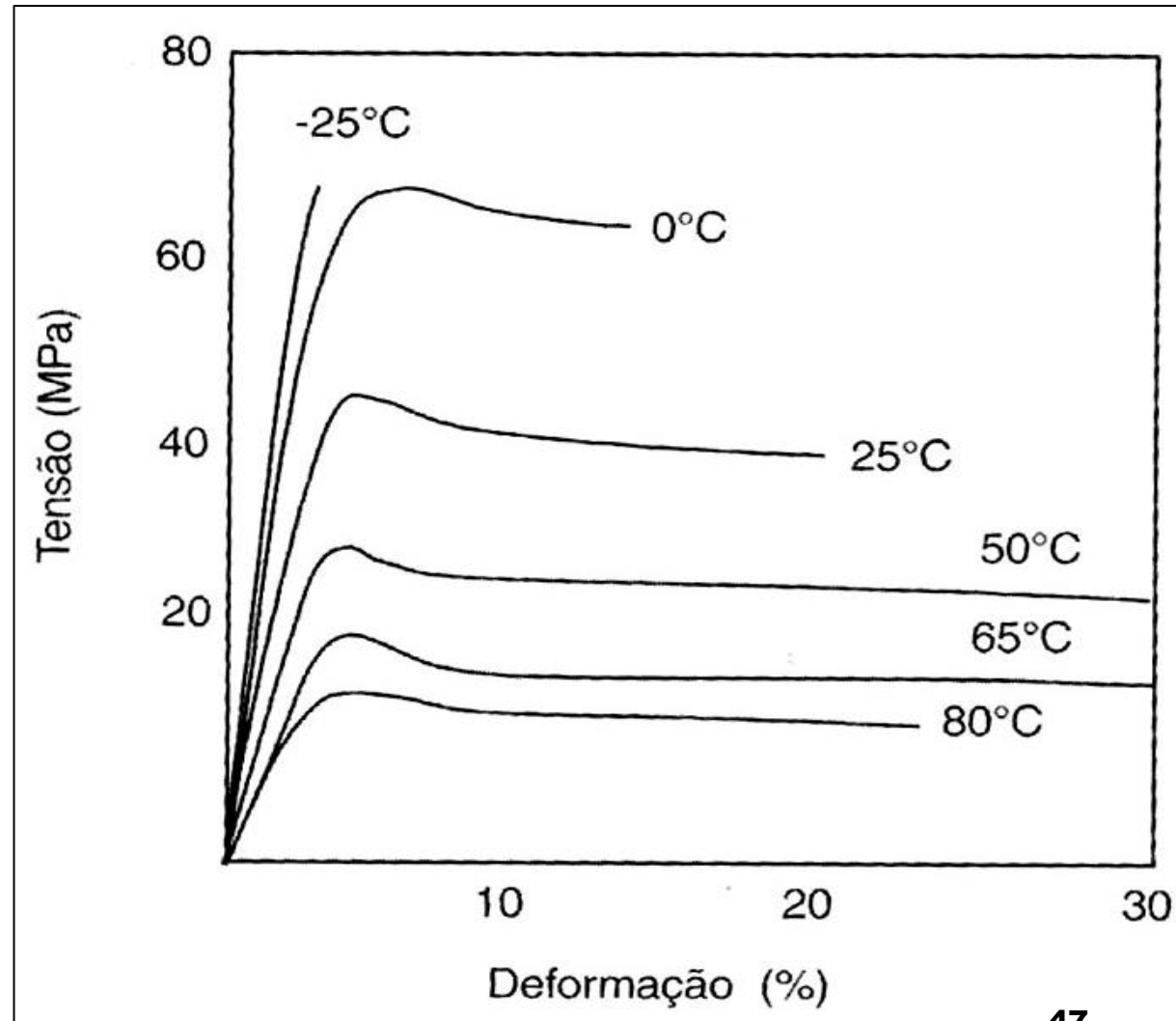
**K** e **n** são constantes que dependem do material e da condição: tratados termicamente ou encruados

**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)

# Efeito da temperatura



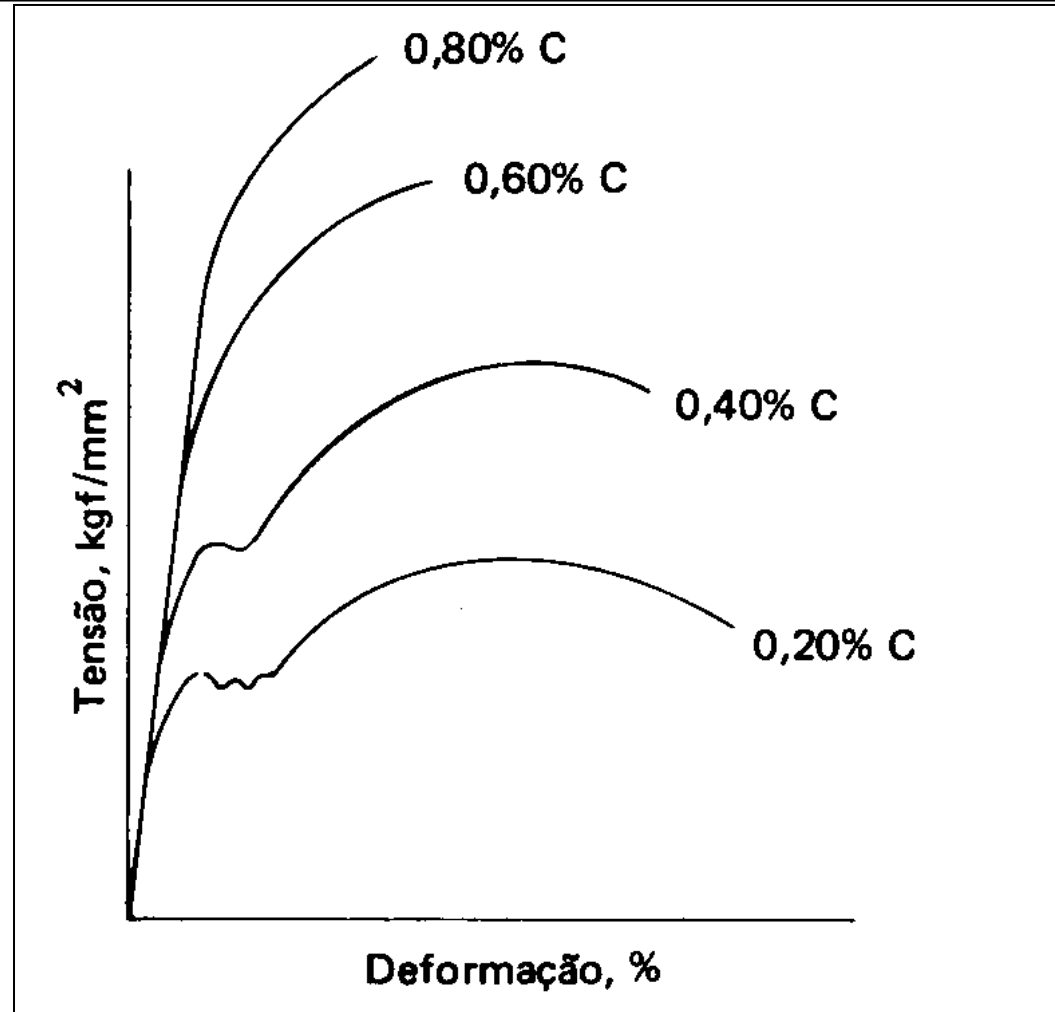
Em geral, a **resistência diminui** e a **ductilidade aumenta** com o aumento de temperatura.





# 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.





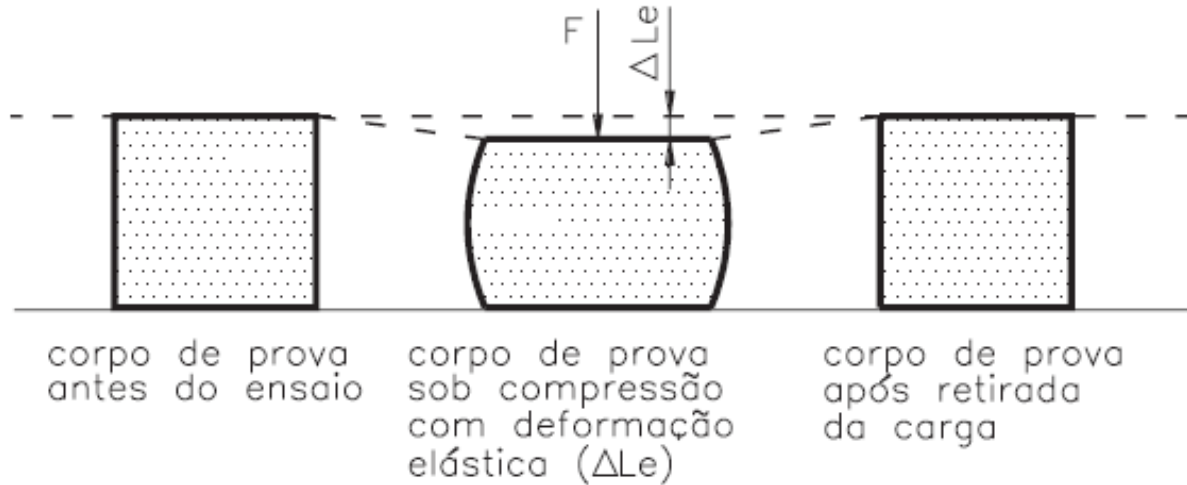
# COMPRESSÃO

# TRAÇÃO X COMPRESSÃO

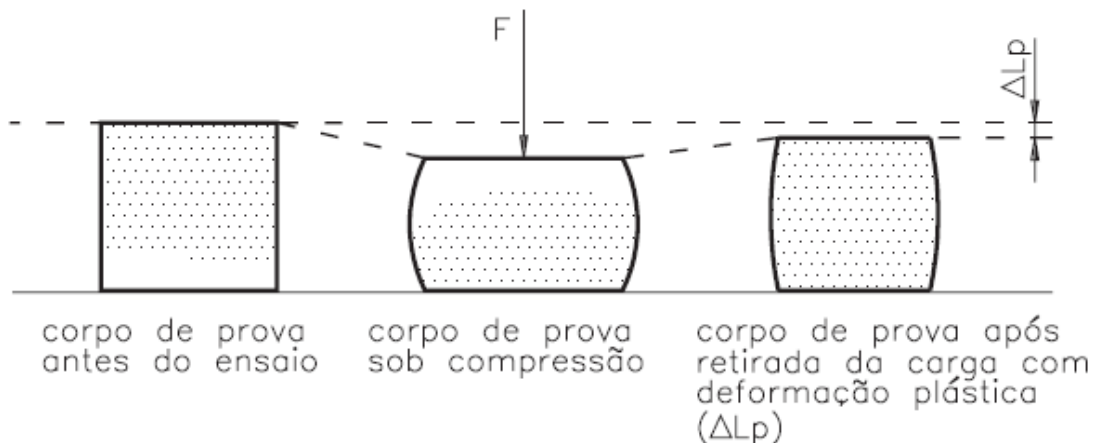
- Alguns materiais apresentam comportamento em **tração bem diferente** do comportamento em **compressão** (materiais **cerâmicos, FoFo, aços ferramenta, aço rápido**);
- Existem alguns **processos de conformação** onde a peça a ser trabalhada está sujeita a **forças compressivas**.
- O ensaio de **compressão 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;

➤ **ASTM E9-09** *Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature* (**para metais**), a **ASTM D695-15** *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics* (**plásticos**) e a **ABNT NBR 5739:2018** *Concreto-Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*

Na fase de **deformação elástica**, o corpo **volta ao tamanho** original quando se retira a carga de compressão.



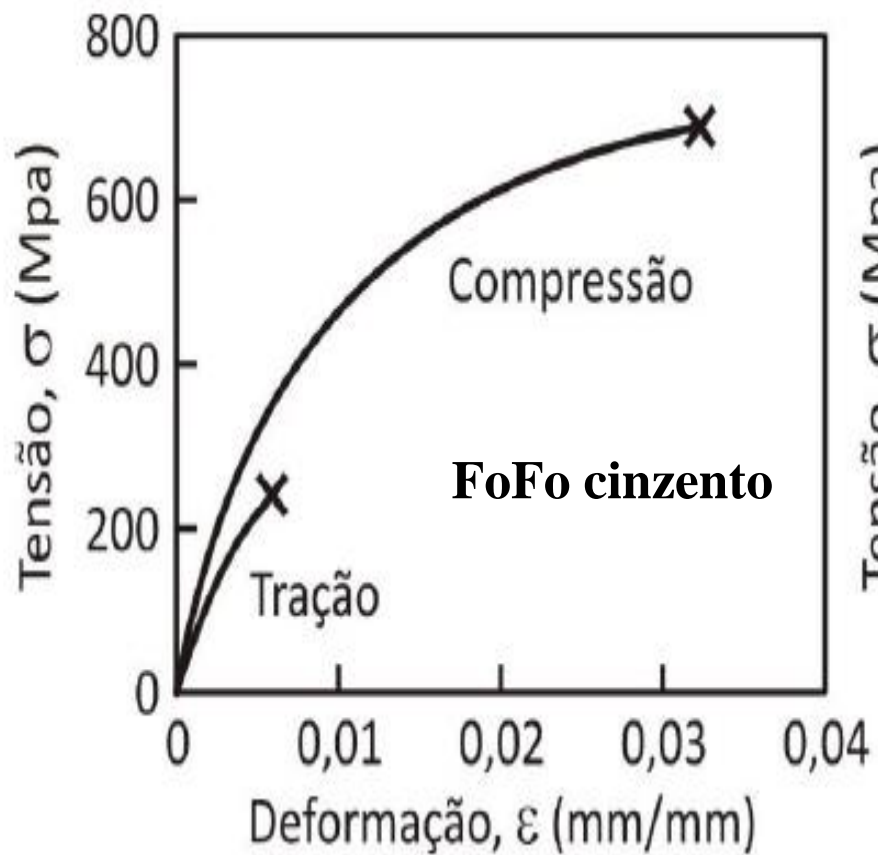
Na fase de **deformação plástica**, o corpo **retém uma deformação residual** depois de ser descarregado.



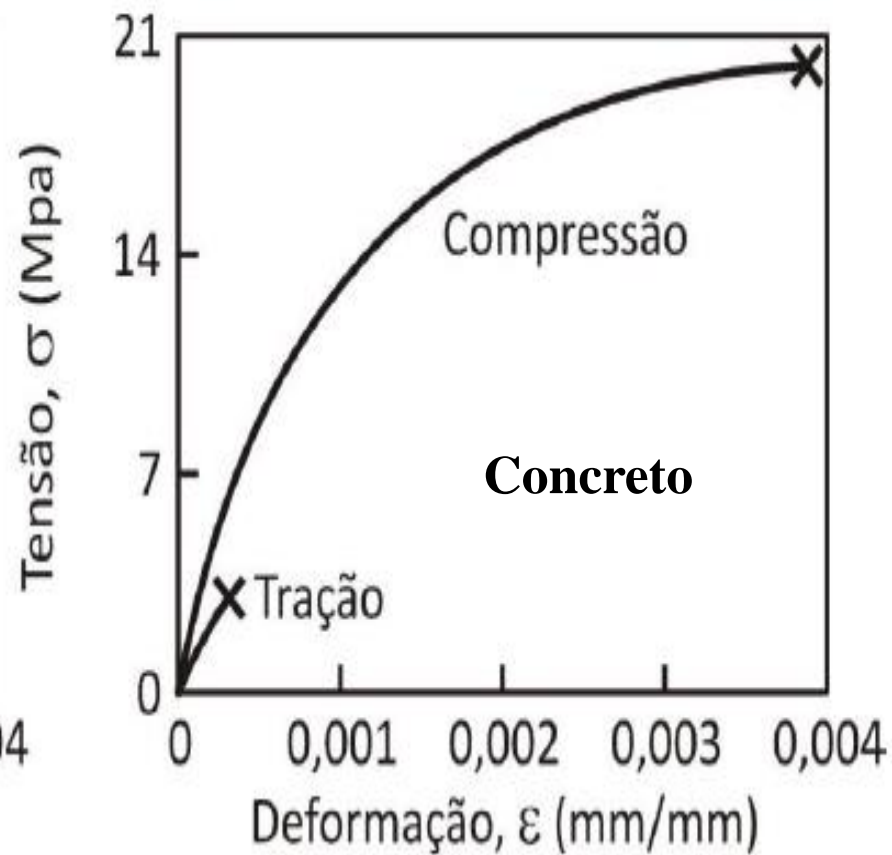
## Parâmetros do ensaio de compressão

- **Limite de escoamento ( $\sigma_e$ )** : quando **não** apresentar o patamar **nítido**, é regido pelas normas (ex.: **0,2% deformação**);
- **Limite de resistência à compressão ( $\sigma_r$ )** : **máxima** tensão antes da ruptura;
- **Dilatação Transversal( $\phi$ )**: é o fenômeno **inverso da** **estricção** ou redução de área. Pode ser entendido como o **equivalente da estricção da tração** -

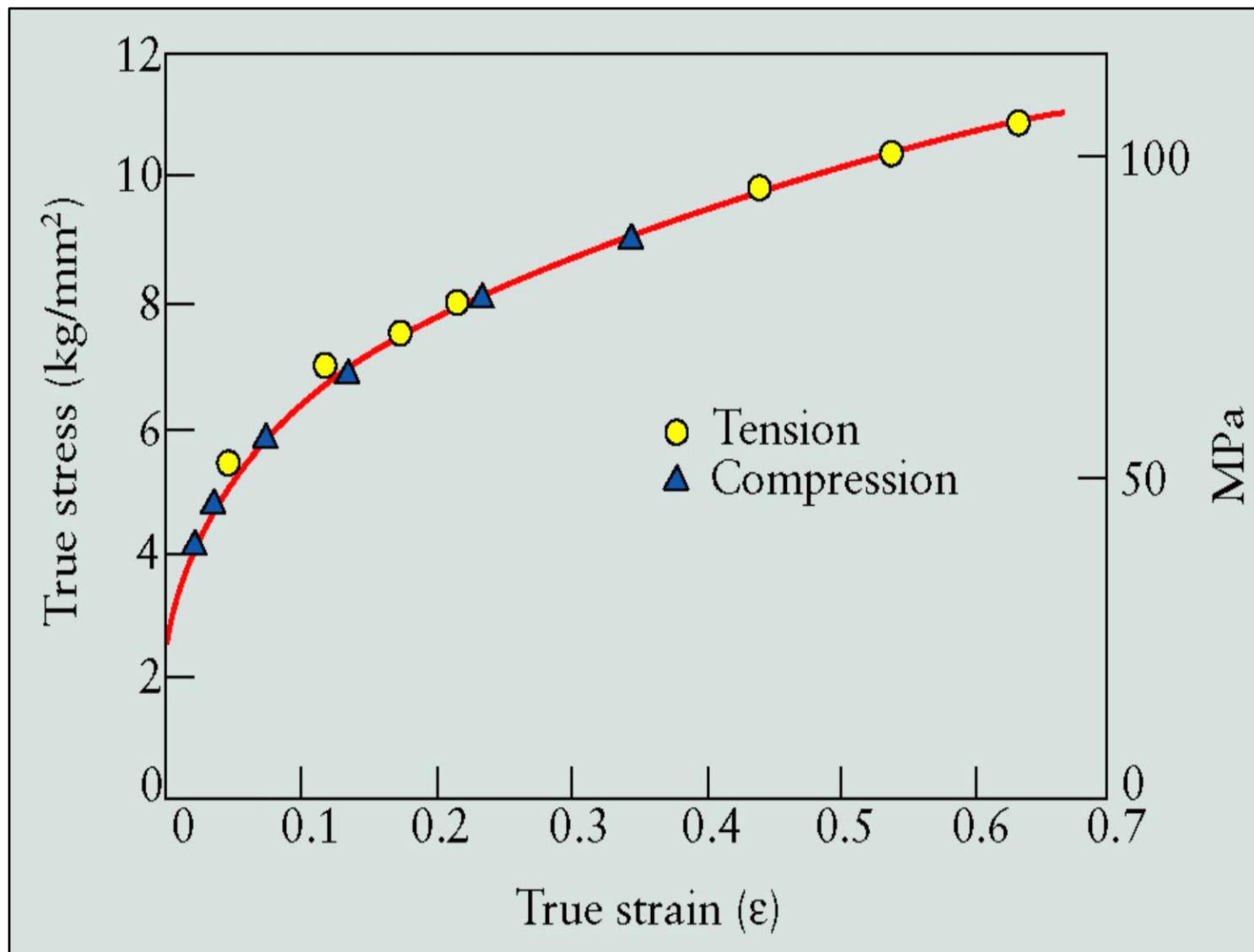
$$\phi = \frac{A_f - A_0}{A_0}$$



(a)

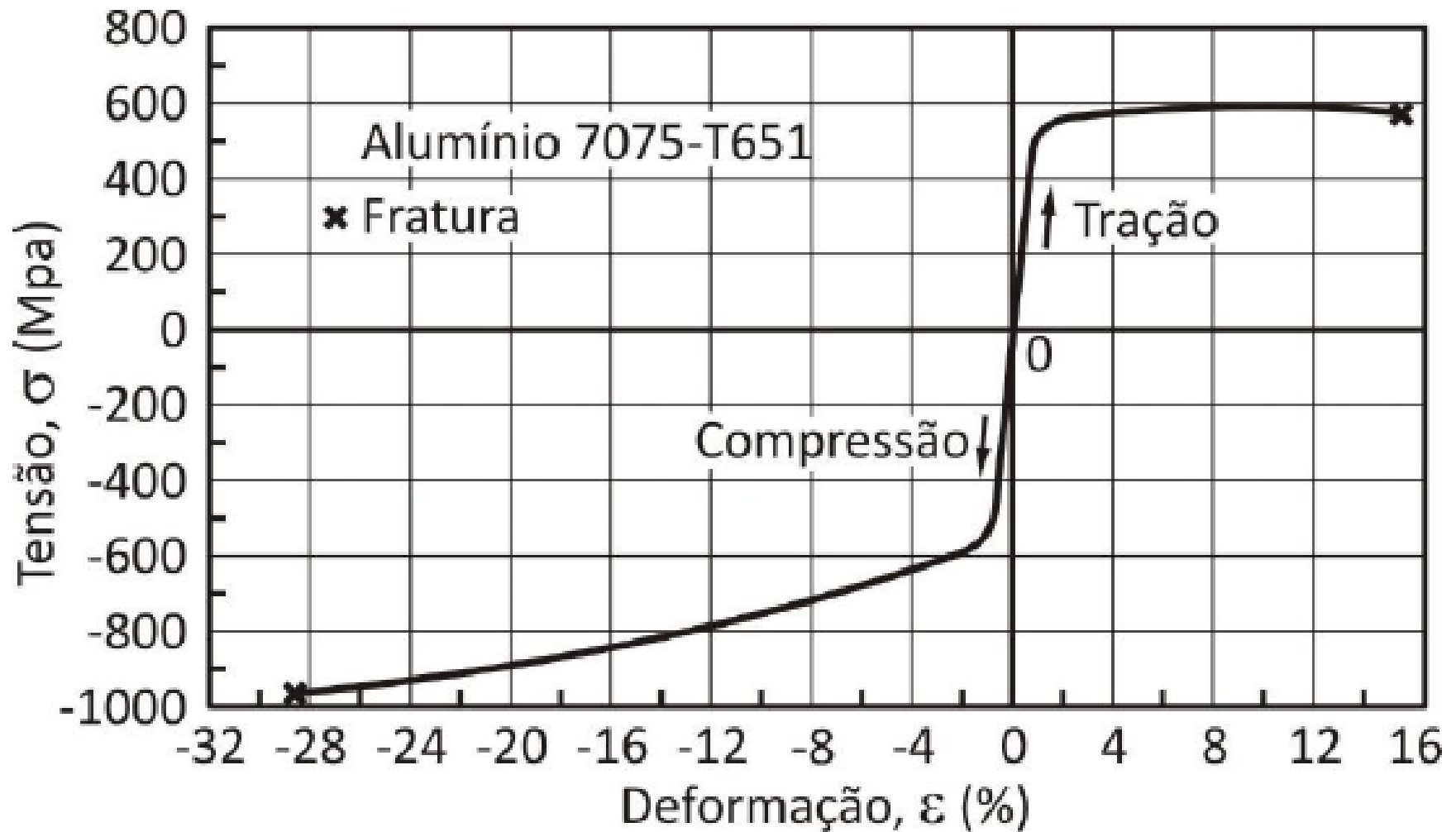


(b)



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

# Liga de Al- Endurecida por precipitação (envelhecida)



# Corpos-de-prova de ensaios de compressão

**FoFo Cinzento**

**Al 7075-T651**

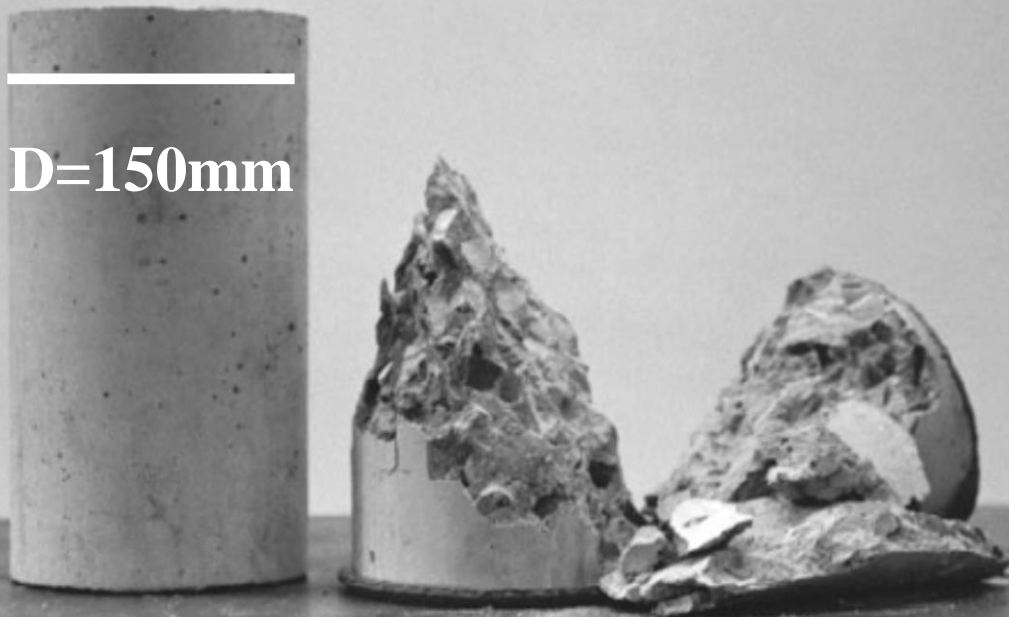
**SAE 1020  
laminado a  
quente**

**Antes**





D=150mm



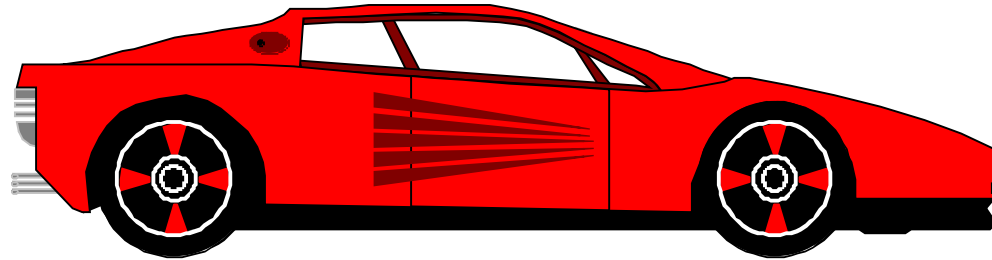
**Concreto**

**FADIGA**

# FADIGA

- **Definição:** Fadiga mecânica é a degradação das propriedades mecânicas levando à falha do material ou de um componente sob carregamento cíclico;
- **95%** das falhas envolve fadiga;
- **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).

# VARIAÇÃO CÍCLICA DE CARGA



Carga

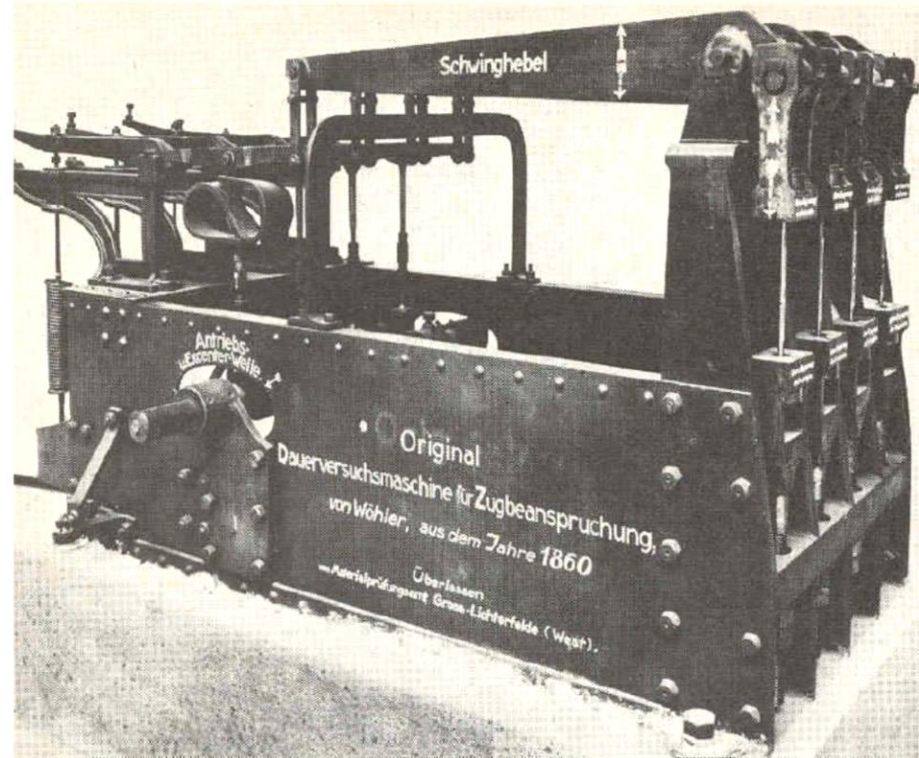
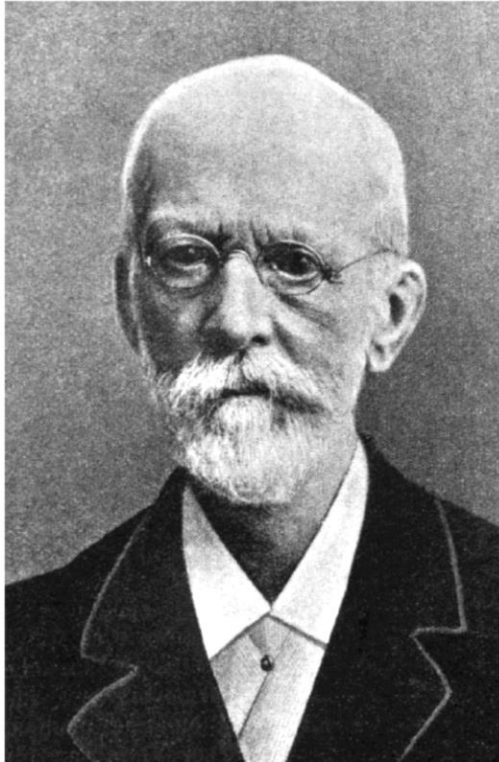
Típica história de tempo x carga para o eixo da roda



Tempo

Carregamento variável e assimétrico

○ August Wöhler 1819 – 1914



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

**August Wöhler desenvolveu estudos em fadiga entre 1852 a 1869**

# CASOS HISTÓRICOS

## Jatos Comet



(Prof.Dr. Claudio Ruggieri)



# COMET-TRINCAS QUE LEVARAM À FRATURA.

A análise de falhas :

A fratura ocorreu devido à **compressão e descompressão**, no pouso e decolagem, causando a **nucleação de trincas de fadiga** em pontos de **concentração de tensão**, próximo às **extremidades das escotilhas retangulares**. A **cabine era pressurizada com pressões duas vezes maiores que a dos outros aviões (56,9kPa)**

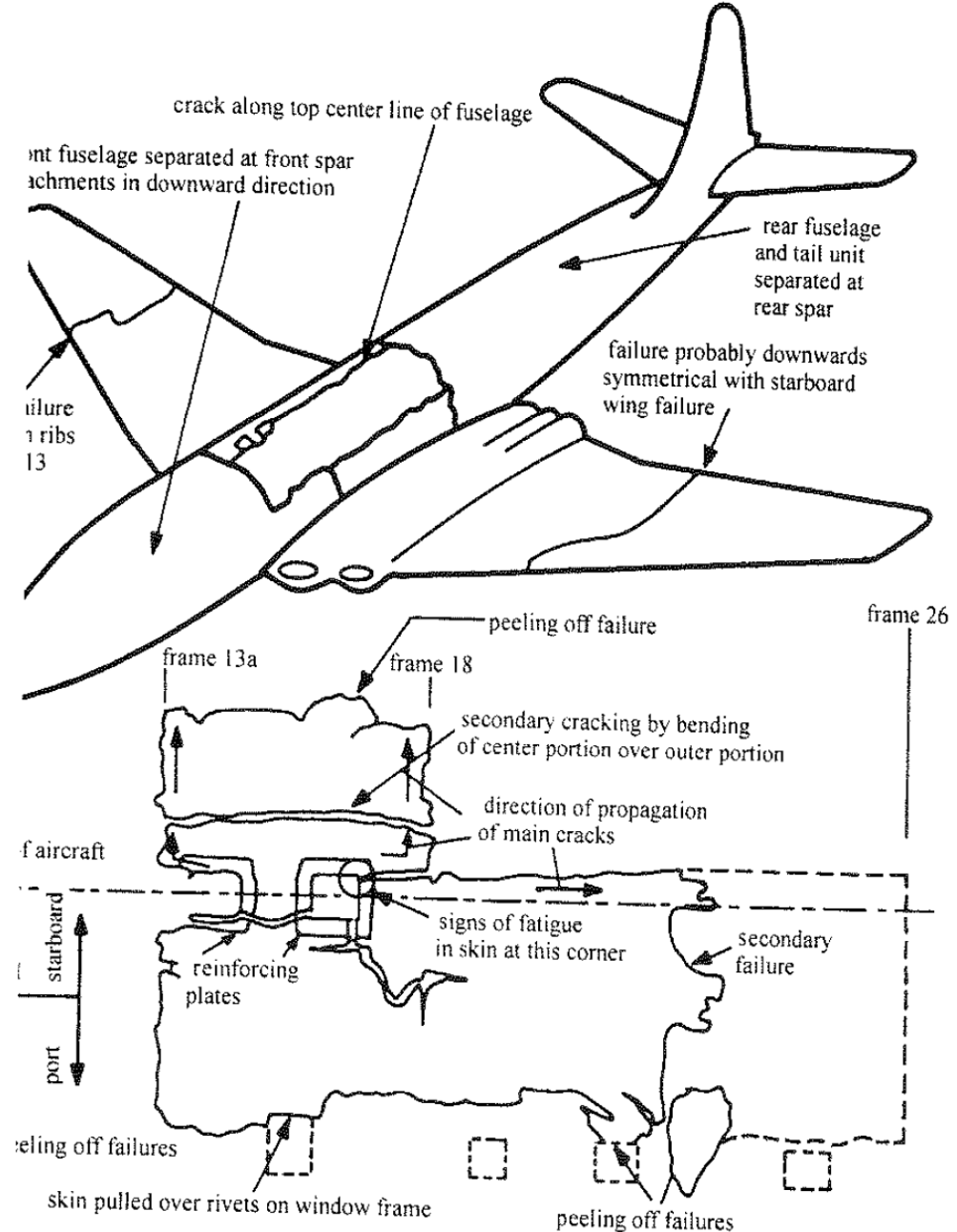
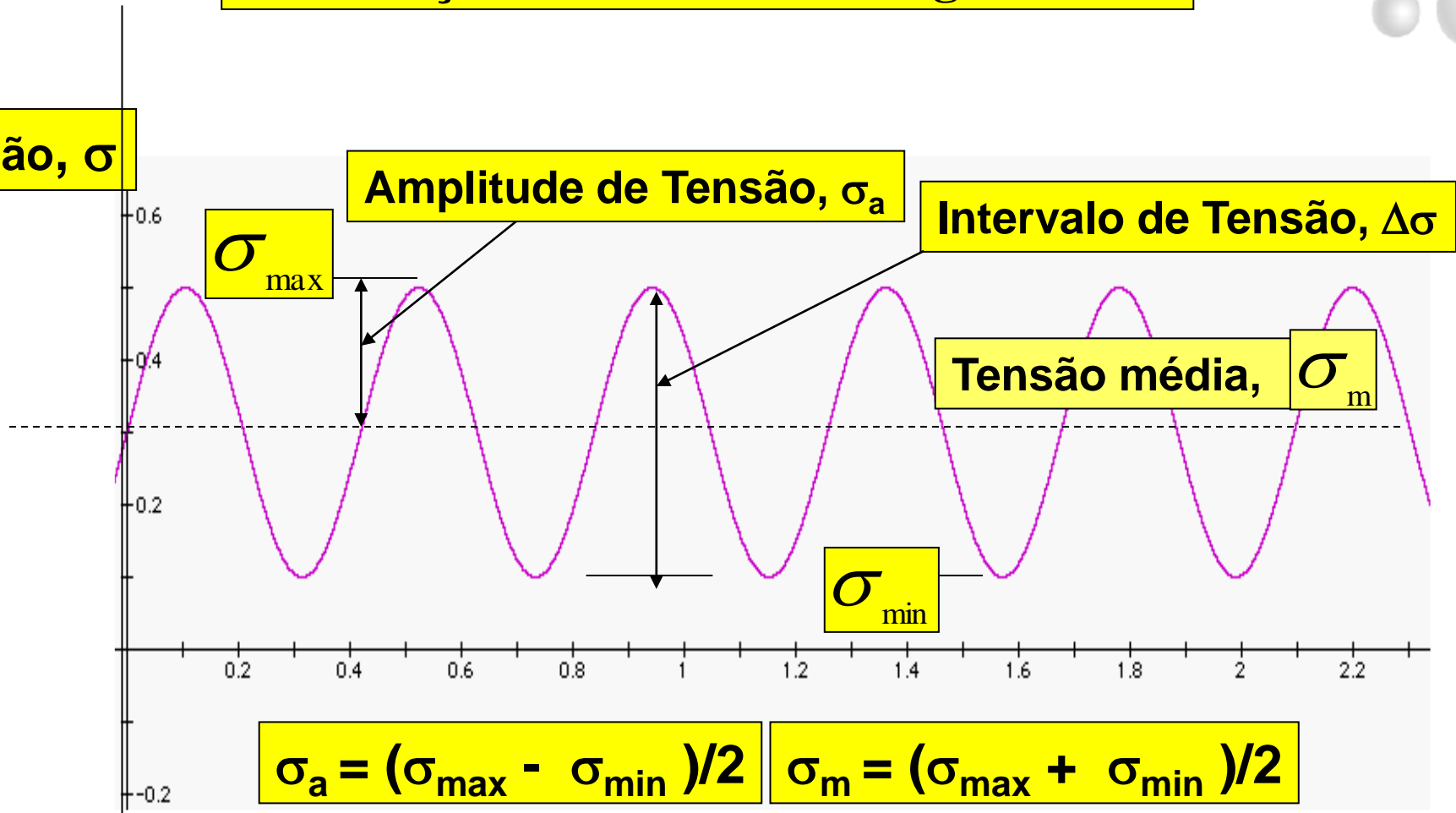


Fig. 1.1. Schematic diagram illustrating the location of fatigue cracks in a failed Comet airplane. (After Petroski, 1996.)

# DEFINIÇÕES E CONCEITOS

## Descrição do Ciclo de Carregamento

Tensão,  $\sigma$



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

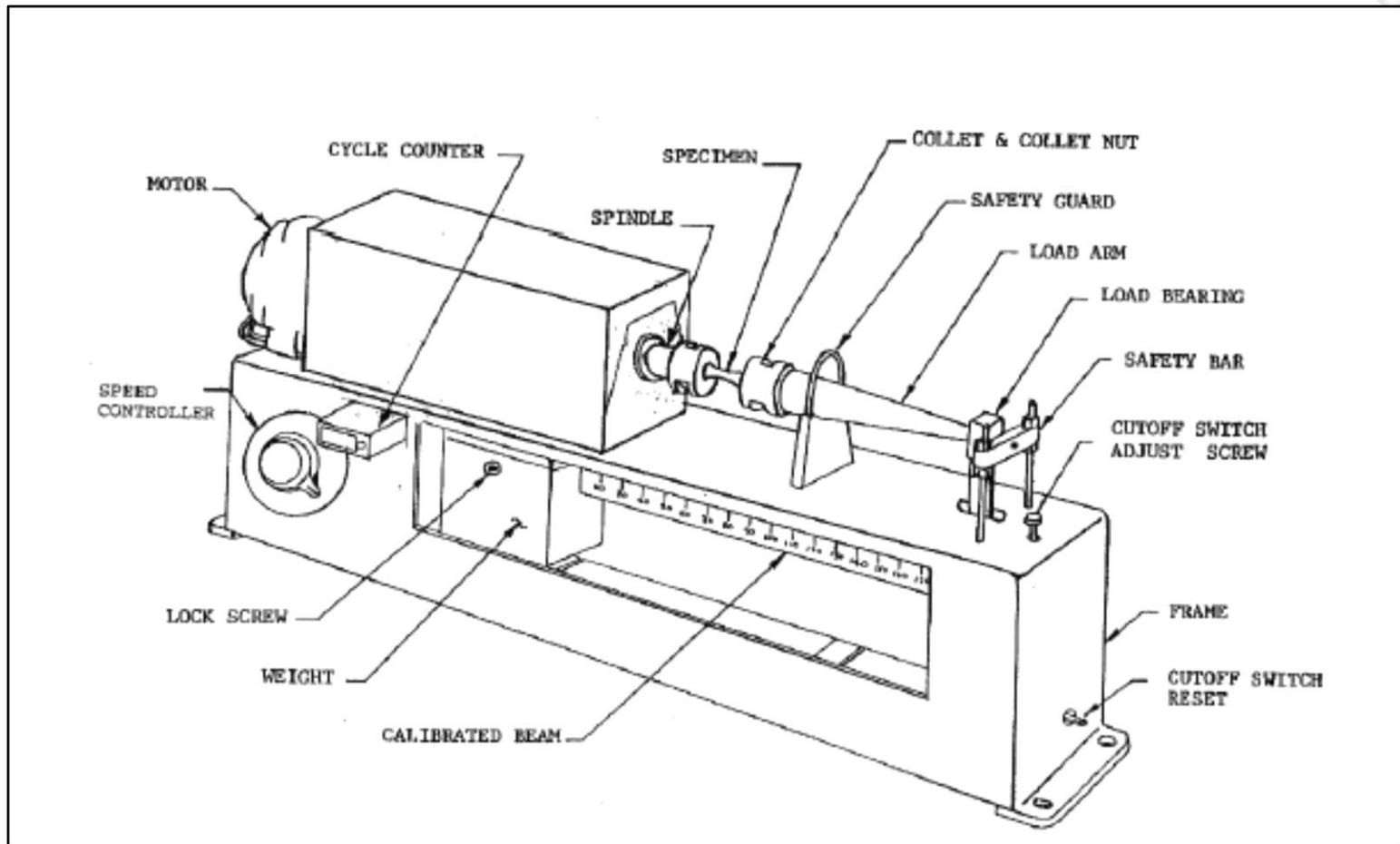
$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$$

RAZÃO DE AMPLITUDE

$$A = \sigma_a / \sigma_m$$

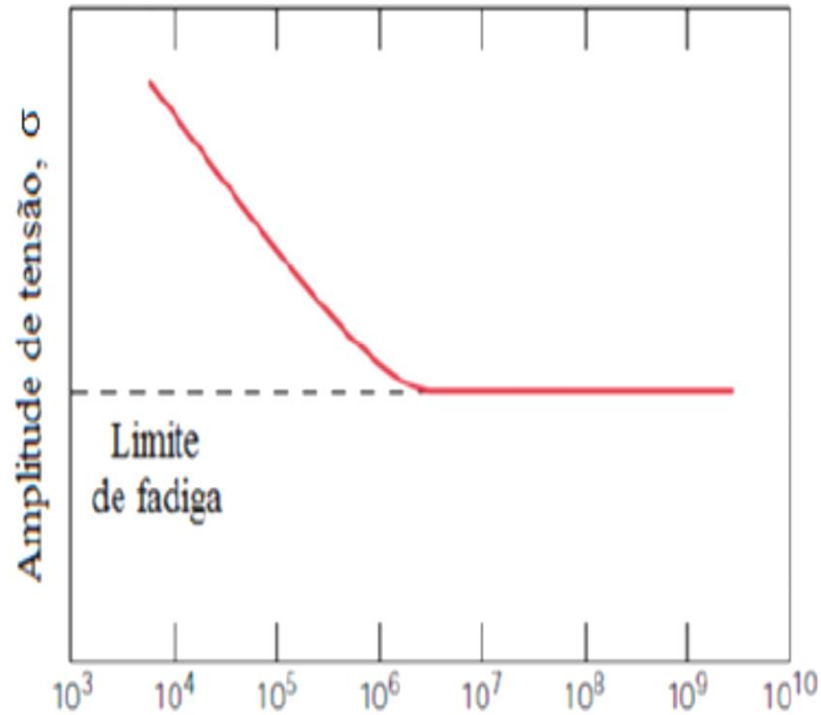


# ENSAIO DE FADIGA

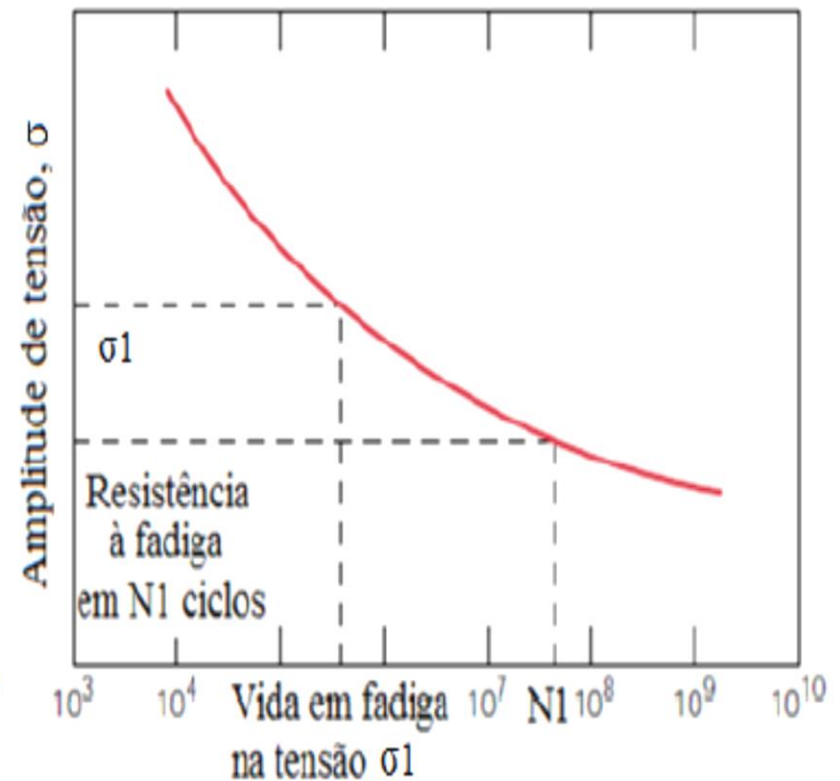


•Wöhler (1852) – Conclui, entre outras que o fenômeno da fadiga de alto ciclo é dependente de condições macroscópicas e microscópicas o que leva a uma dispersão estatística, aleatória.

# CURVA S-N APÓS TRATAMENTO ESTATÍSTICO



(a) Ciclos para a falhas (escala logarítmica)

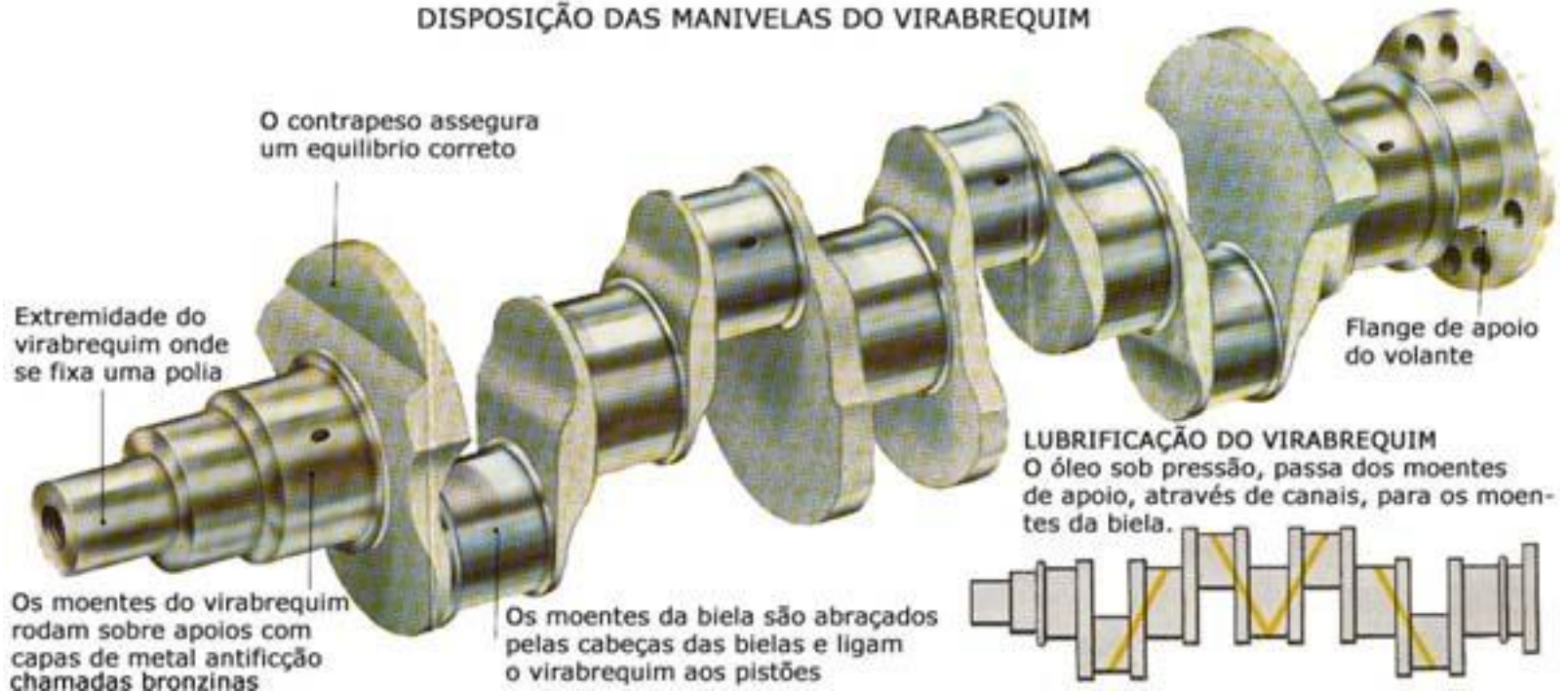


(b) Ciclos para a falhas (escala logarítmica)

**Ensaio cuja base é a iniciação da trinca por fadiga**

# ENSAIO DE FADIGA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

## DISPOSIÇÃO DAS MANIVELAS DO VIRABREQUIM

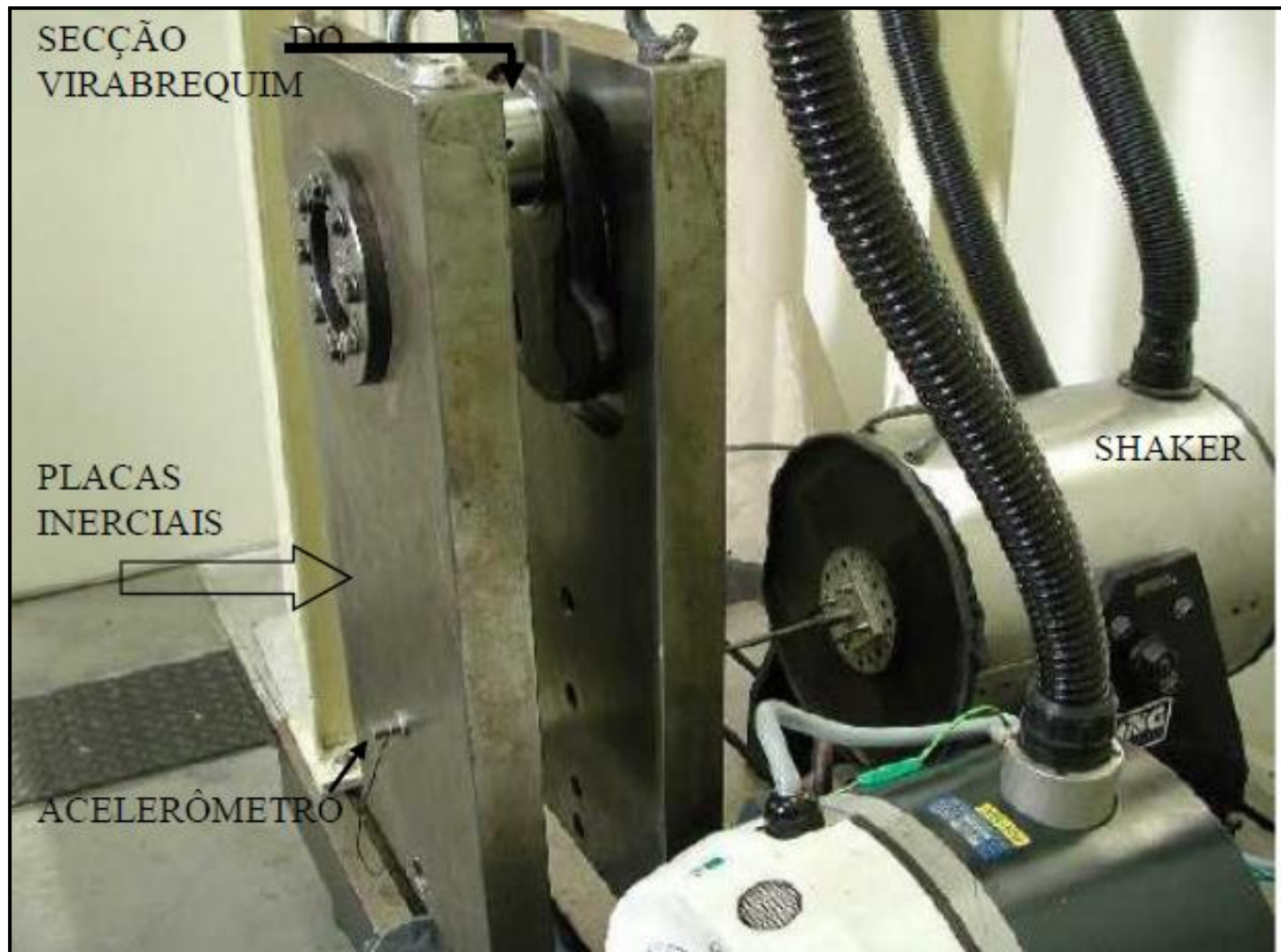




**DISPOSITIVOS HIDRÁULICOS**

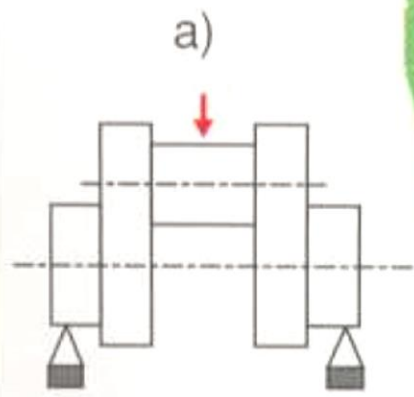
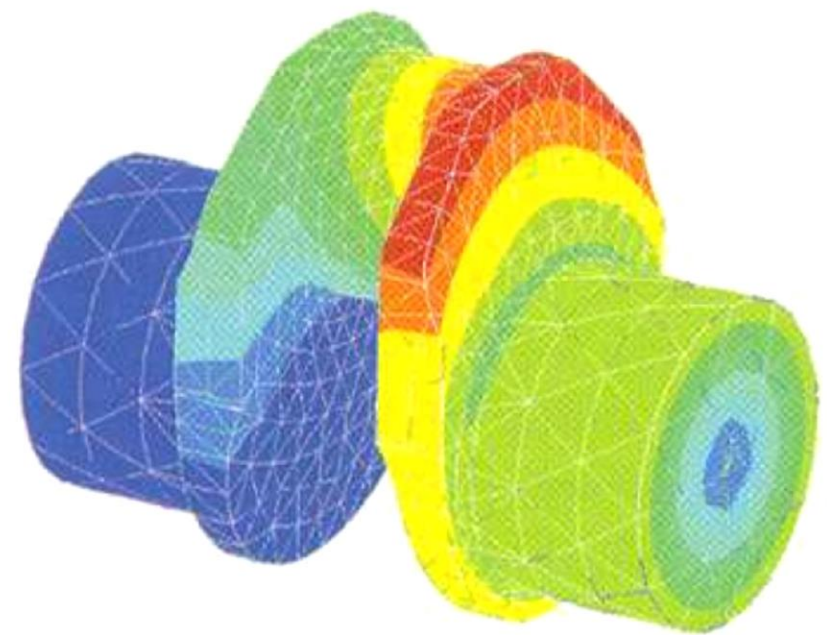
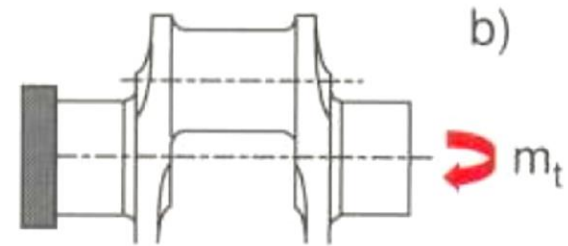
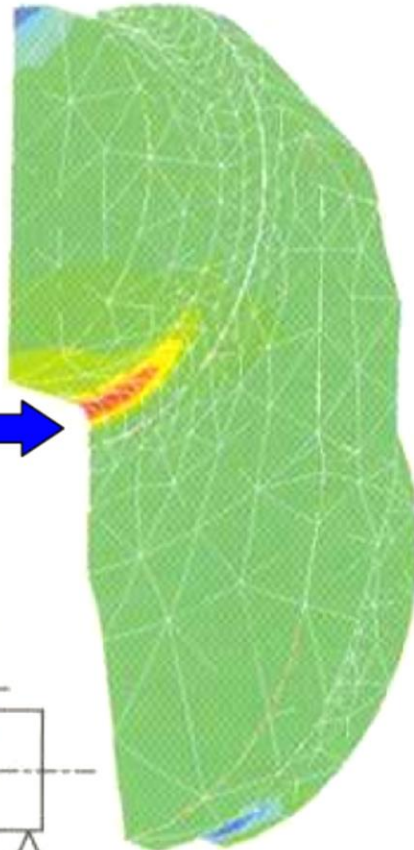


# ENSAIO DE FADIGA



**“SHAKER ELETROMAGNÉTICO”- RESONANT DWELL**

Maior concentração de tensão no Fillet



Modelo em elementos finitos apresentando maior concentração de tensão, por "bending", no raio de concordância(fillet) do pin journal.

# FLUÊNCIA

# Aplicação de materiais em média/alta temperatura

## CALDEIRA HORIZONTAL AD700

### Termoelétrica



[https://projectweb.elsam-eng.com/AD700/Milan\\_Conference/Forms/AllItems.aspx](https://projectweb.elsam-eng.com/AD700/Milan_Conference/Forms/AllItems.aspx)



# FLUÊNCIA

**MATERIAIS UTILIZADOS EM ALTA TEMPERATURA DEVEM APRESENTAR RESISTÊNCIA À FLUÊNCIA**

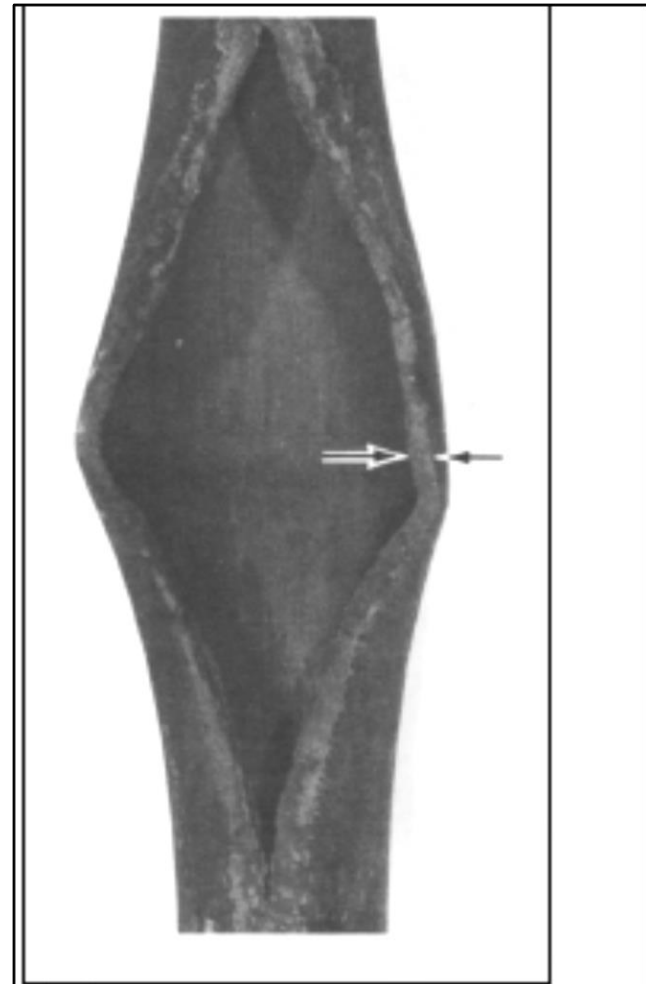
**FLUÊNCIA:** Acúmulo lento e progressivo de deformação ao longo do **tempo**, sob **carga constante** em **altas temperaturas** (para metais: acima de  $0,4 t_f$ ).

**Ex:** Para o Alumínio,  $T_f = 660^\circ\text{C} + 273\text{K} = 933\text{K}$

$933\text{K} \times 0,4 = 373,2\text{K} - 273\text{K} = 100,2^\circ\text{C}$

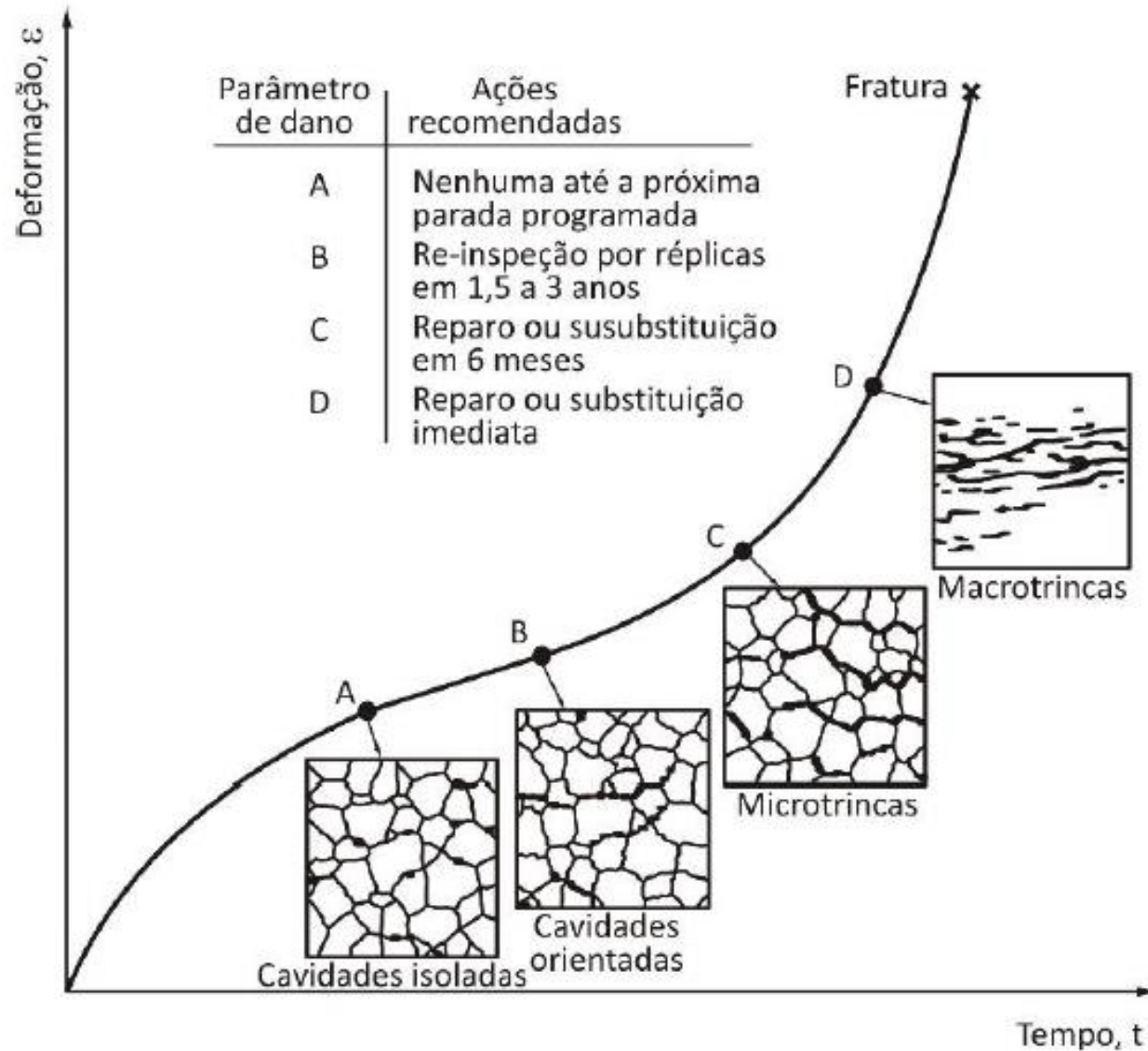
Ou seja, a faixa de temperatura a partir da qual o alumínio estará sujeito a fluência inicia em  $100,2^\circ\text{C}$

**FRATURA  
INTERGRANULAR, QUE  
OCORREU  
LENTAMENTE,  
AO LONGO DO TEMPO,  
SOB TENSÕES E  
TEMPERATURAS  
MODERADAS**



Fratura tipo "lábio grosso"

# Método de Neubauer e Wedel



Método de Neubauer e Wedel relacionado à curva de fluência [Furtado, 2001].



**FIM**