

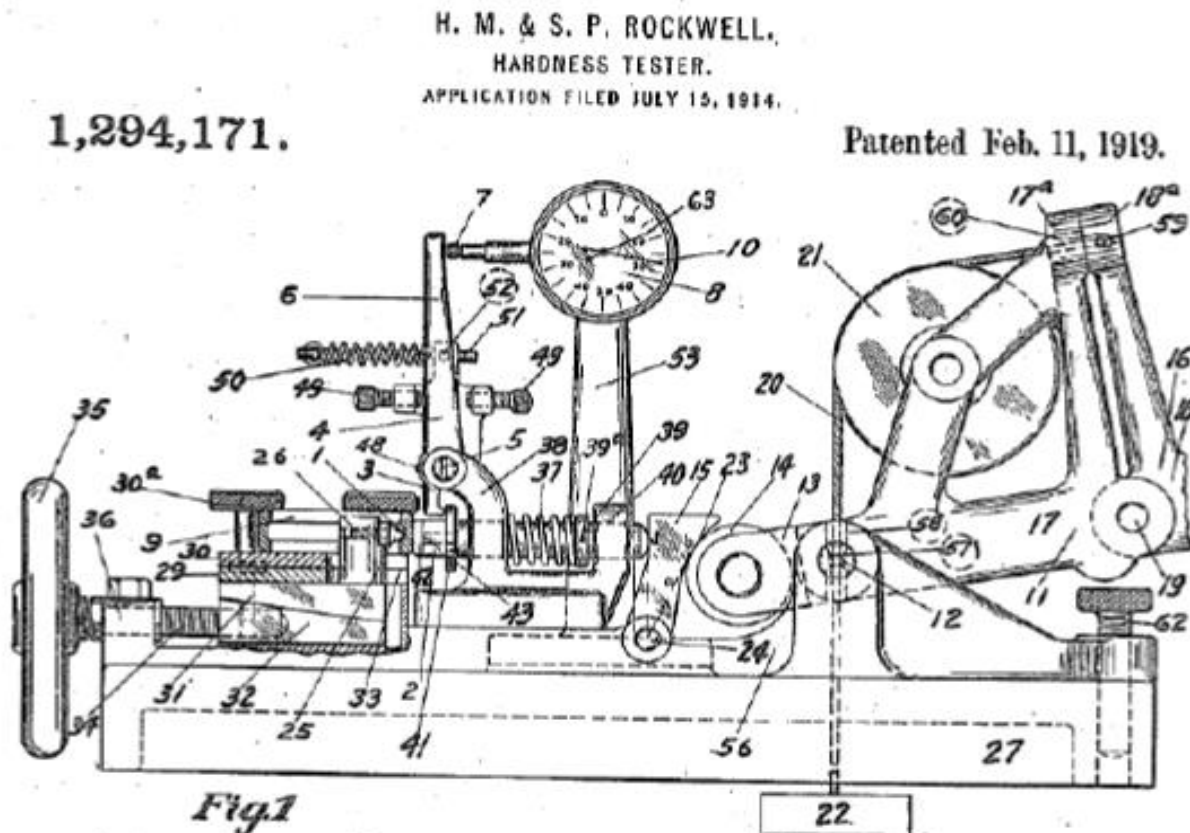
SMM0174- COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS

ENSAIOS MECÂNICOS PRIMÁRIOS

ENSAIO DE DUREZA

- Mohs(1822) – capacidade de riscar;
- J.A. Brinell(1849-1925) – 1900 dureza por penetração;
- Os irmãos Stanley e Hugh Rockwell – 1919.

Um dos desenhos da primeira patente do durômetro Rockwell, de 1919.



Dureza

Definição: Medida da resistência de um material a uma deformação plástica (permanente) localizada (pequena impressão ou risco)

Principais Vantagens:

- Fácil execução e barato (muito utilizado na indústria)
- Rapidez na execução
- Ensaio pode ser considerado não destrutivo (tamanho impr.)
- Conhecimento aproximado da resistência mecânica através do uso de tabelas de correlação

Dureza

Métodos de medição:

- Dureza de risco (escala de Mohs)
- Dureza de choque ou ressalto (Shore)
- Dureza de penetração (Brinell, Rockwell, Vickers)

Importância:

- Análise prévia-movimentação;
- Análise prévia- T.Térmico;
- Controle de qualidade. Ex: Trefilação.

Princípio do rebote: diferença de energia potencial

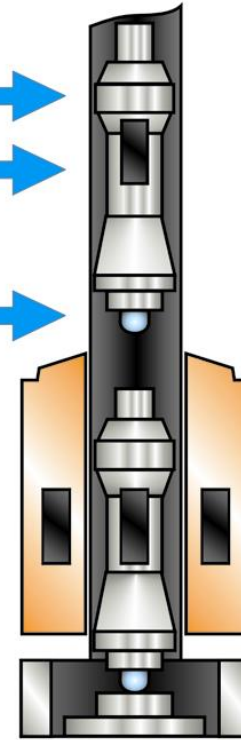


Impact body

Magnet

Tungsten
carbide ball

**Cross-cut of a typical
impact device**



Animation



Coil

APLICAÇÃO



Dureza Brinell (HB) – Ano 1900

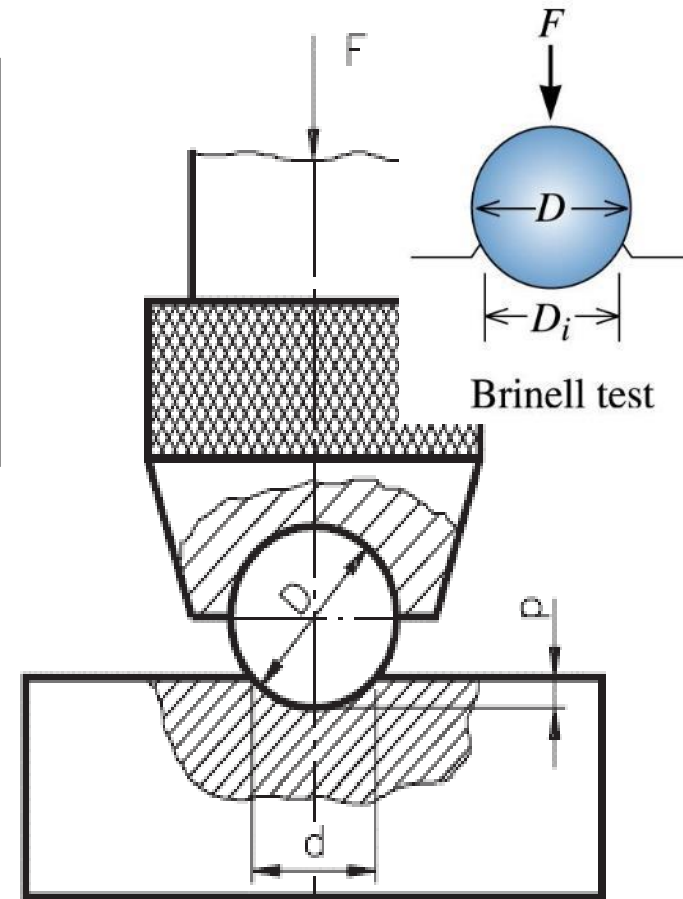
Consiste em comprimir lentamente uma esfera de aço endurecido ou de carbeto de tungstênio (CW), de diâmetro D , sobre uma superfície polida e limpa de um metal através de uma carga F , durante um tempo t .

Penetrador esférico ϕ : 1,2 ,5 ou 10 mm

Cargas: entre 500 e 3000 kg

Tempo: entre 10 e 30 s

$$HB = \frac{F}{A_c} \quad HB = \frac{F}{\pi Dp}$$



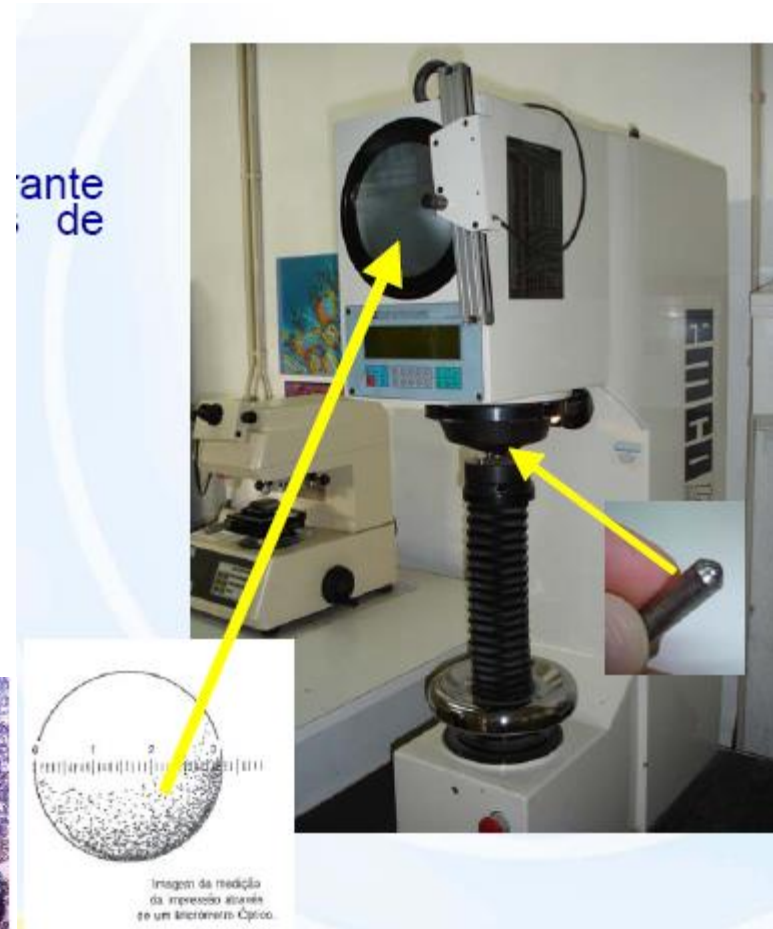
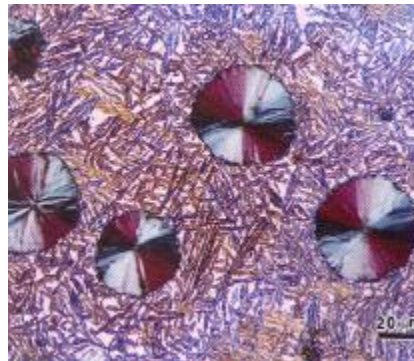
P = prof. de impressão (da calota)

Mecanismo de Medição Brinell

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

- D=diâmetro da esfera
- d=diâmetro da impressão*

*medido através de microscópio especial, utilizando uma escala gravada em sua ocular



Dureza Brinell

Unidade de dureza Brinell (HB)

A unidade kgf/mm^2 , que deveria ser sempre colocada após o valor de HB, é omitida, uma vez que a dureza Brinell não é um conceito físico satisfatório, pois a força aplicada no material tem valores diferentes em cada ponto da calota.

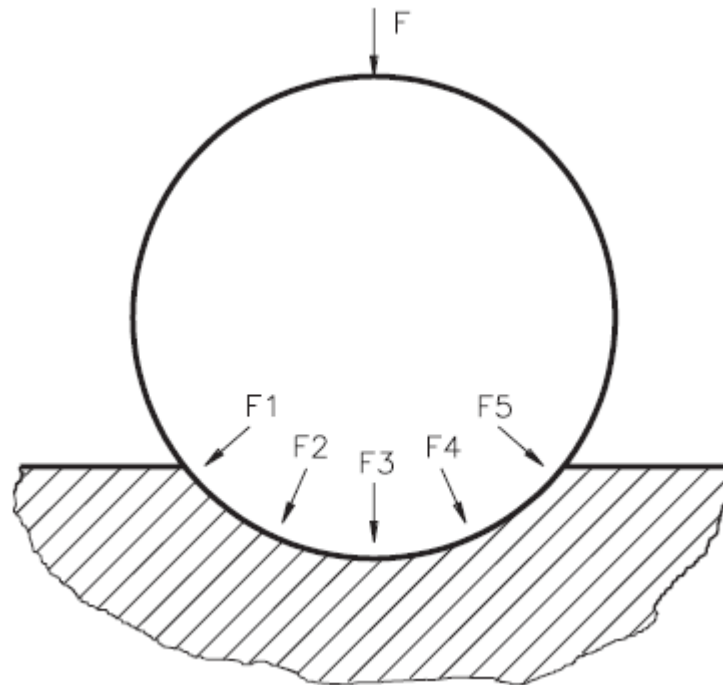


Tabela que fornece os valores de dureza Brinell normal, em função de um diâmetro de impressão d.

DUREZA BRINELL EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DA IMPRESSÃO (DIÂMETRO DA ESFERA DO PENETRADOR: 10 MM)			
d (mm)	HB (F = 3000 kgf)	d (mm)	HB (F = 3000 kgf)
2,75	(495)	4,05	223
2,80	(477)	4,10	217
2,85	(461)	4,15	212
2,90	444	4,20	207
2,95	429	4,25	201
3,00	415	4,30	197
3,05	401	4,35	192
3,10	388	4,40	187
3,15	375	4,45	183
3,20	363	4,50	179
3,25	352	4,55	174
3,30	341	4,60	170
3,35	331	4,65	167
3,40	321	4,70	163
3,45	311	4,75	159
3,50	302	4,80	156
3,55	293	4,85	152
3,60	285	4,90	149
3,65	277	4,95	146
3,70	269	5,00	143
3,75	262	5,10	137
3,80	255	5,20	131
3,85	248	5,30	126
3,90	241	5,40	121
3,95	235	5,50	116
4,00	229	5,60	111

Relação entre dureza Brinell e limite de resistência

No caso dos aços existe uma relação empírica entre dureza Brinell e o limite de resistência, s_r , dada por:

$$\sigma_r = 0,36 * HB \text{ [kgf/mm}^2\text{]}$$

Segundo O'Neill, o valor de 0,36 vale para aços doces (aço carbono), entretanto este valor pode mudar para:

- 0,49 para Ni recozido
- 0,41 para Ni e latão encruado
- 0,52 para cobre recozido
- 0,40 para alumínio e suas ligas
- 0,34 aços Cr-Mo

Dureza Rockwell (HR) - 1922

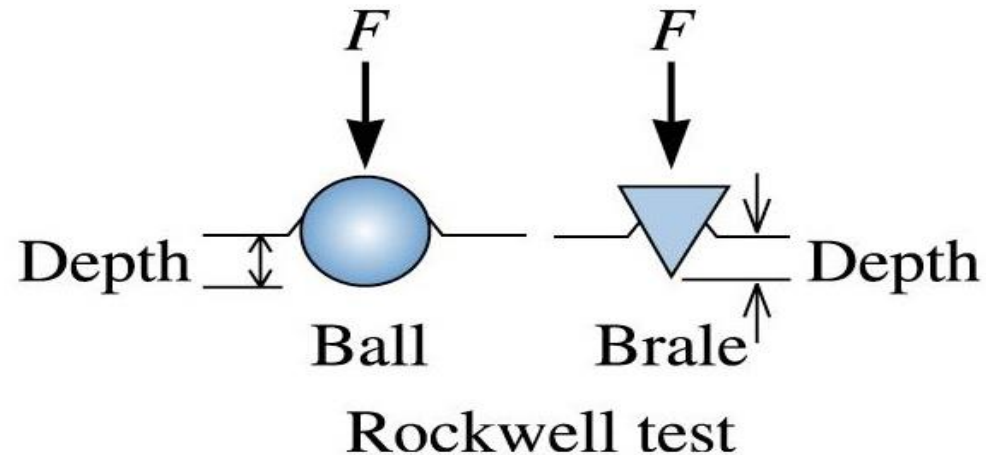
- Método mais utilizado para se medir dureza
- Elimina o tempo necessário para a medição de qualquer dimensão da impressão causada, pois o resultado é diretamente lido na máquina de ensaio, sendo portanto rápido e livre de erros humanos;
- Fácil execução, facilidade em detectar pequenas diferenças de durezas e pequeno tamanho da impressão;
- Ensaio Rockwell superficial é realizado em corpos de prova mais finos (delgados).



Método de Medição Rockwell

- Índice (HR) é determinado pela diferença na profundidade de penetração de uma carga inicial (pré-carga) seguida de uma carga principal.

- Ensaio Rockwell
 - Pré-carga = 10 kgf
 - Principal = 60, 100 e 150 kgf
- Ensaio Rockwell Superficial
 - Pré-carga = 3 kgf
 - Principal = 15, 30 e 45 kgf

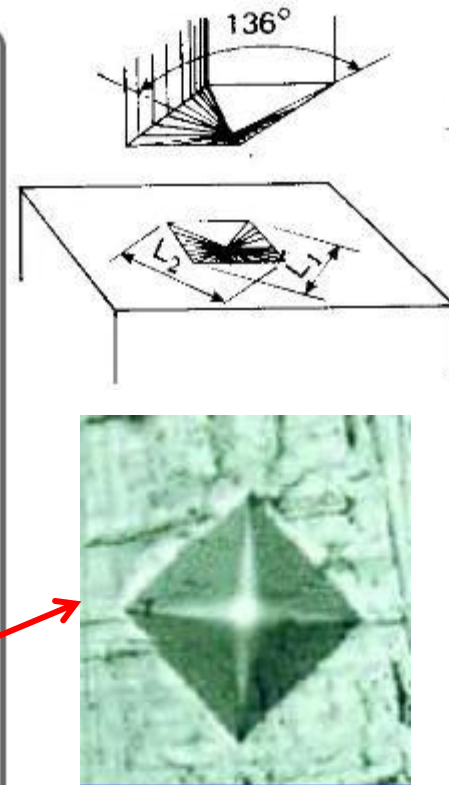
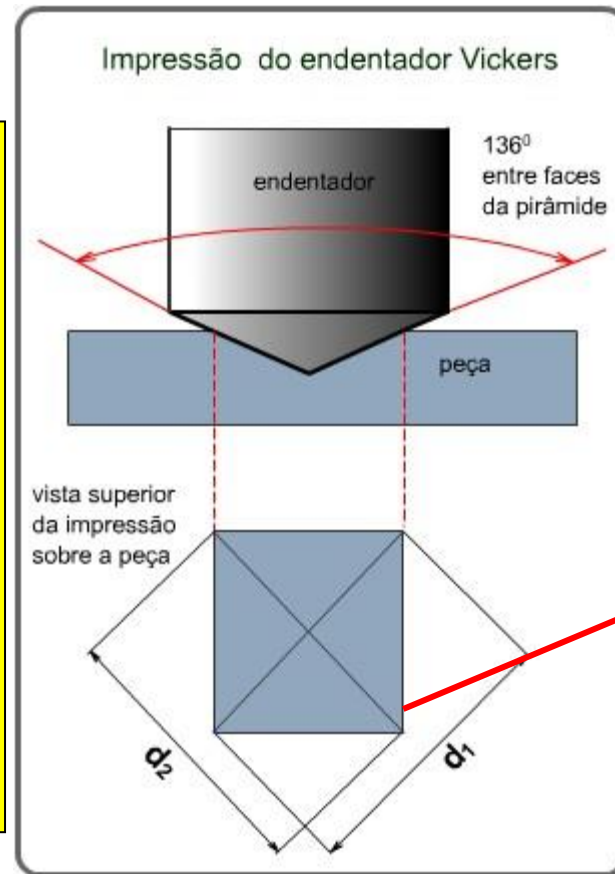


Penetradores do ensaio Rockwell:

- Esferas de aço endurecidas com φ : 1/16, 1/8, 1/4 e 1/2 pol.
- Penetradores cônicos de diamante (brale) usado para materiais mais duros

Dureza Vickers (HV) - 1925

- O método é baseado na penetração de uma pirâmide de base quadrada, com ângulo entre as faces opostas de 136° feita de diamante;
- Adequado para regiões pequenas e selecionadas do corpo de prova;
- Impressão é observada em um microscópio e medida.

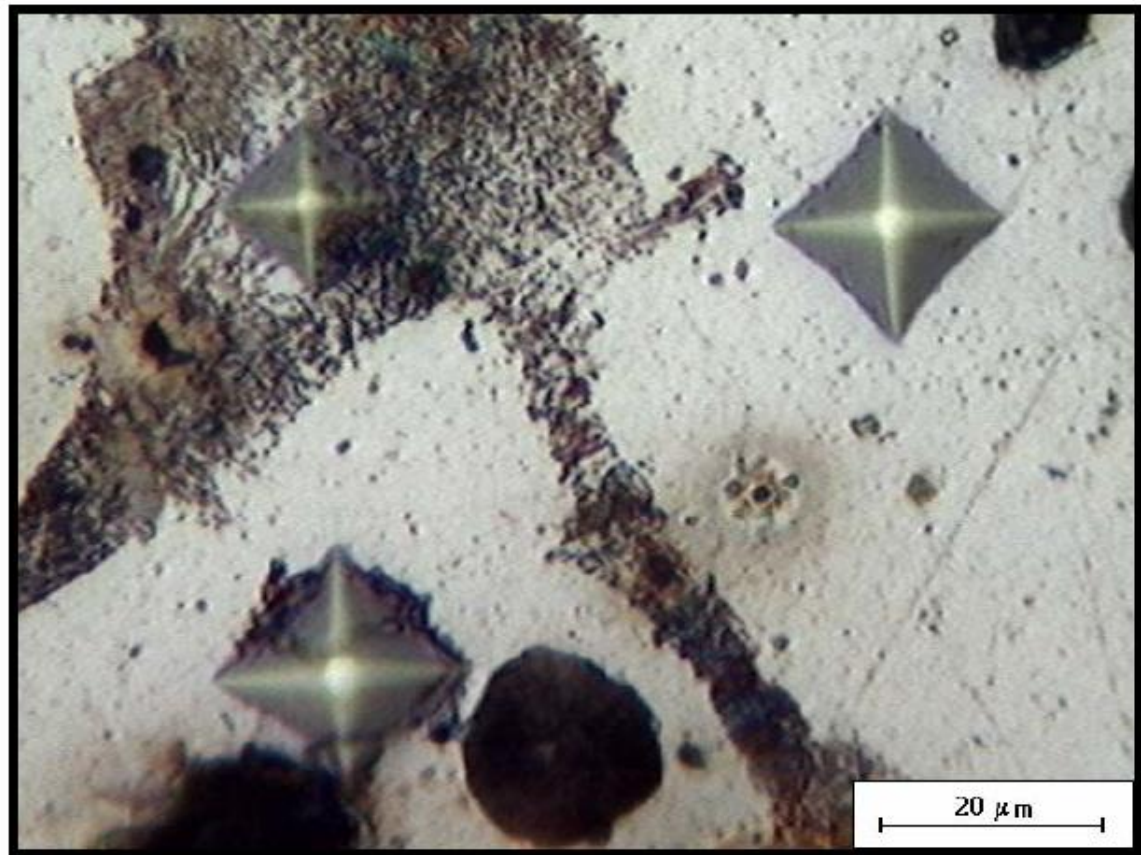


$$D = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$HV = \frac{2F \operatorname{sen} \frac{136}{2}}{D^2} = \frac{1,8544F}{D^2}$$

Indentação Vickers

Indentação em um
fofo Nodular,
162HV (fase clara –
Ferrita), 324HV
(fase escura –
Perlita). Ataque
Nital, 500x



DUREZA X LIMITE DE RESISTÊNCIA

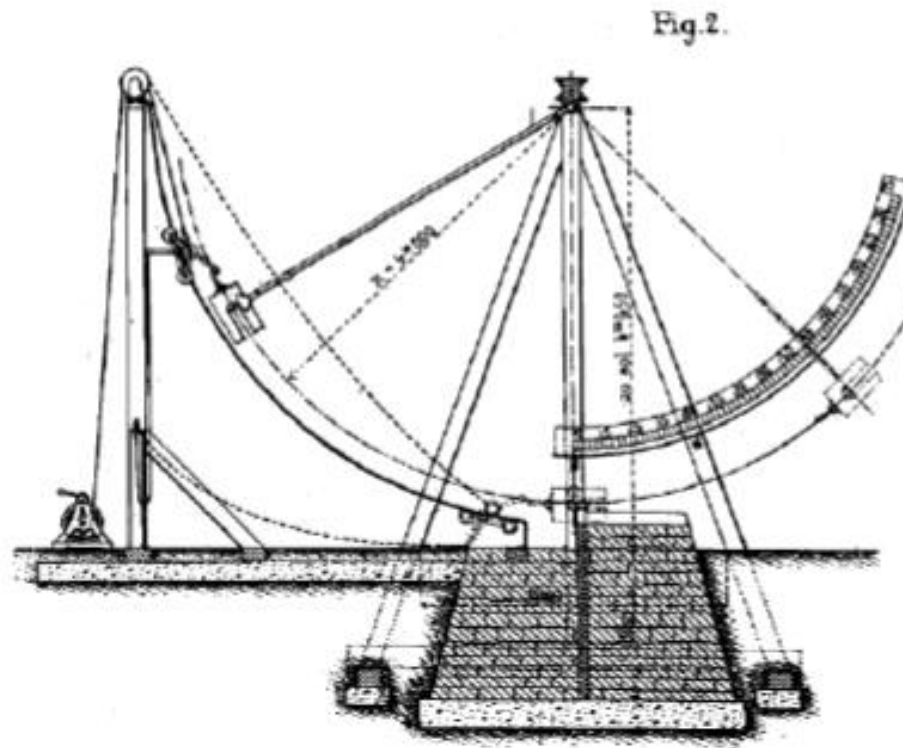


TABLE 2 Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-austenitic Steels^A (Rockwell C to Other Hardness Numbers)

Rockwell C Scale, 150-kgf Load, Diamond Penetrator	Vickers Hardness Number	Brinell Hardness, 3000-kgf Load, 10-mm Ball	Knoop Hardness, 500-gf Load and Over	Rockwell A Scale, 60-kgf Load, Diamond Penetrator	Rockwell Superficial Hardness			Approximate Tensile Strength, ksi (MPa)
					15N Scale, 15-kgf Load, Diamond Penetrator	30N Scale 30-kgf Load, Diamond Penetrator	45N Scale, 45-kgf Load, Diamond Penetrator	
68	940	...	920	85.6	93.2	84.4	75.4	...
67	900	...	895	85.0	92.9	83.6	74.2	...
66	865	...	870	84.5	92.5	82.8	73.3	...
65	832	739	846	83.9	92.2	81.9	72.0	...
64	800	722	822	83.4	91.8	81.1	71.0	...
63	772	706	799	82.8	91.4	80.1	69.9	...
62	746	688	776	82.3	91.1	79.3	68.8	...
61	720	670	754	81.8	90.7	78.4	67.7	...
60	697	654	732	81.2	90.2	77.5	66.6	...
59	674	634	710	80.7	89.8	76.6	65.5	351 (2420)
58	653	615	690	80.1	89.3	75.7	64.3	338 (2330)
57	633	595	670	79.6	88.9	74.8	63.2	325 (2240)
56	613	577	650	79.0	88.3	73.9	62.0	313 (2160)
55	595	560	630	78.5	87.9	73.0	60.9	301 (2070)
54	577	543	612	78.0	87.4	72.0	59.8	292 (2010)
53	560	525	594	77.4	86.9	71.2	58.6	283 (1950)
52	544	512	576	76.8	86.4	70.2	57.4	273 (1880)
51	528	496	558	76.3	85.9	69.4	56.1	264 (1820)
50	513	482	542	75.9	85.5	68.5	55.0	255 (1760)
49	498	468	526	75.2	85.0	67.6	53.8	246 (1700)
48	484	455	510	74.7	84.5	66.7	52.5	238 (1640)
47	471	442	495	74.1	83.9	65.8	51.4	229 (1580)
46	458	432	480	73.6	83.5	64.8	50.3	221 (1520)
45	446	421	466	73.1	83.0	64.0	49.0	215 (1480)

ENSAIO DE IMPACTO

- O cientista francês **Georges Augustin Albert Charpy (1865-1945)**;
- **1901 - *Proceedings of the Congress of the International Association for Testing Materials (IATM)***;
- O inglês **E. G. Izod (1876-1946)**- alternativa, em **1903**.

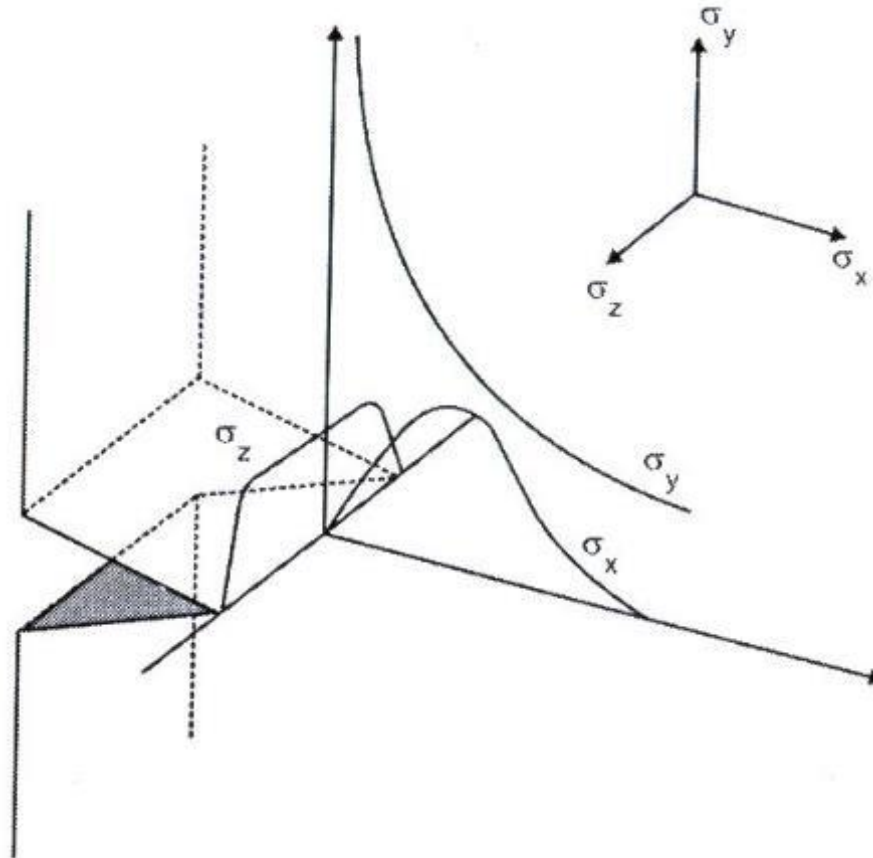


Desenho da máquina para ensaio de impacto proposta por Charpy.

Ensaio de Impacto

- ❑ Deformação a uma temperatura relativamente baixa (Tend. Frágil)
- ❑ Elevada taxa de deformação (Tendência a fratura frágil)
- ❑ Estado de tensão triaxial (introduzido pela presença de um entalhe - tendência a fratura frágil)

Efeito Geometria do Entalhe



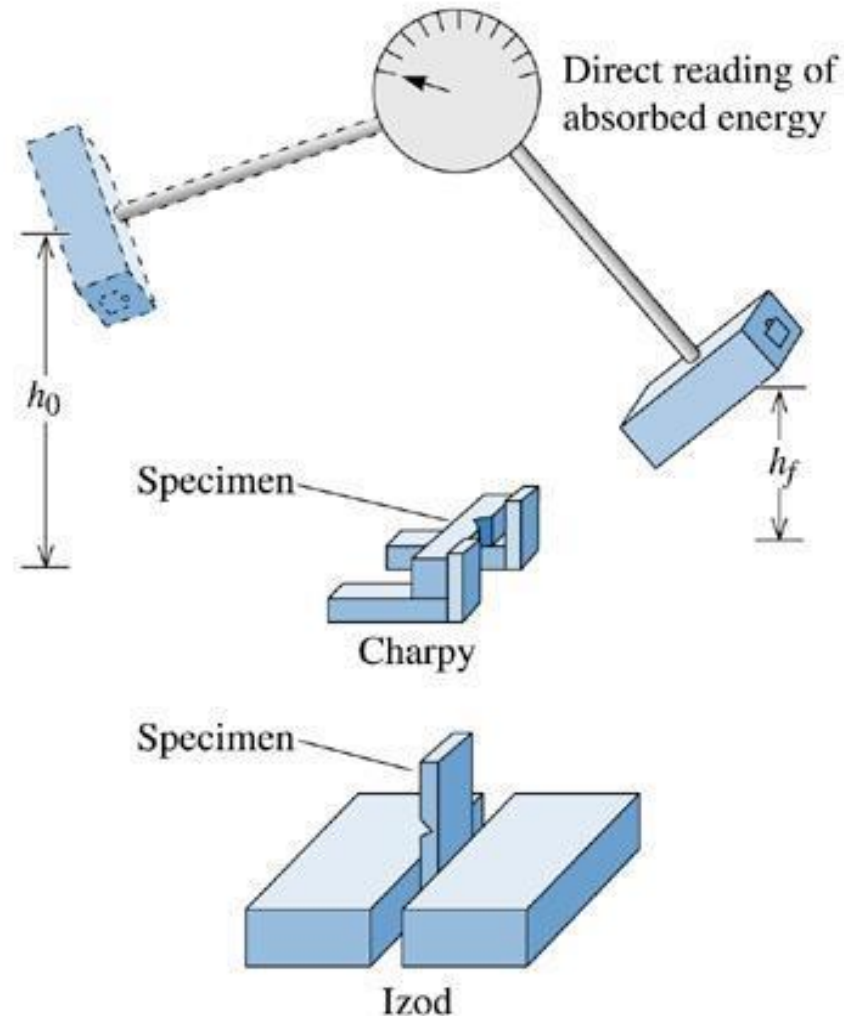
- A restrição plástica no entalhe produz um estado de tensão triaxial, sendo a concentração de tensão no entalhe dada por:

$$K_{\sigma} = \left(1 + \frac{\pi}{2} - \frac{\omega}{2} \right)$$

onde w é ângulo interior do entalhe.

Técnicas de Ensaio de Impacto: Charpy e Izod

- As técnicas Charpy e Izod são utilizadas para medir a energia de impacto.
- O corpo de prova possui o formato de uma seção quadrada com um entalhe em “V”
- Diferença entre as técnicas Charpy e Izod é como o corpo de prova é sustentado
- A energia absorvida é medida através da diferença entre h e h' e corresponde à energia de impacto

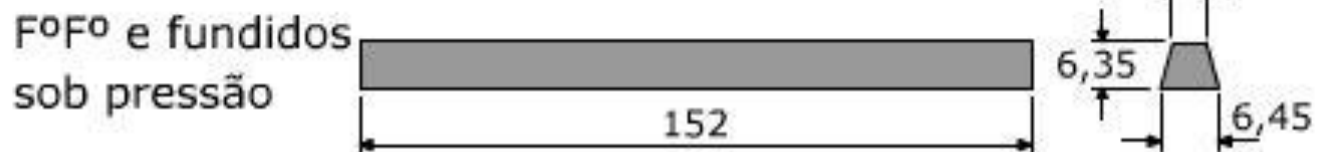
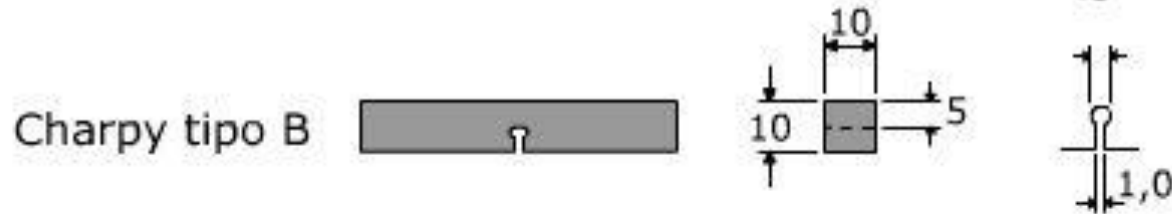
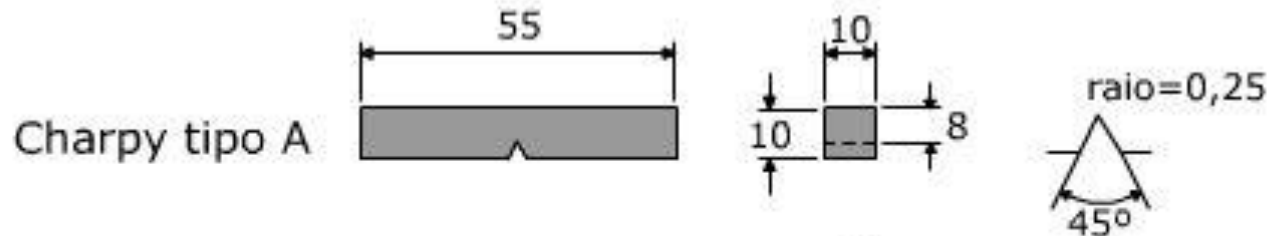


Máquina de Ensaio de Impacto



Principais Configuração CPs Charpy

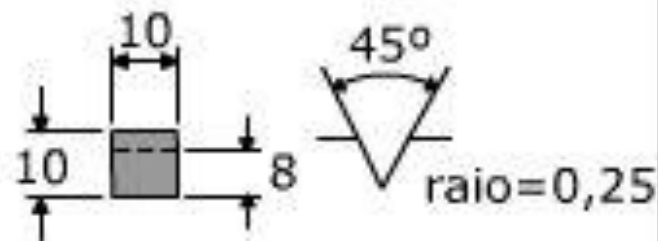
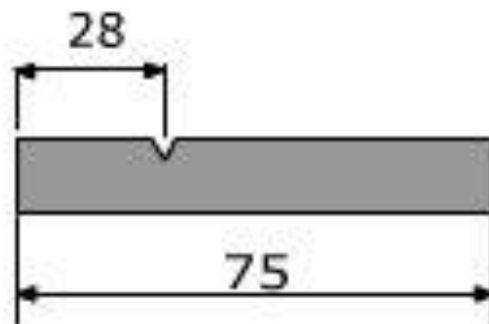
Todas as dimensões em mm



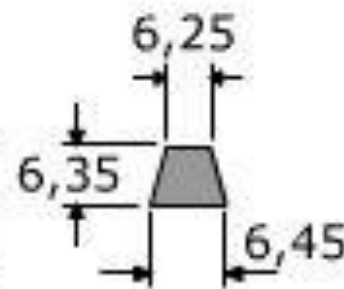
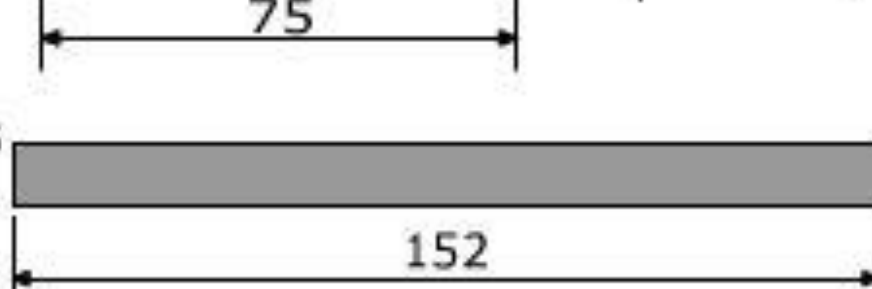
Principais Configuração CPs IZOD

Todas as dimensões em mm

Izod (tipo D)



F^oF^o e fundidos
sob pressão



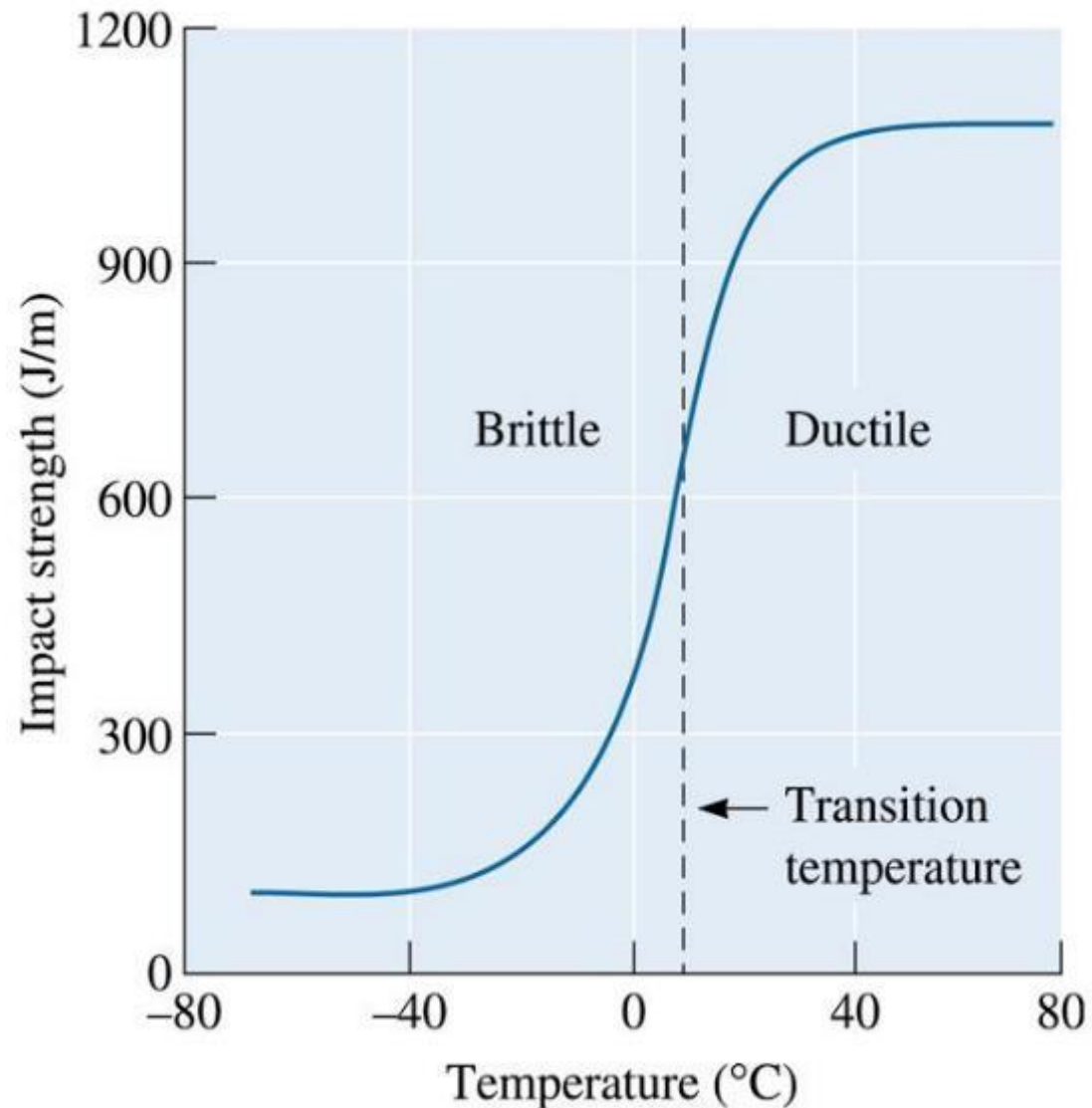
Efeito Geometria do Entalhe



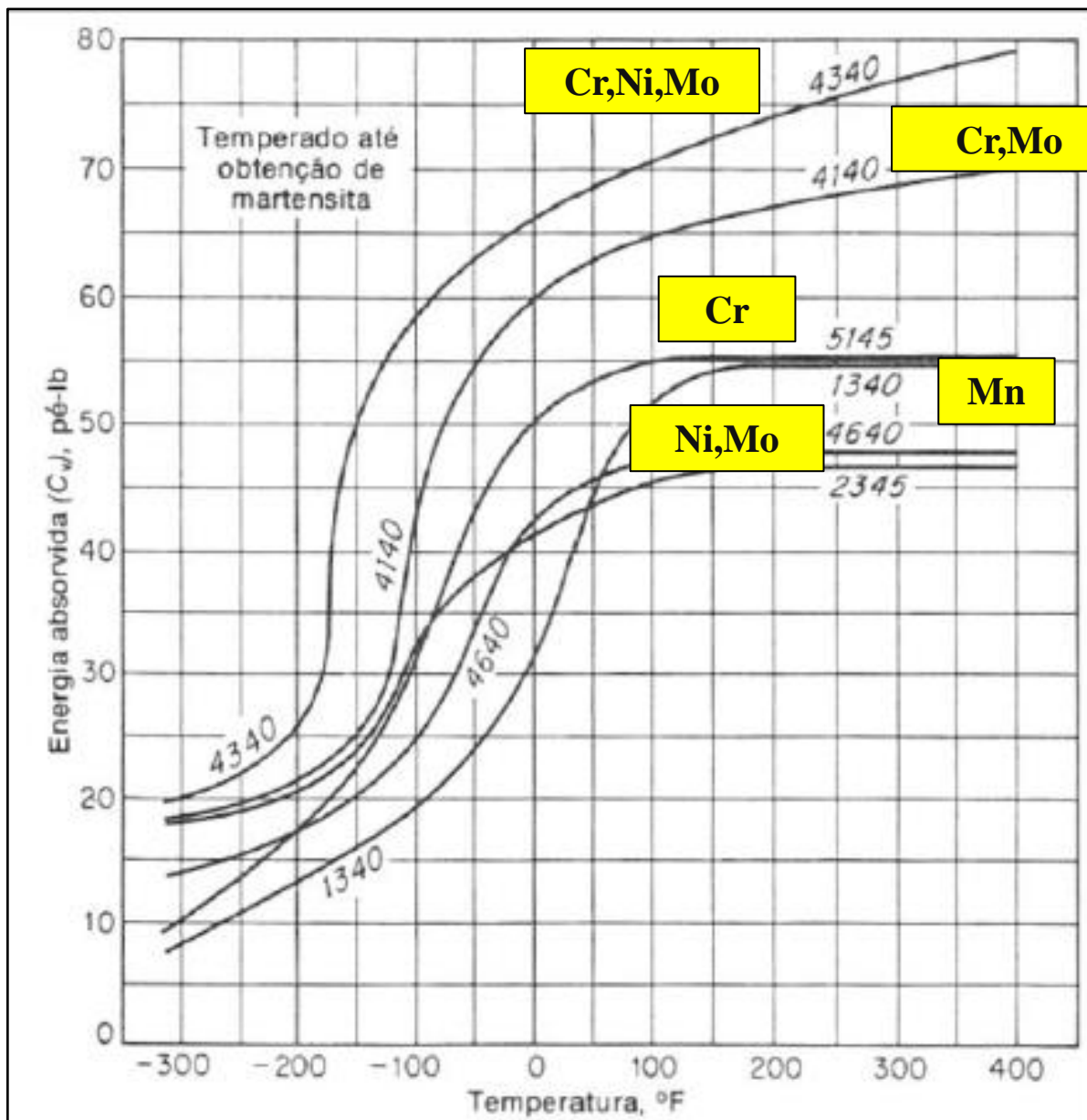
Tanto a **profundidade** quanto o **raio de curvatura** da extremidade do entalhe têm efeito significativo no comportamento a fratura do material.

Transição Dúctil - Frágil

Em um aço em temperaturas elevadas a energia é relativamente grande e a medida que a temperatura é reduzida, a energia de impacto cai para um valor constante, porém pequeno, i.é, o modo de fratura é frágil.

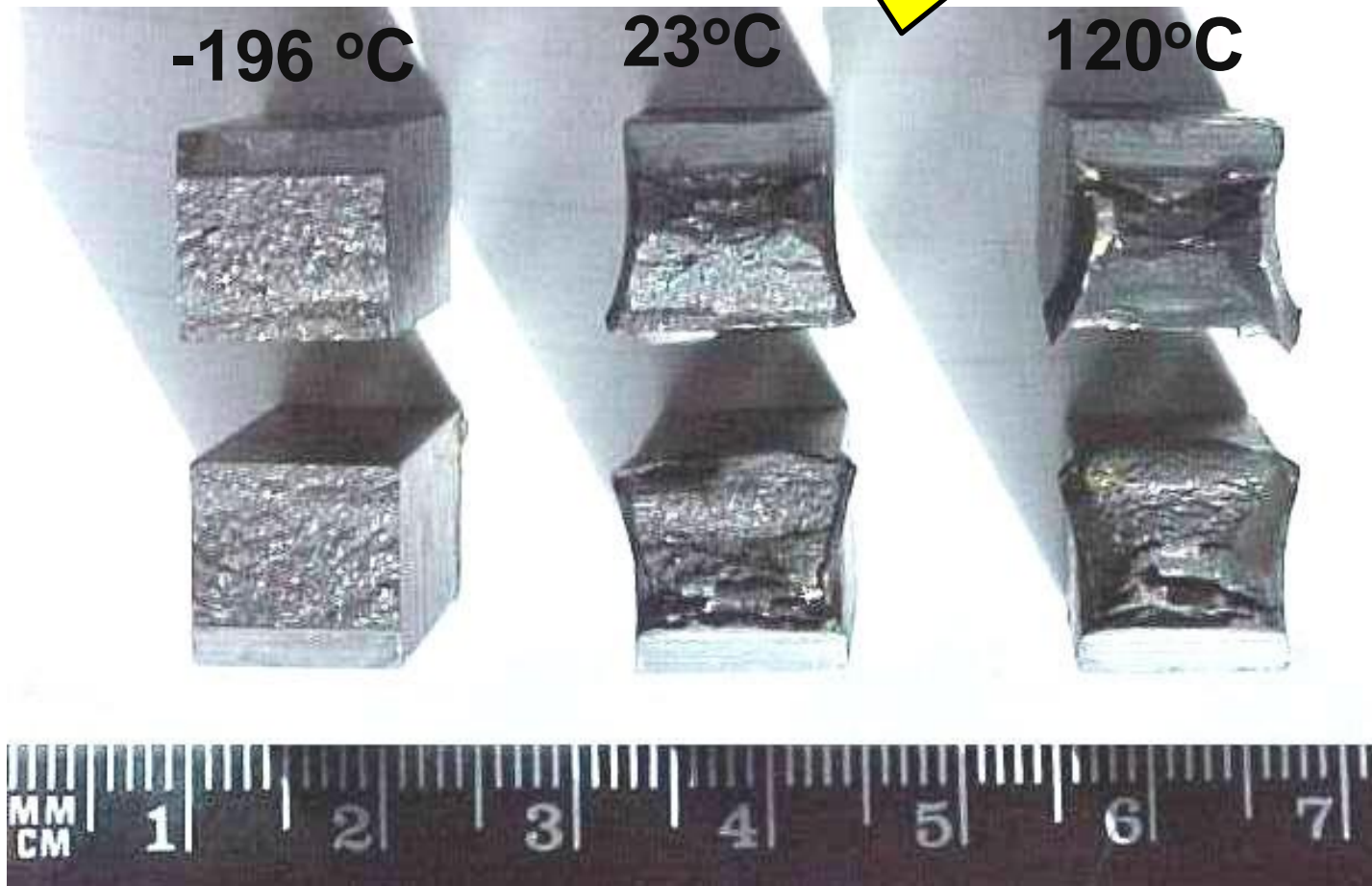


Efeito Temperatura X Elementos liga



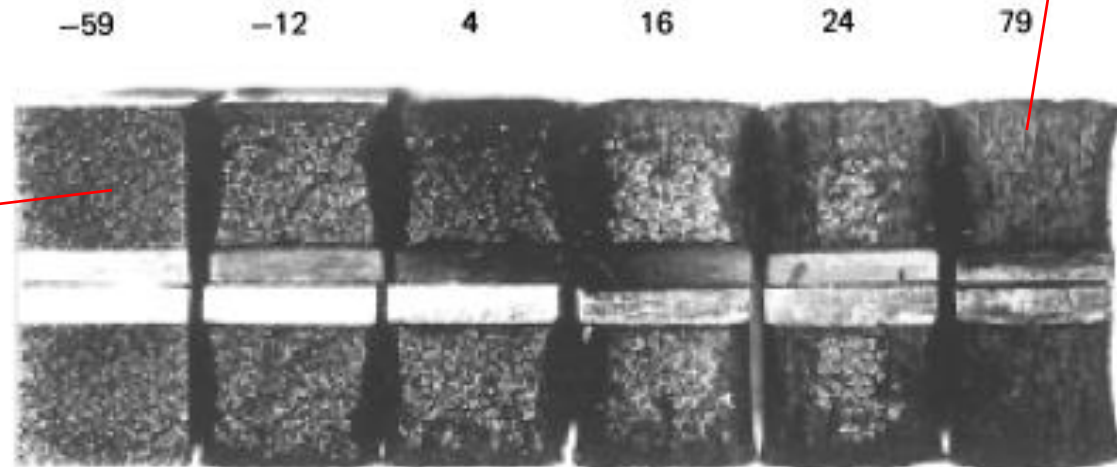
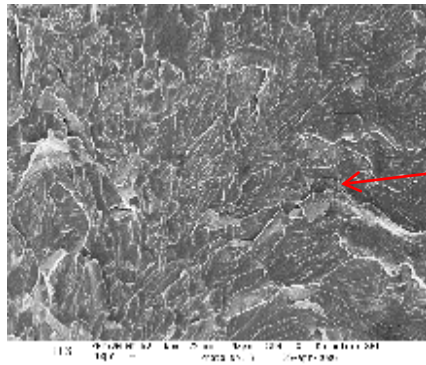
Temperatura X Deformação

Através do ensaio Charpy pode-se verificar se um material tem uma temperatura de transição dúctil-frágil



Transição Dúctil - Frágil

- ✓ Uma das principais funções dos ensaios de impacto é determinar se um material apresenta transição dúctil – frágil com a diminuição da temperatura.
- ✓ Uma análise da superfície de fratura de CPs testados em diferentes temperaturas indicam a transição dúctil-frágil pelo % de fratura dúctil e frágil em cada temperatura.



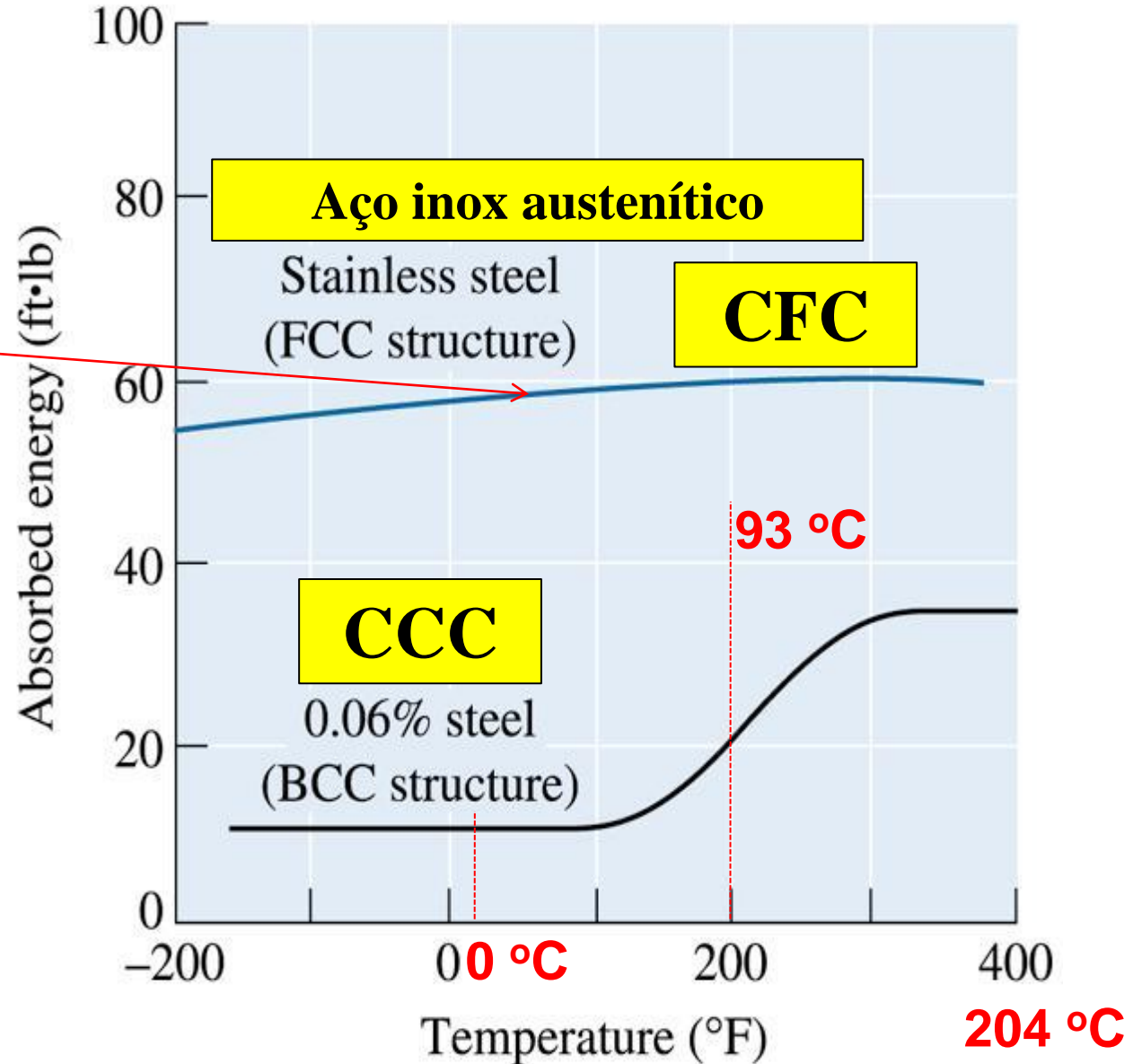
Será que todos os metais apresentam temperatura de transição dútil – frágil?

Caso sim, como transportamos nitrogênio líquido? Temperatura de $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$.

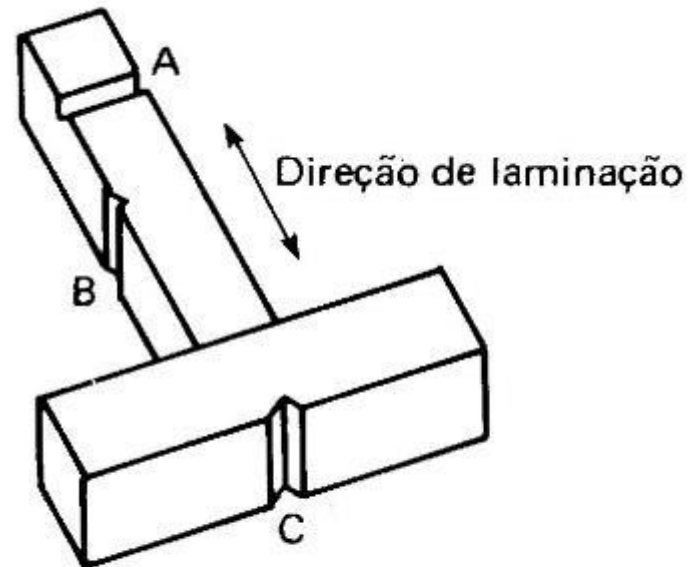
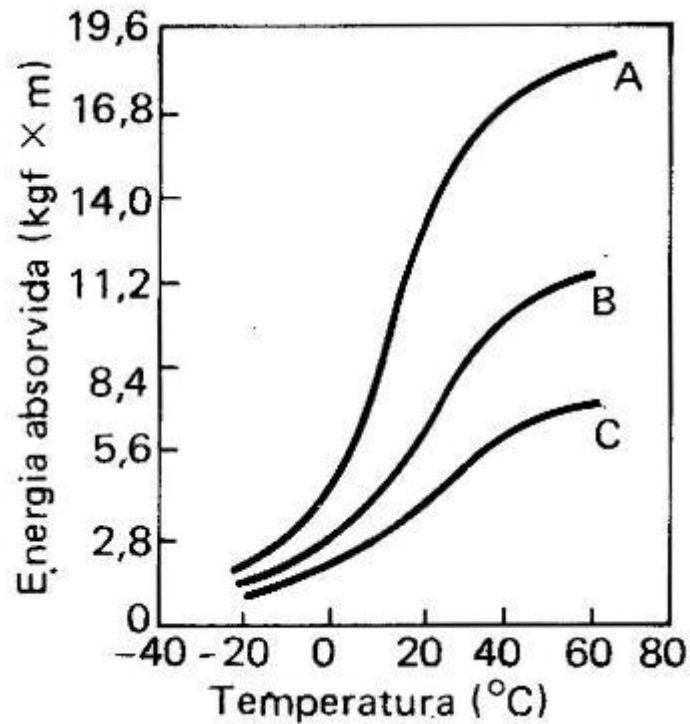
Transição Dúctil - Frágil

Não apresenta
transição
dúctil/frágil

Recipiente inox
nitrogênio líquido
(-196°C) possui
uma Estrutura
CFC

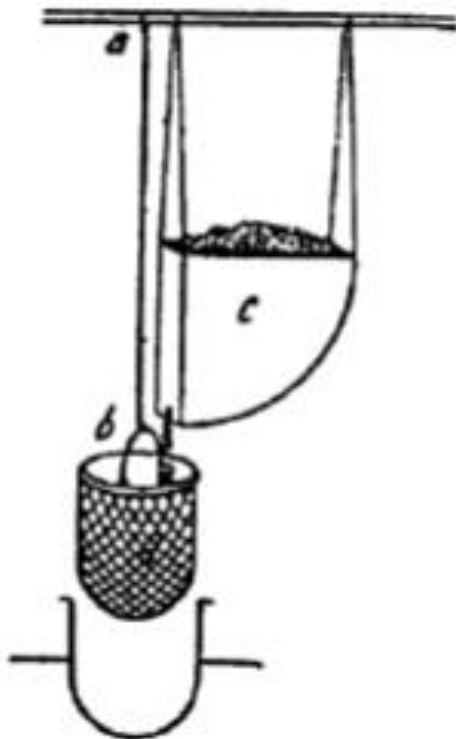


Transição Dúctil – Frágil X direção do cp e posicionamento do entalhe



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)

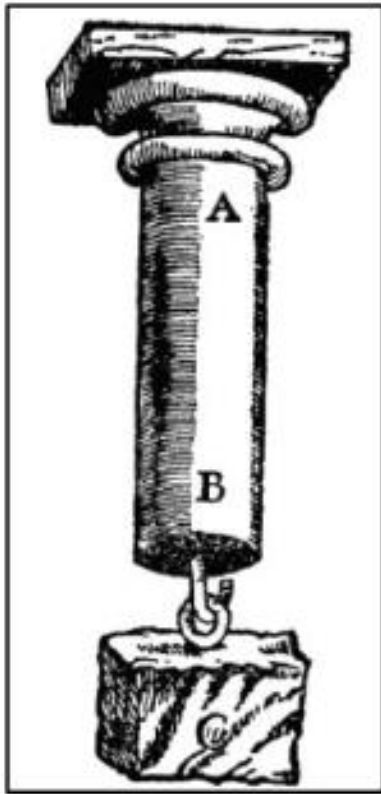


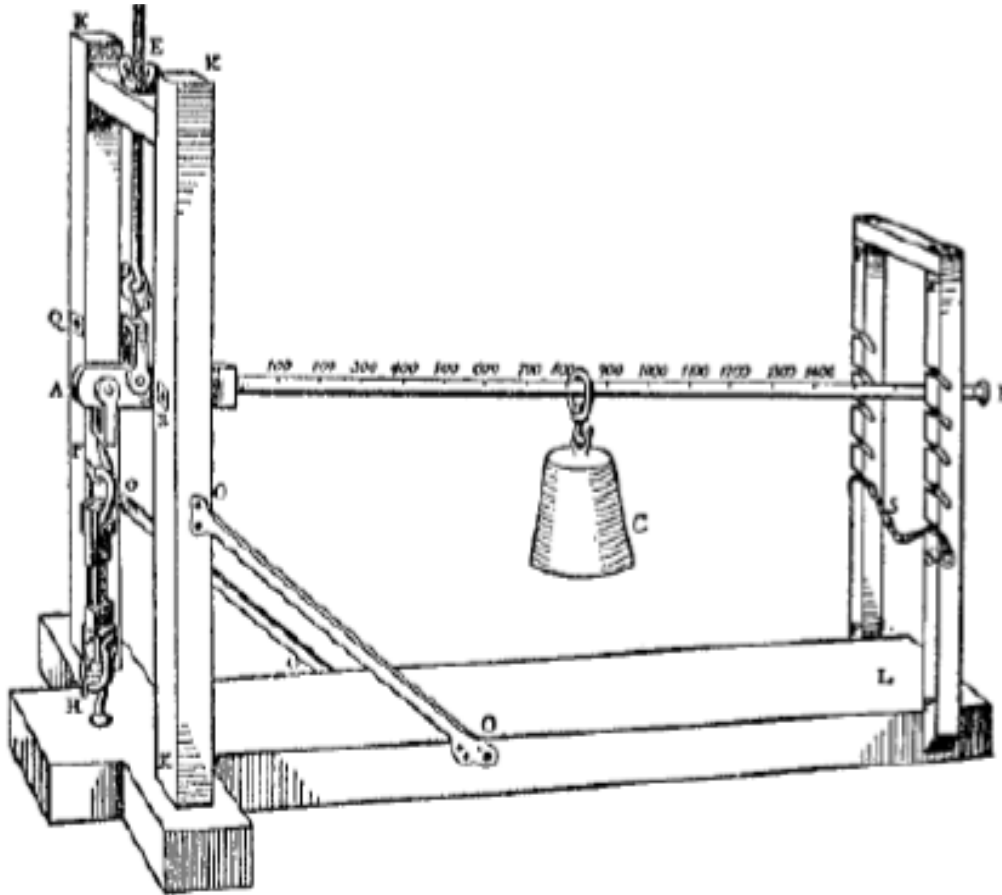
Ilustração de Galileu para o ensaio de tração.

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).

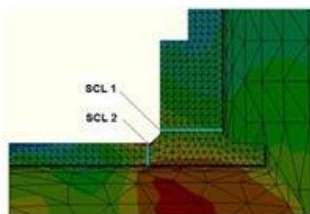
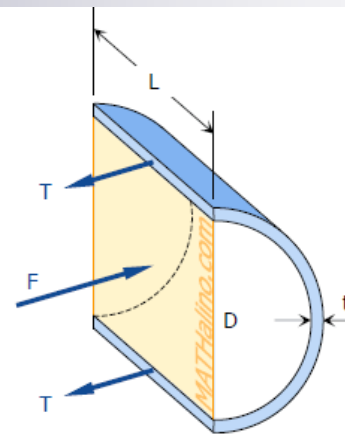
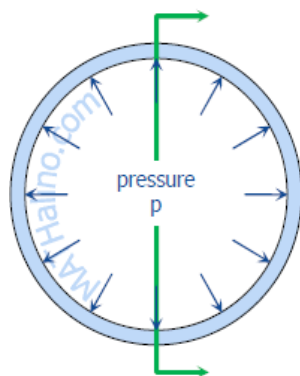
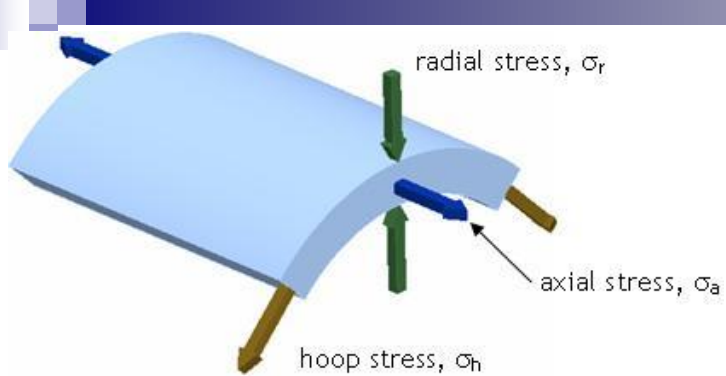
ENSAIO DE TRAÇÃO

P. Van Musschenbroek (1692-1761)

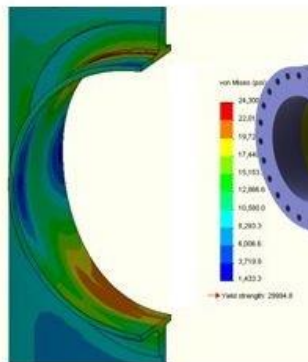
Máquina de tração de Musschenbroek.



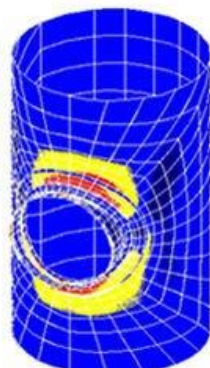
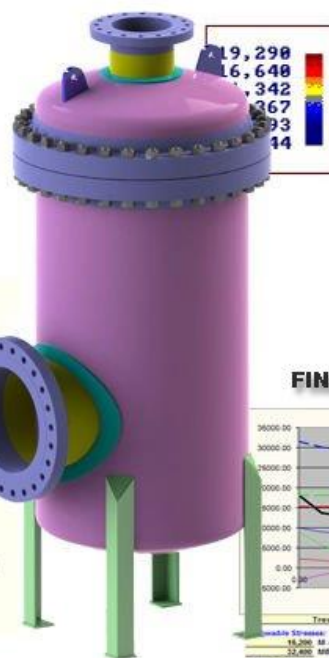
**“Physicae
Experimentales et
Geometricae”,
publicado em 1729**



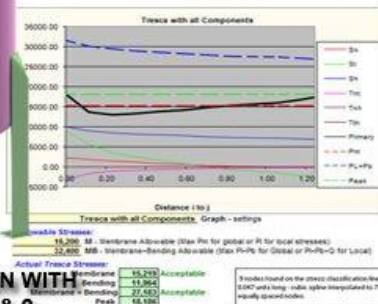
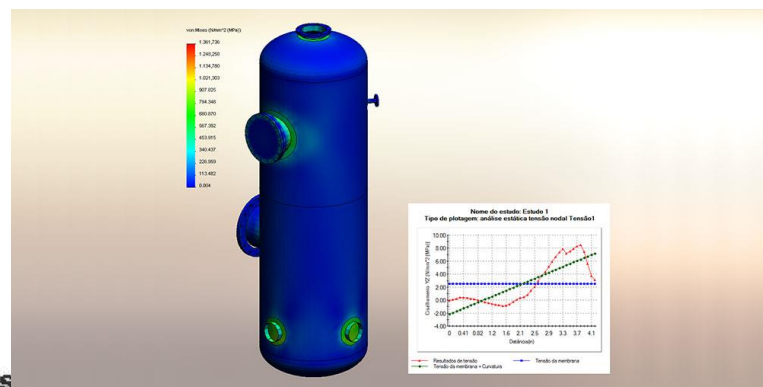
STRESS LINEARIZATION



STRESS RESULT



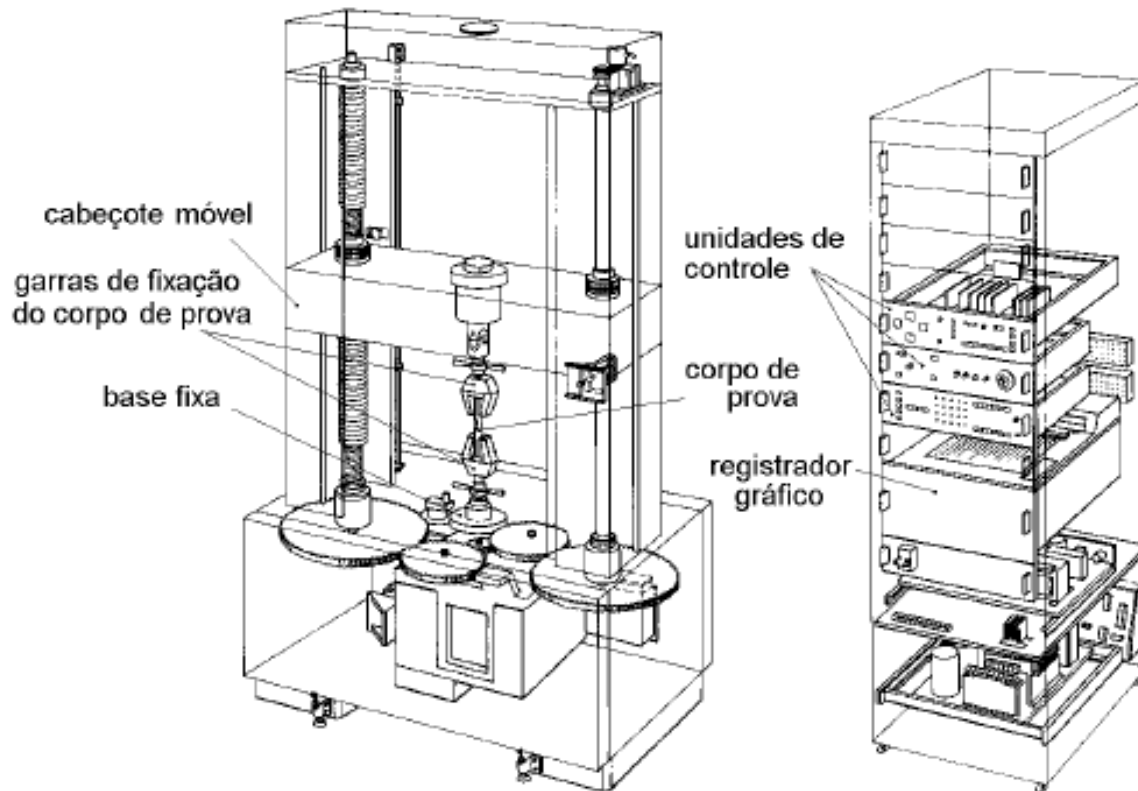
FINITE ELEMENT ANALYSIS



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

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.



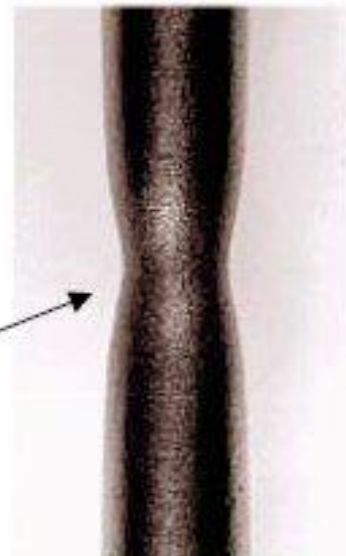
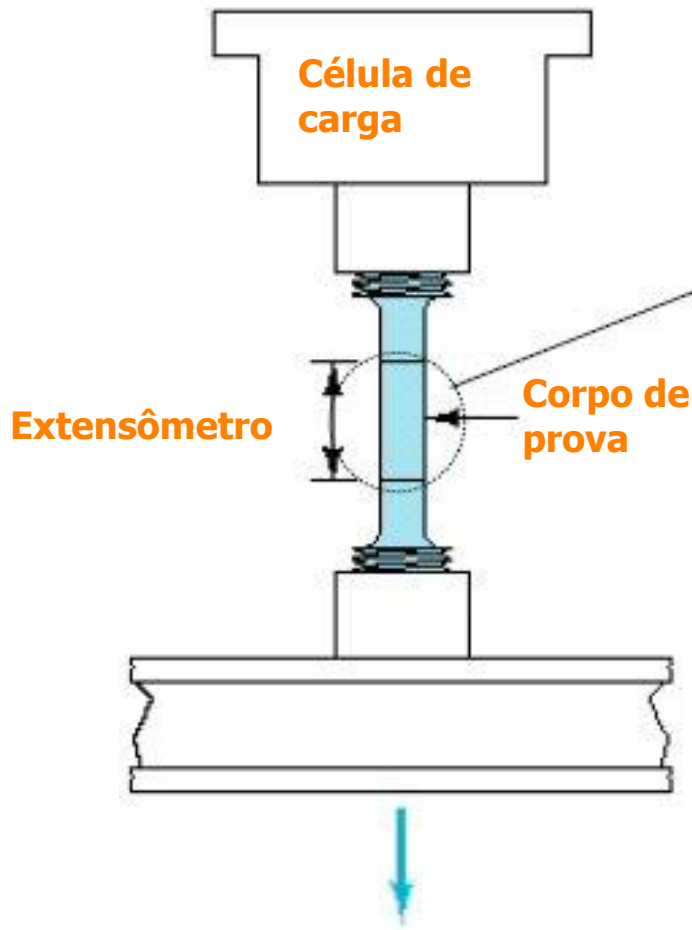
A máquina de tração

- 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.

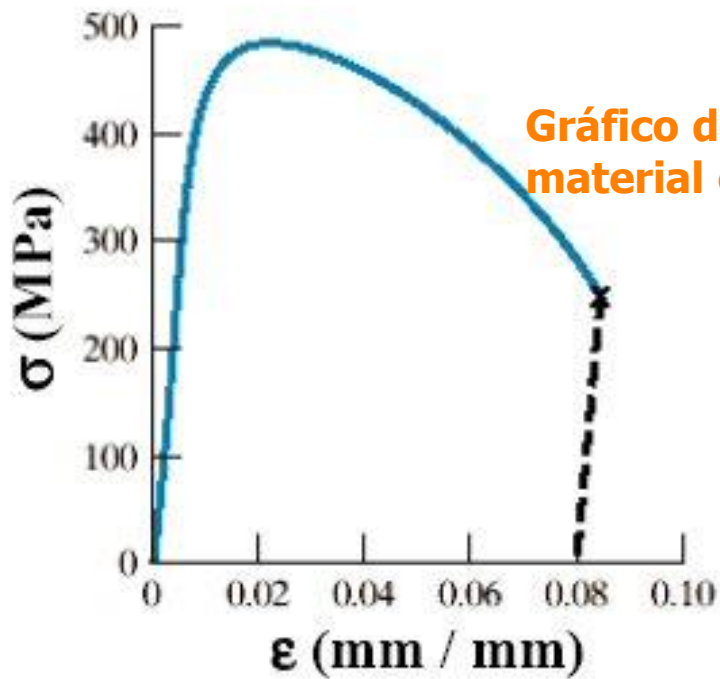
Máquina Universal de Ensaio de Tração.

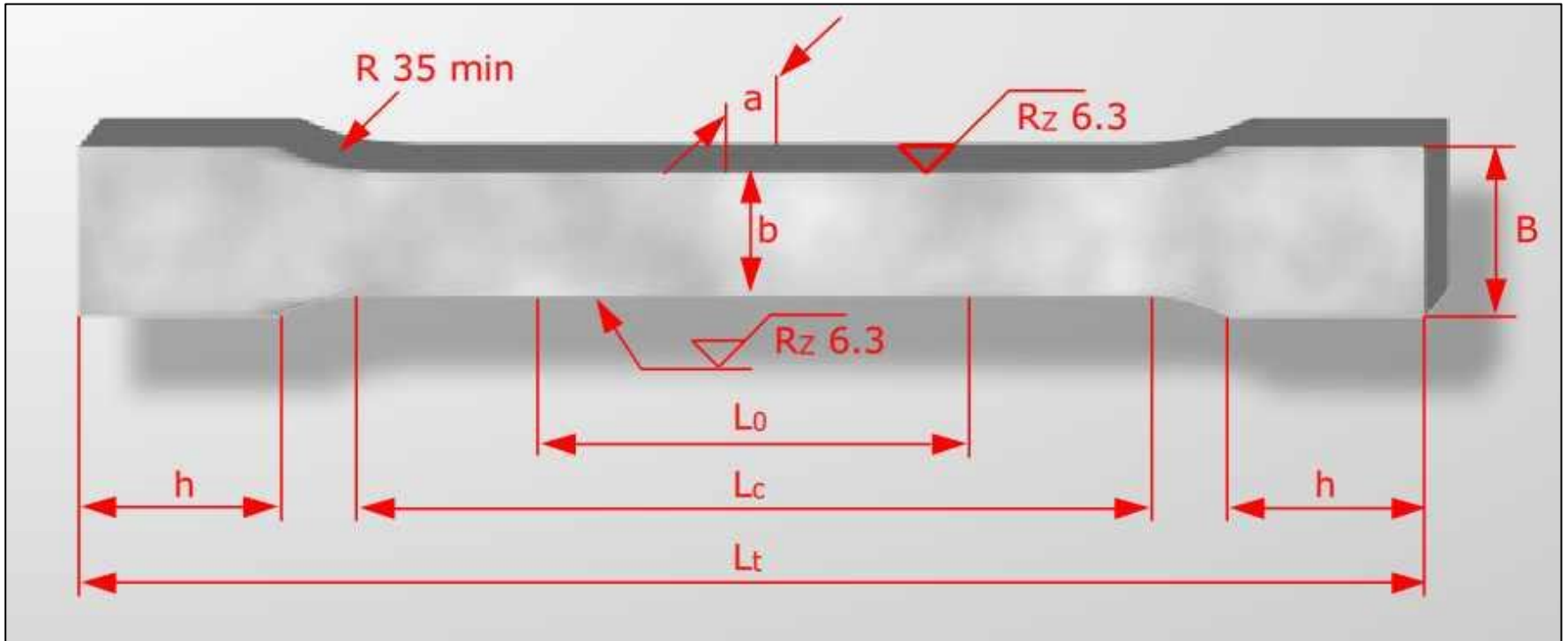
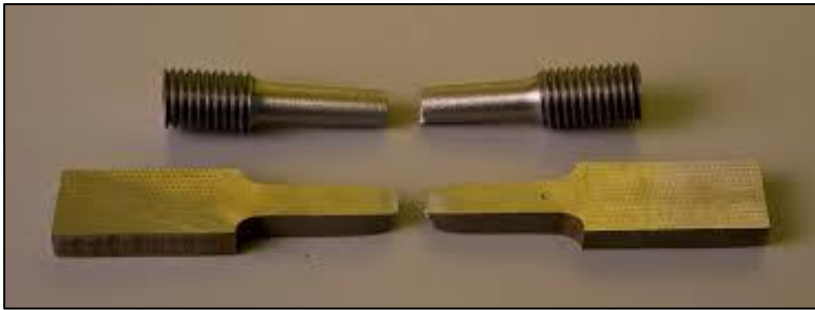


■ Teste de tração:

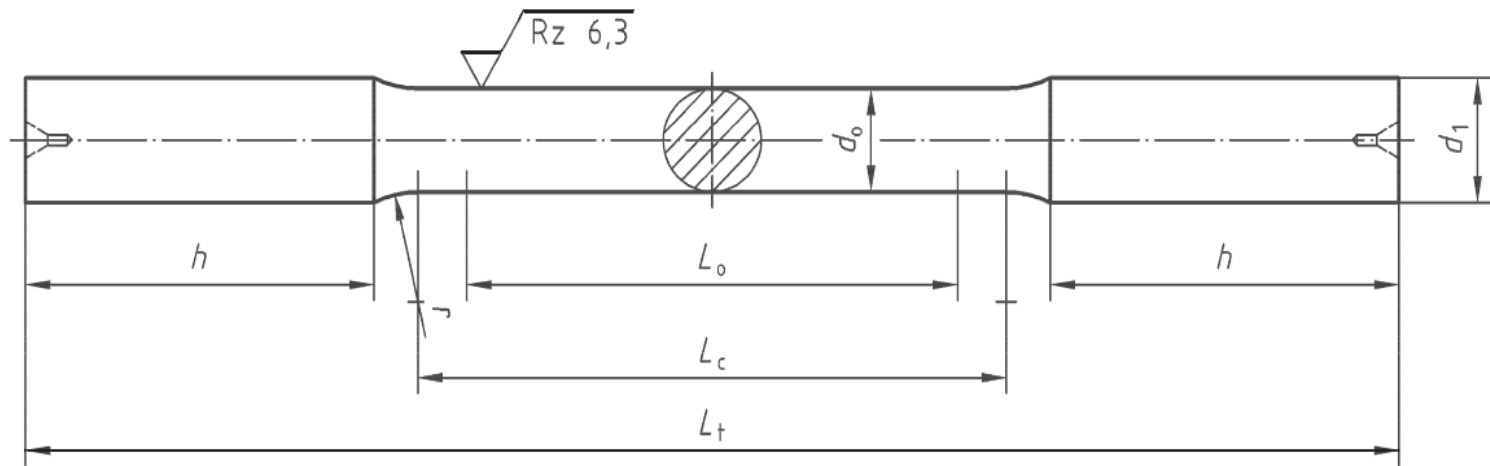


Detalhe do início da estricção do material





4.2 Type A test pieces



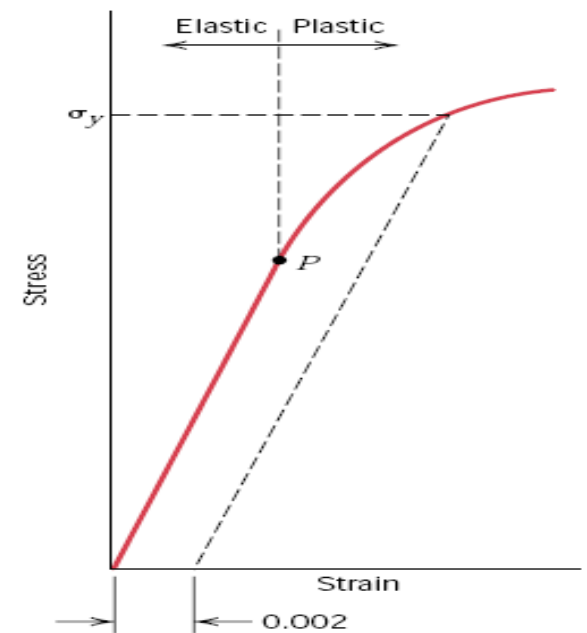
Key

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

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

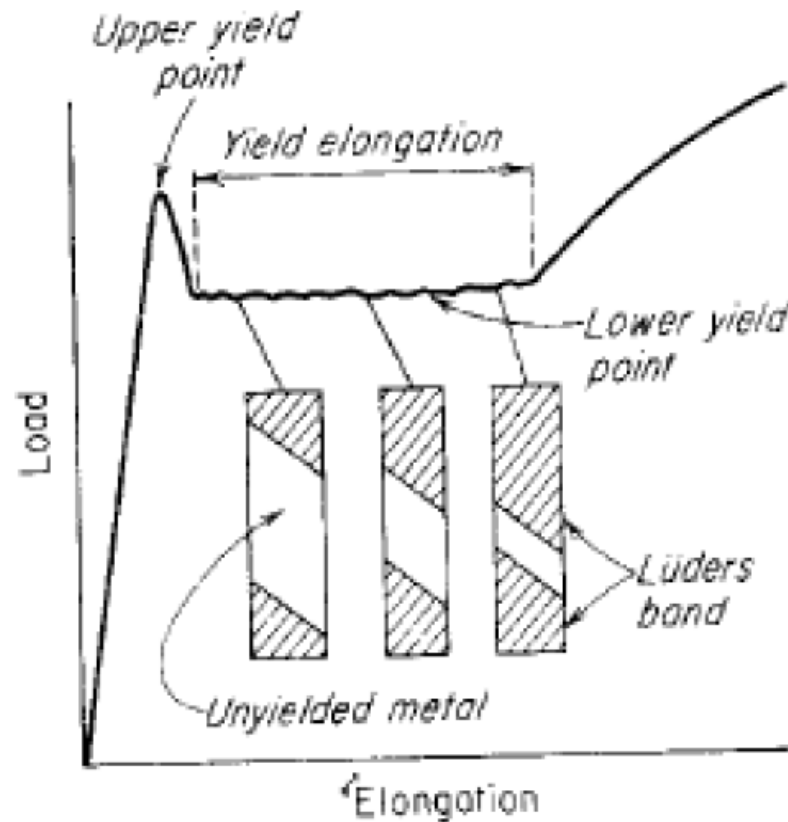
Cobre e suas ligas: $n = 0,5 \% (\epsilon = 0,005)$

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

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

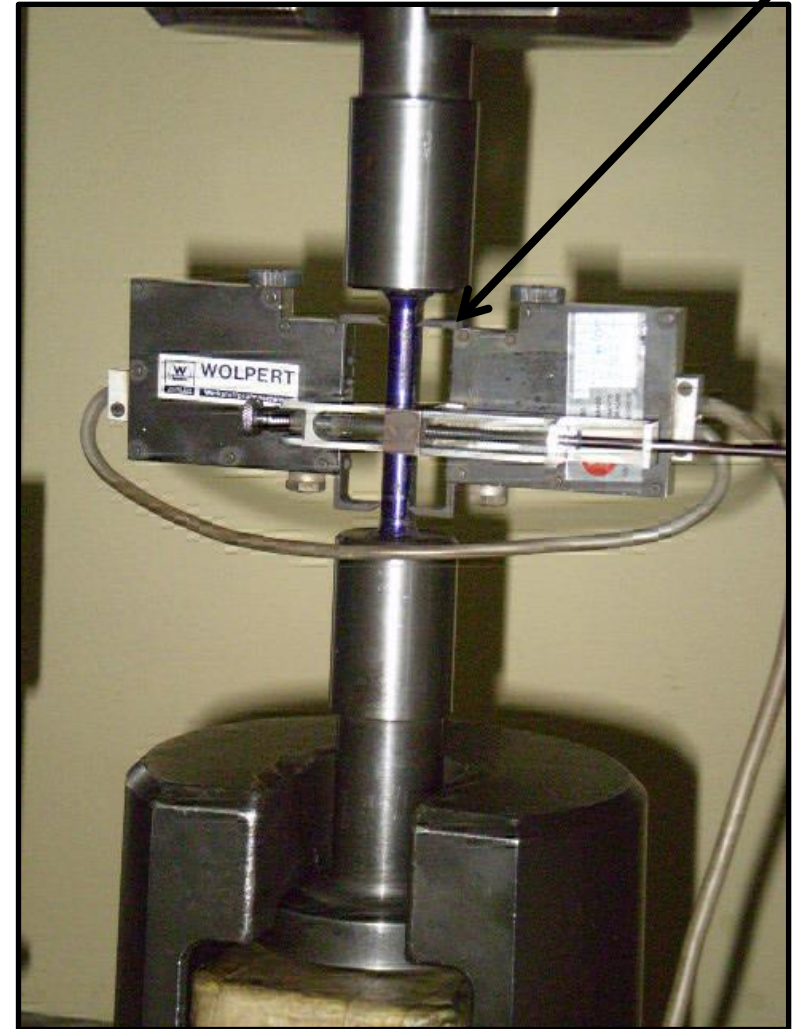
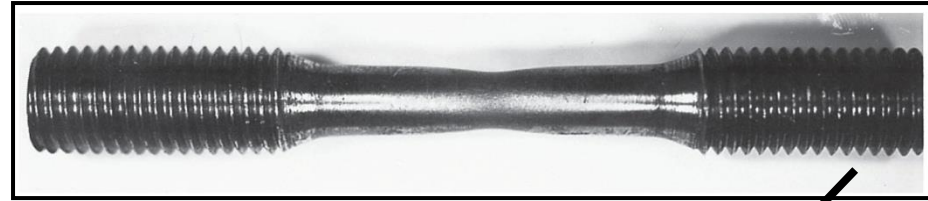
Polímeros: $n = 0,5 \% (\epsilon = 0,005)$

LIMITE DE ESCOAMENTO DESCONTÍNUO



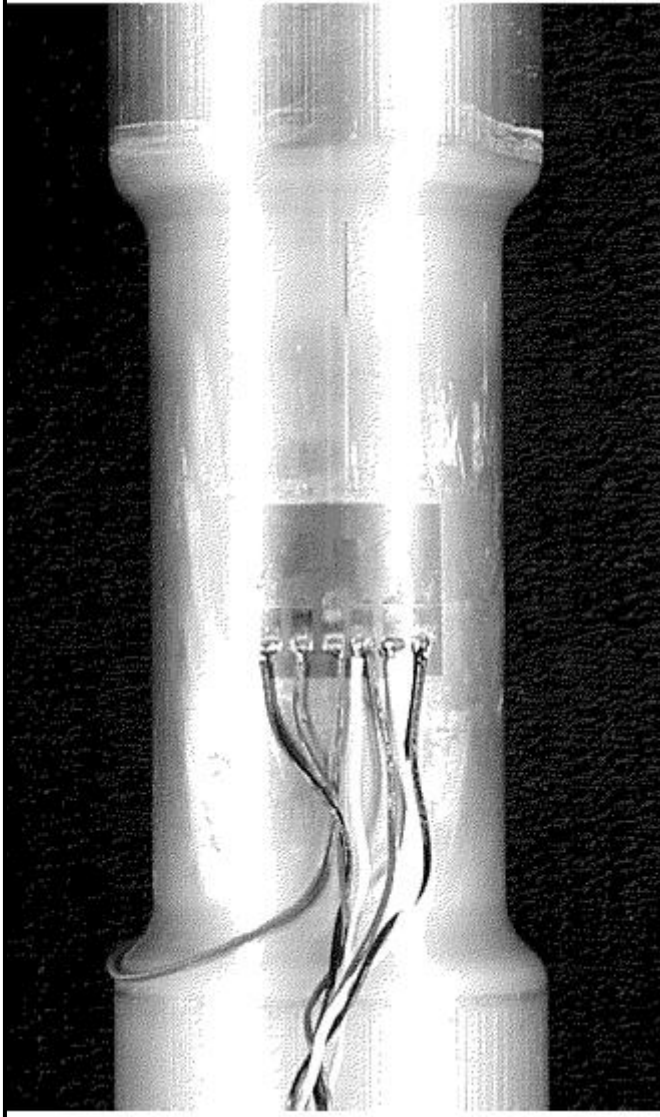
Limite de escoamento descontínuo e bandas de Lüder (**Mechanical Metallurgy – Dieter, G.E. -1986**).

ENSAIO DE TRAÇÃO



ENSAIO DE TRAÇÃO

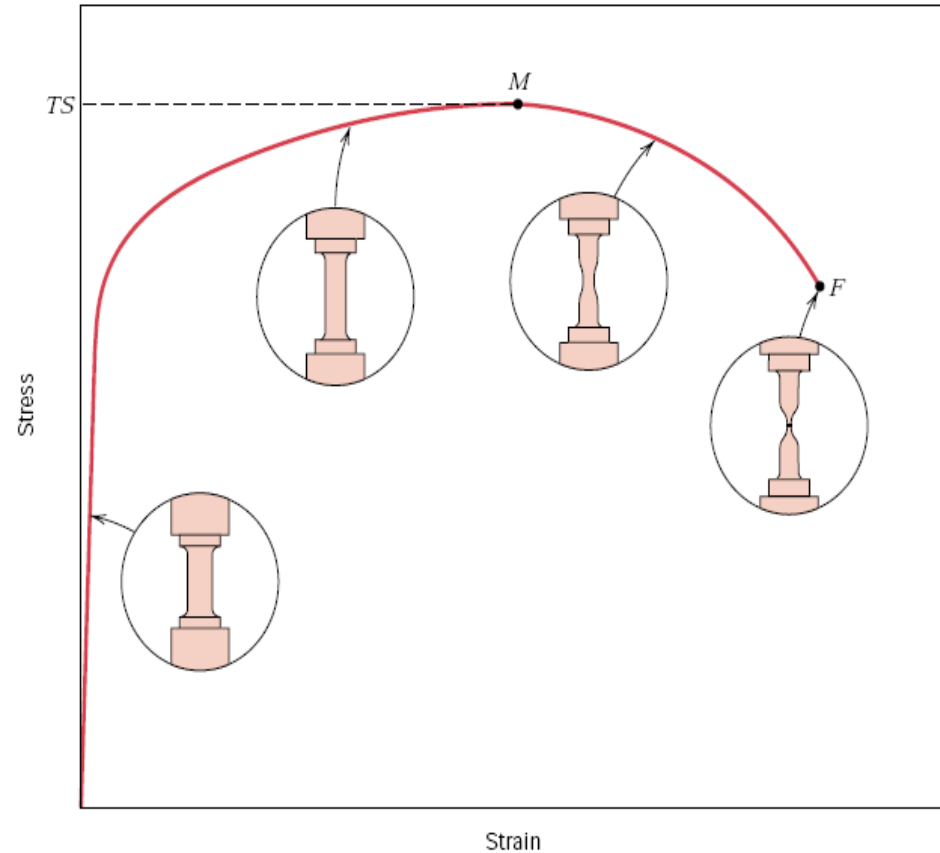
Extensômetro (“strain Gage”)



(ASM METALS HANDBOOK, VOL.8)

Limite de resistência à tração

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*).



Medidas de Ductilidade



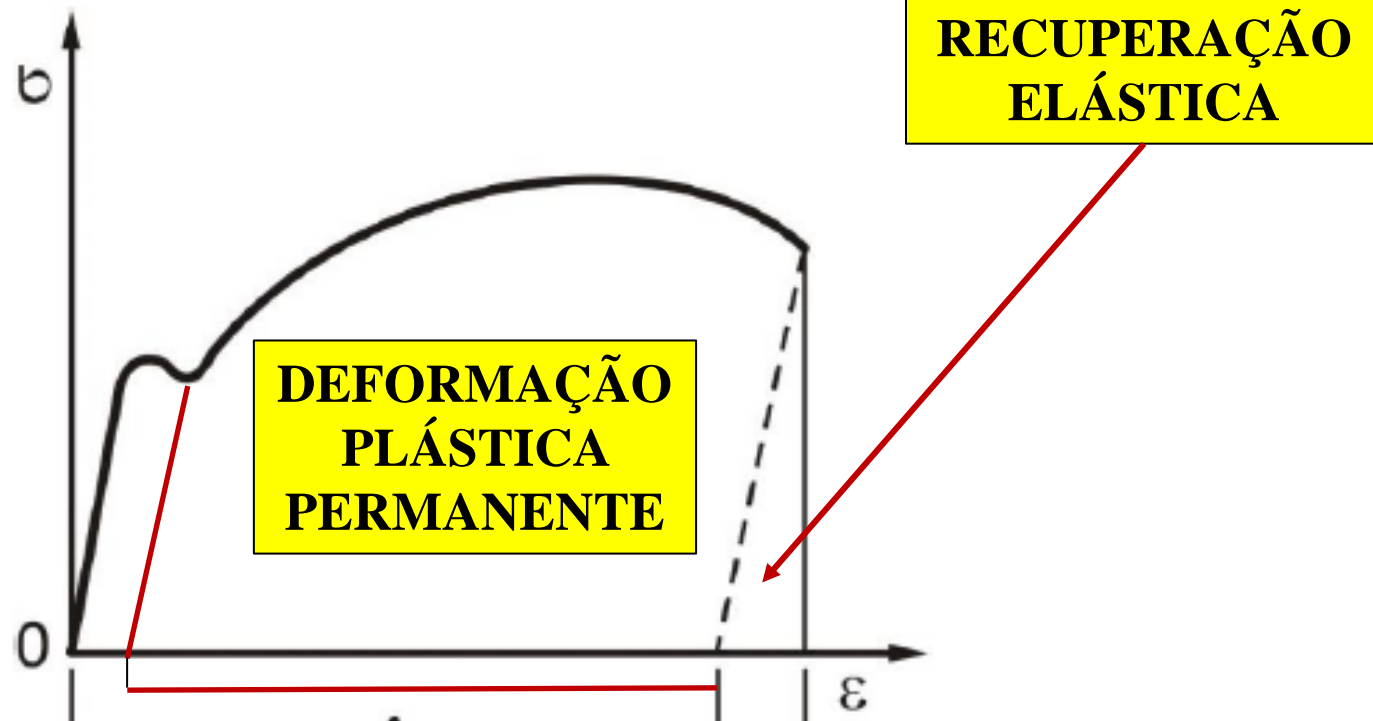
➤ **Alongamento percentual $\%AL = 100 \times (L_f - L_0)/L_0$**

- 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.

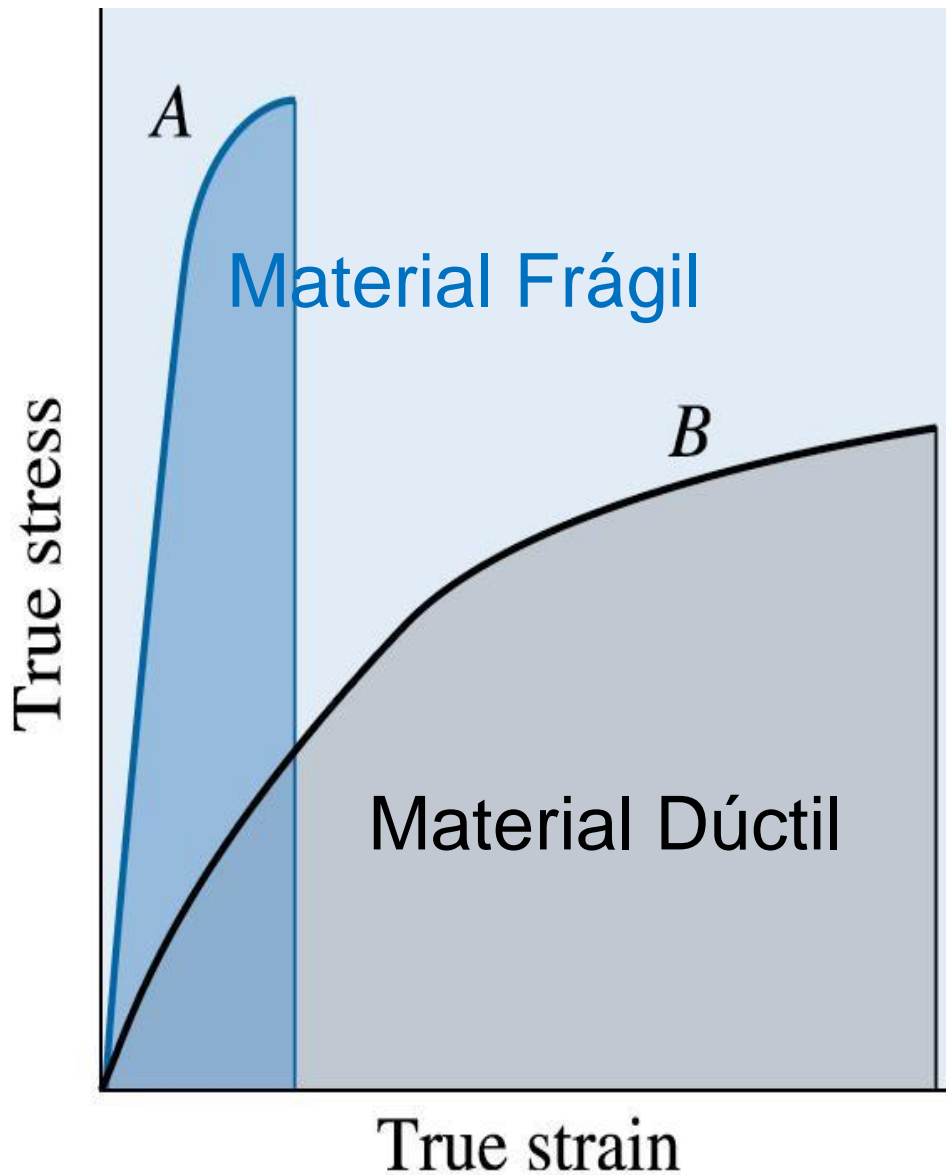
➤ **Redução de área percentual $\%RA = 100 \times (A_0 - A_f)/A_0$**

- onde A_0 e A_f se referem à área da seção reta original e na fratura.

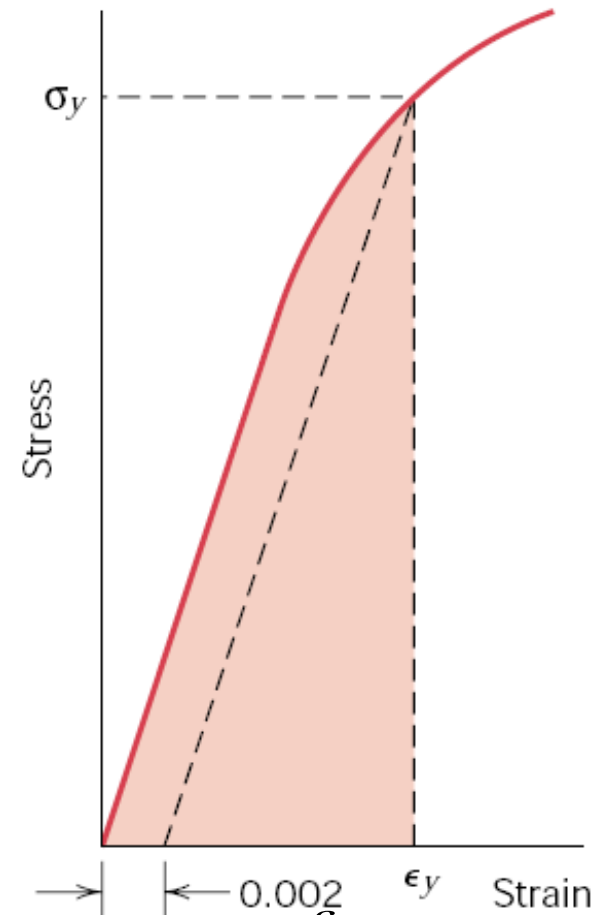
A paralela à parte elástica é utilizada para determinação da deformação plástica.



Tenacidade

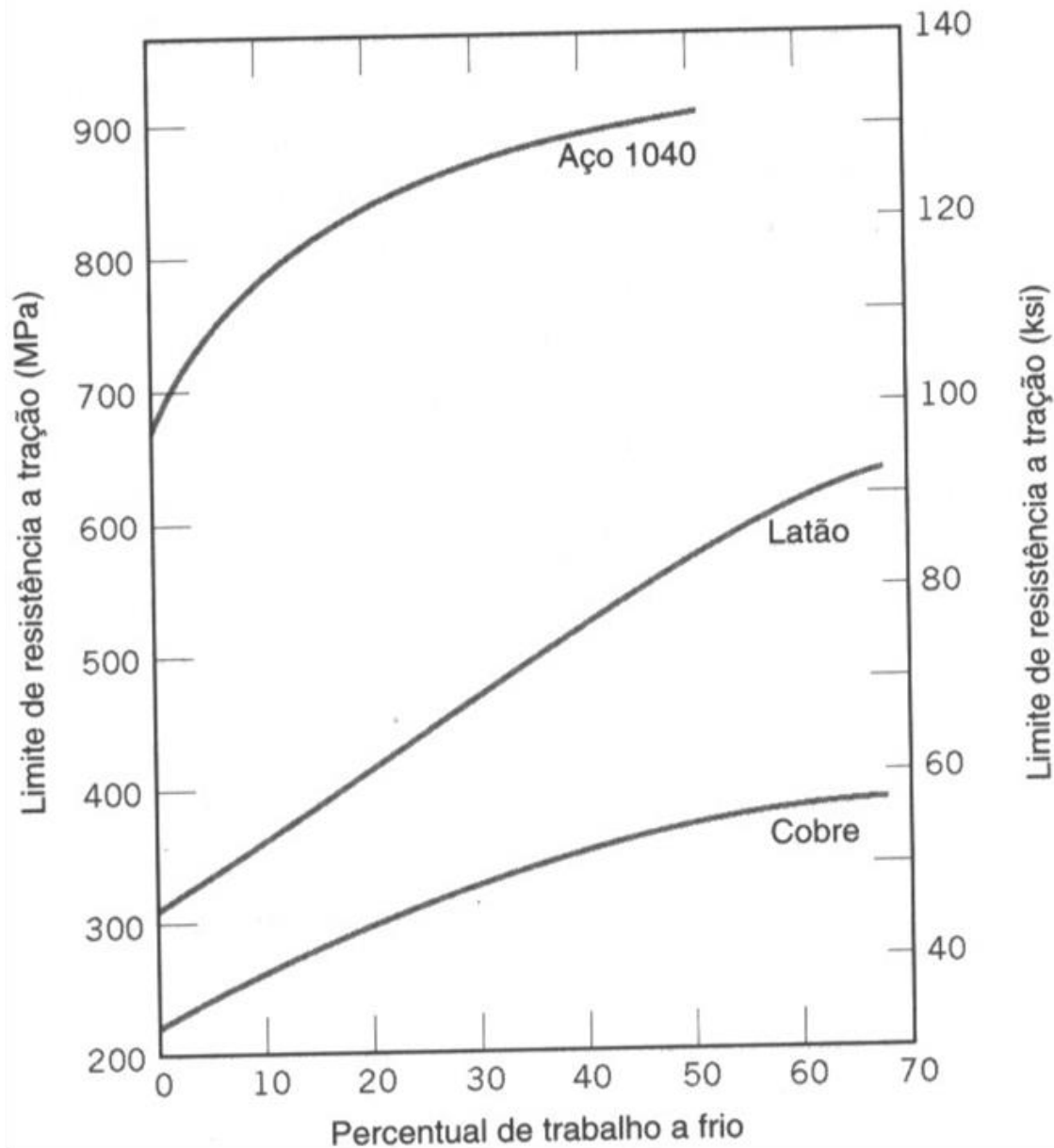


Resiliência

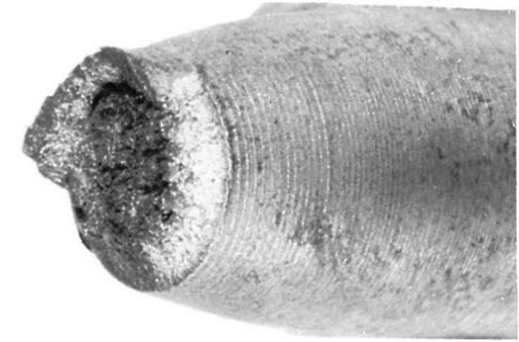


$$U_r = \int_0^{\epsilon_e} \sigma d\epsilon$$

Encruamento

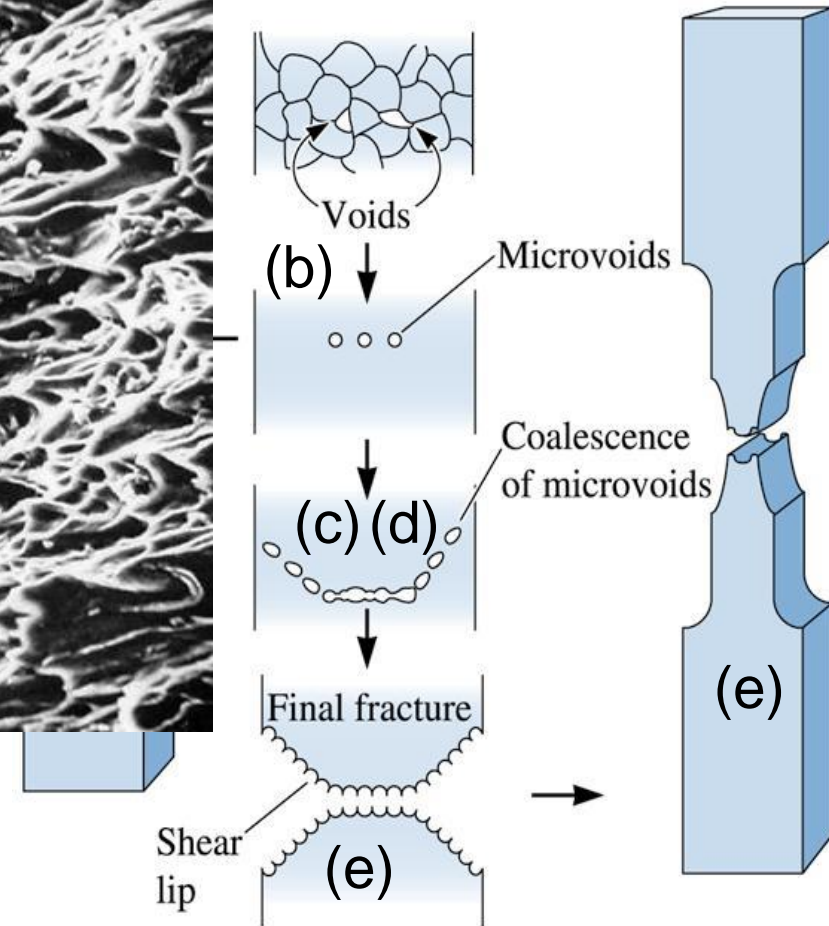
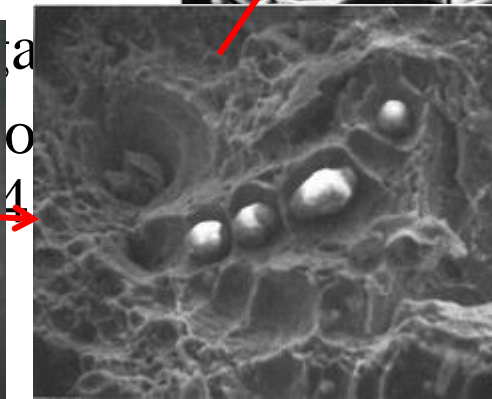
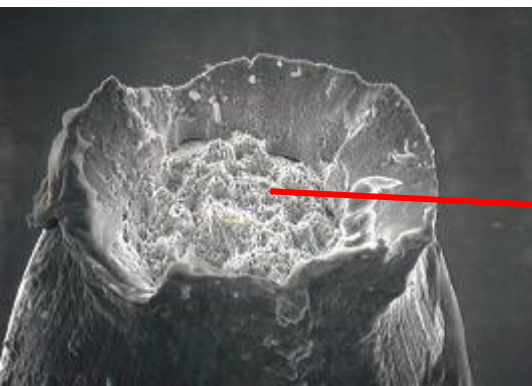
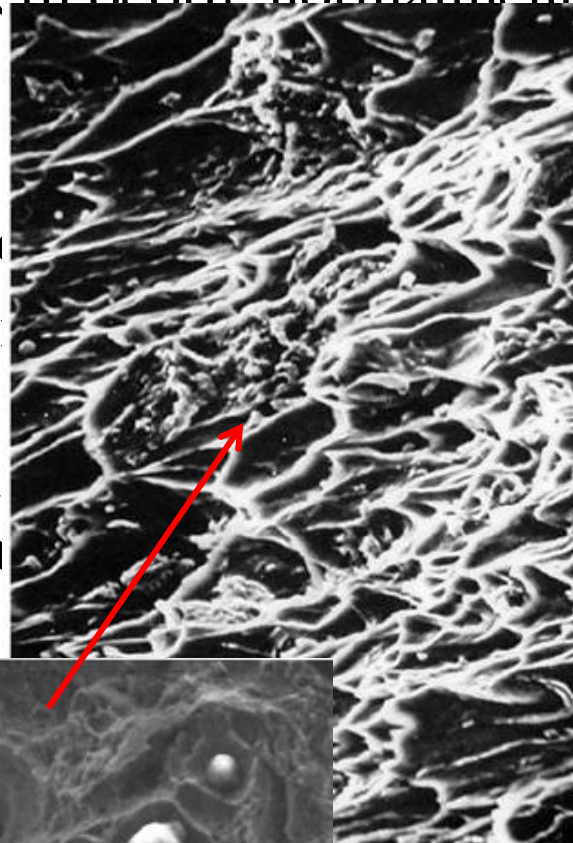


Fratura dúctil



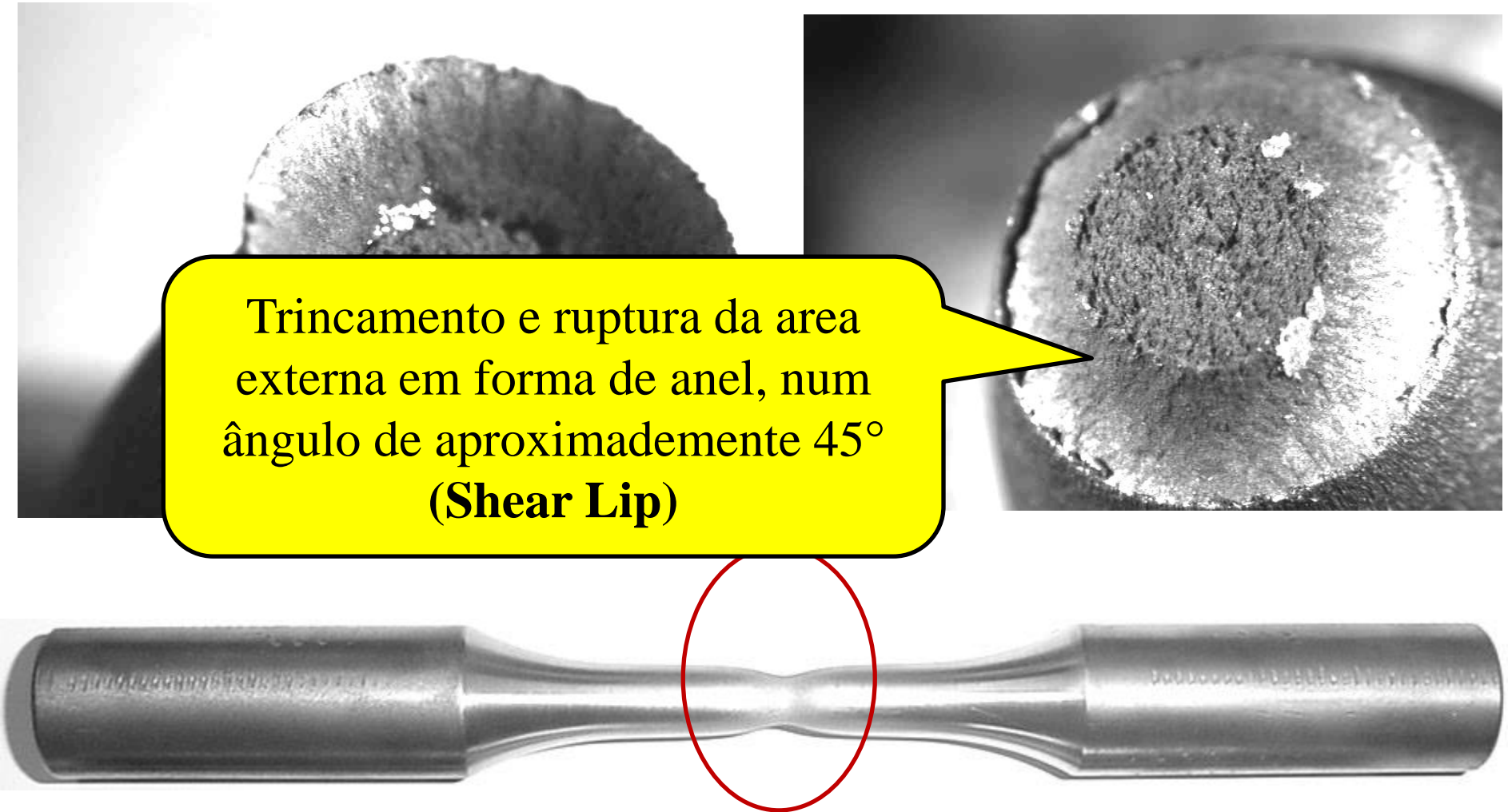
O processo de fratura dúctil ocorre normalmente em vários estágios

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



Fratura dúctil (Tipo Taça Cone)

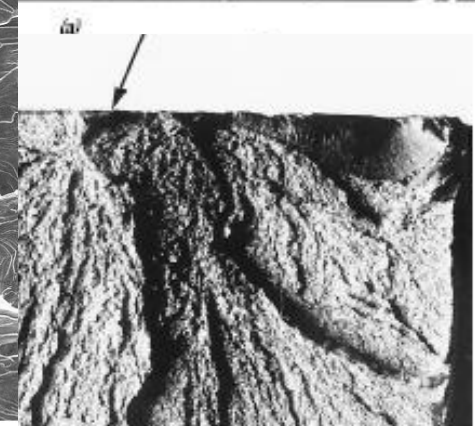
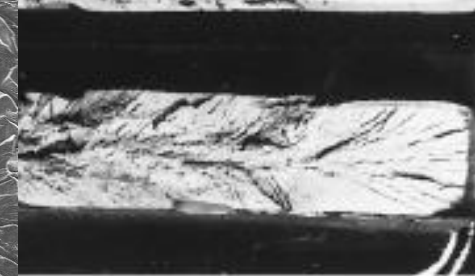
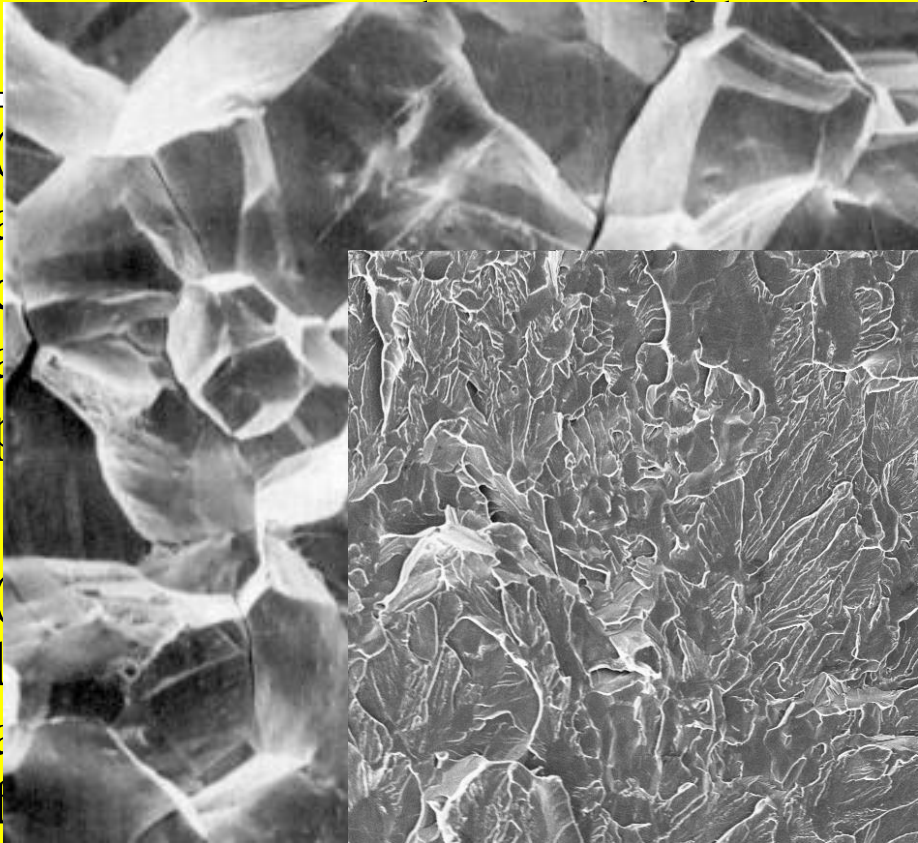
Trincamento e ruptura da area externa em forma de anel, num ângulo de aproximadamente 45°
(Shear Lip)



Fratura frágil

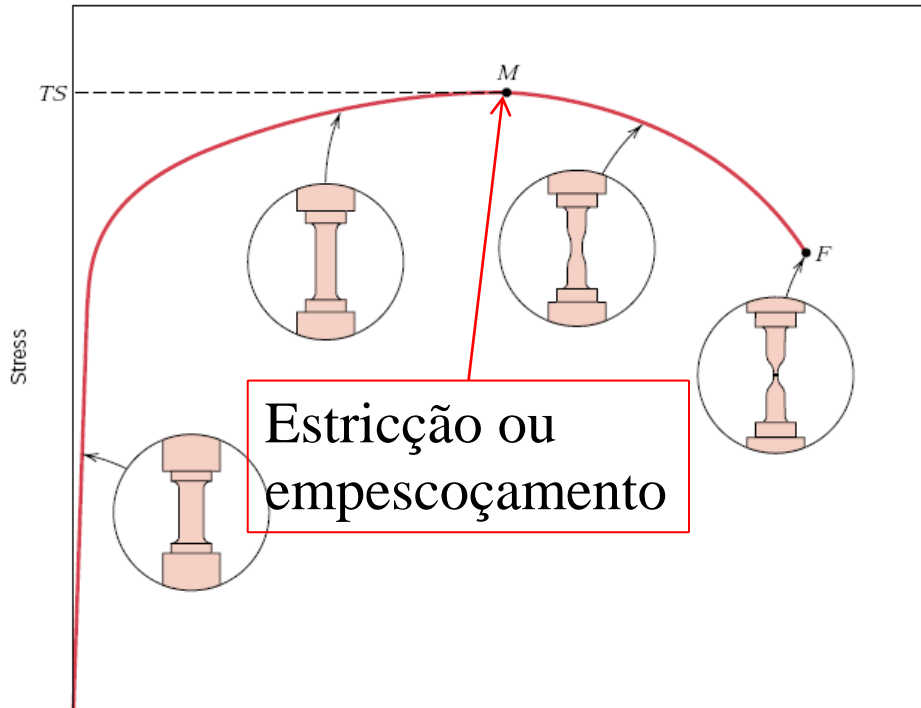


Fratura frágil ocorre sem qualquer deformação apreciável e através
gação de trincas

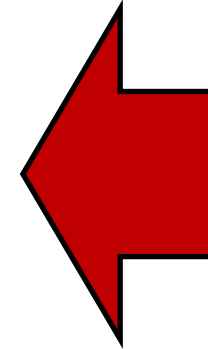


IQSC EHT=20.00 kV WD= 22 mm Mag= 500 X Detector= SE1
10µm H Photo No.=7 25-Apr-2006

Tensão Verdadeira e Deformação Verdadeira



CONVENCIONAL



Mas,

$\sigma = F/A$ e A reduz mais rápido que F , então



Tensão Verdadeira e Deformação Verdadeira

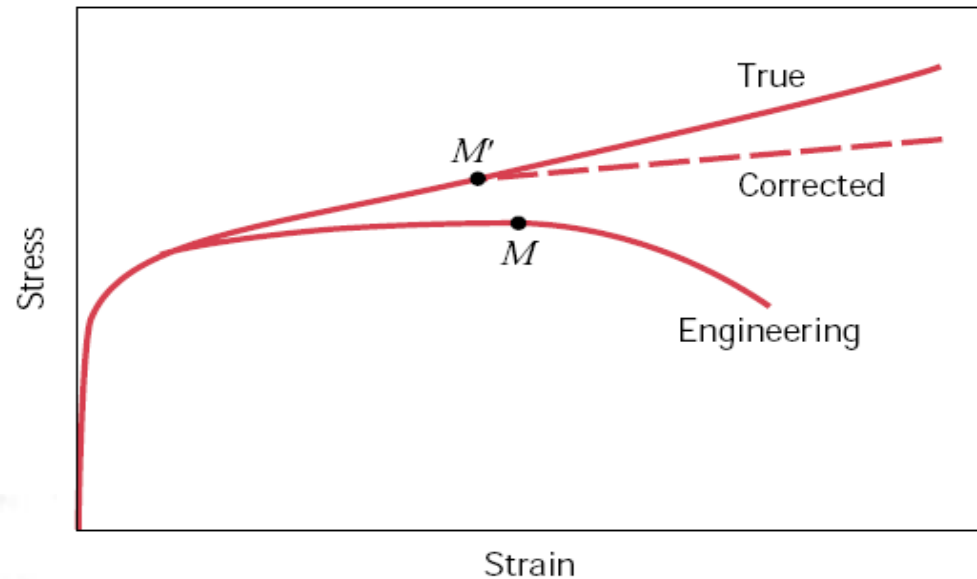
A **Tensão Verdadeira** é definida como sendo a carga **P** dividido sobre a **área instantânea** (A_i), ou seja, área do pescoço após o limite de resistência à tração

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

A **Deformação Verdadeira** é definida pela expressão

$$d\varepsilon_r = \frac{dl}{l}$$

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



Relações entre Tensões e Deformações Reais e Convencionais

■ Deformação

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

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

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

■ Tensão

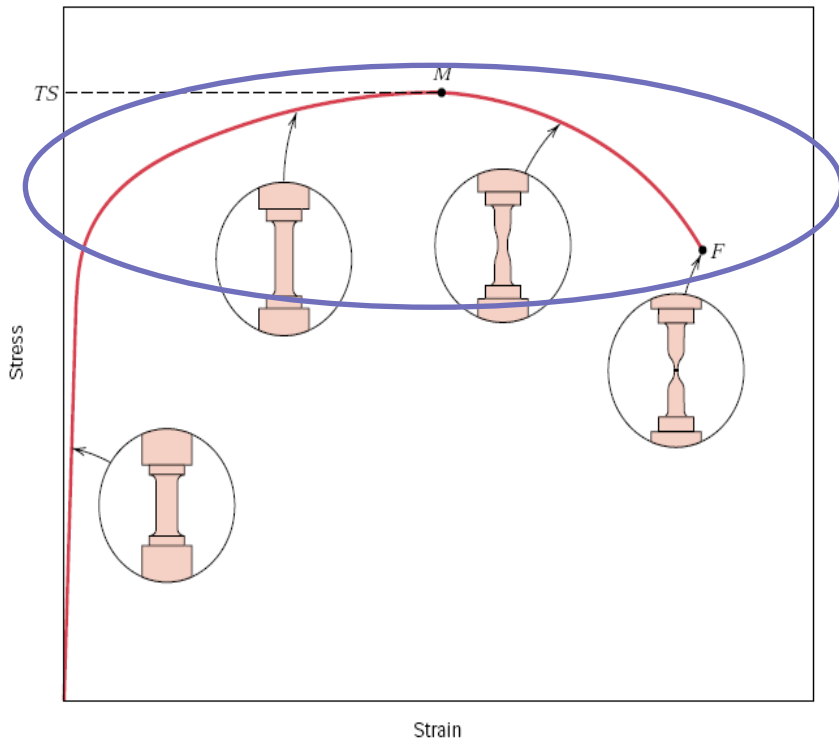
$$\ln \frac{S_0}{S} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon_C)$$

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

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

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

TENSÃO PARA A REGIÃO DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA



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

K e n são constantes que dependem do tipo de **material e 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)

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**

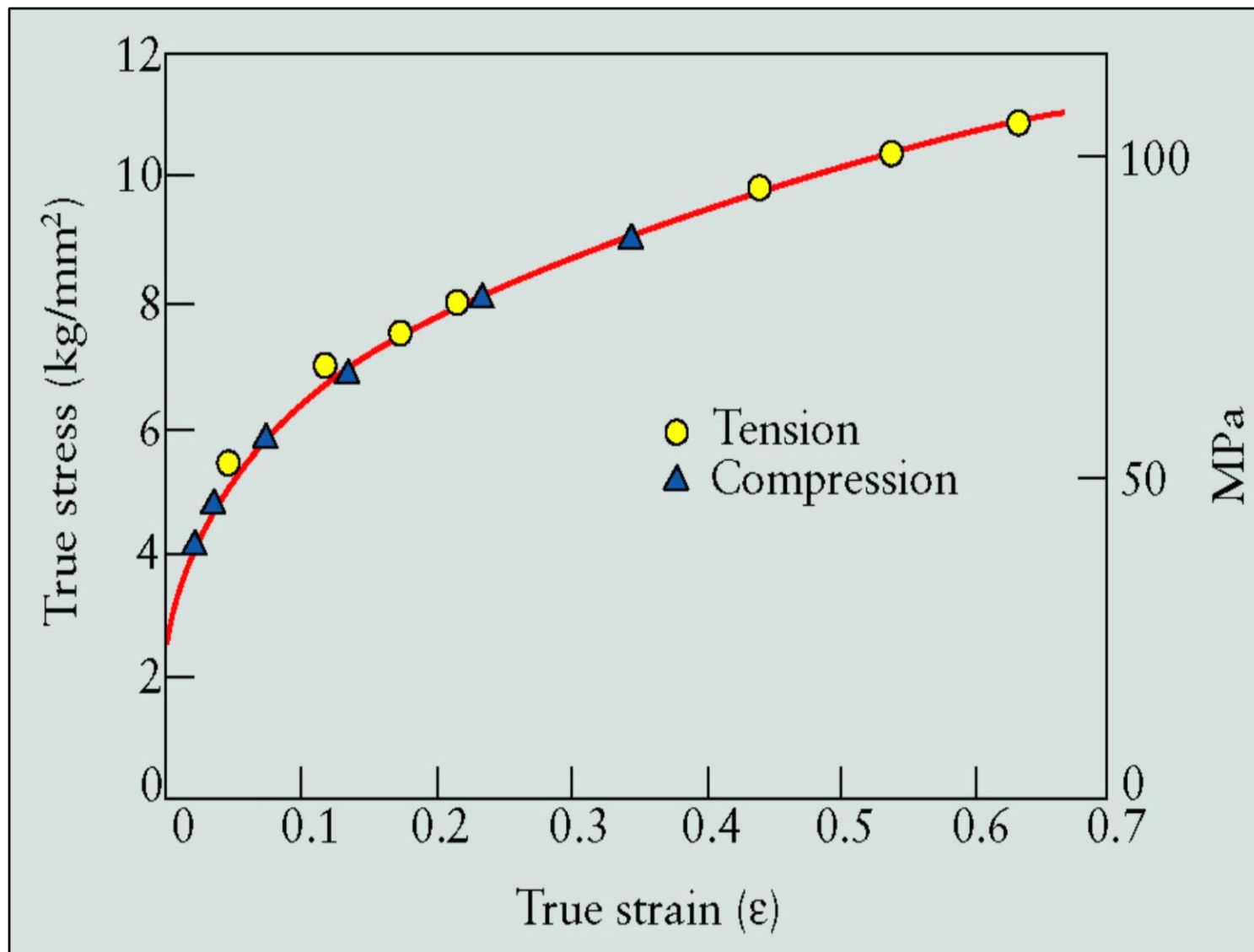
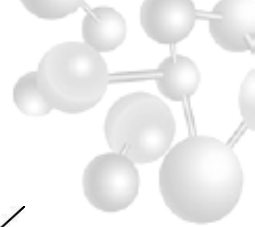
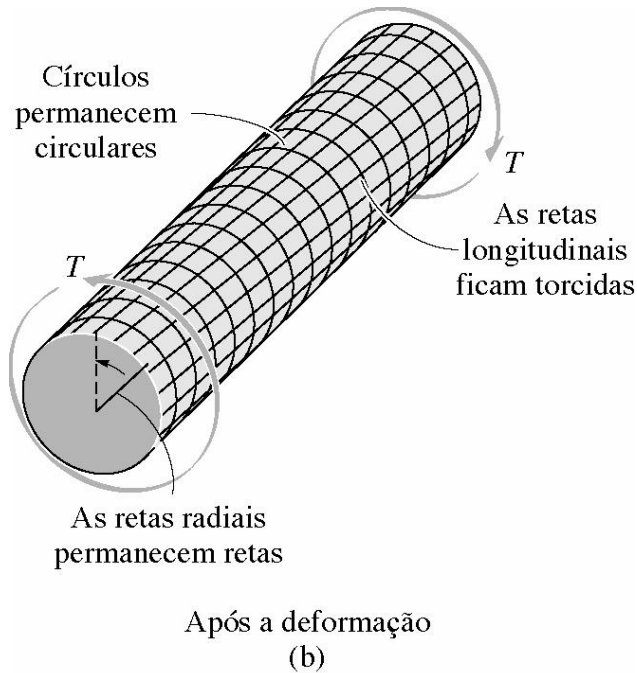
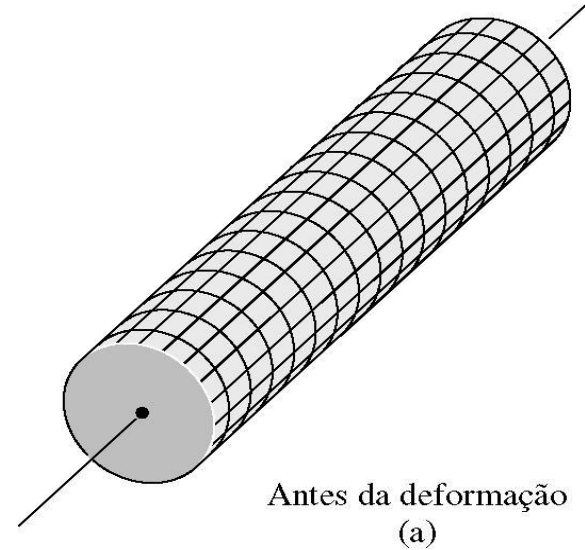
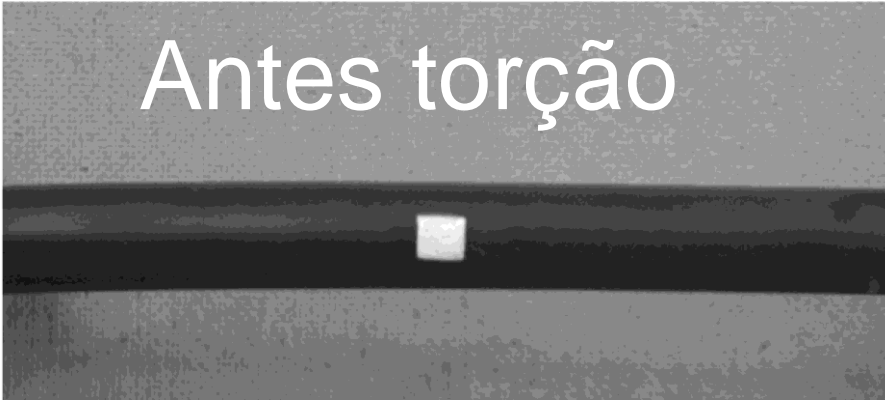


FIGURA 4 Curva tensão – deformação verdadeira em tração e compressão para o Al.

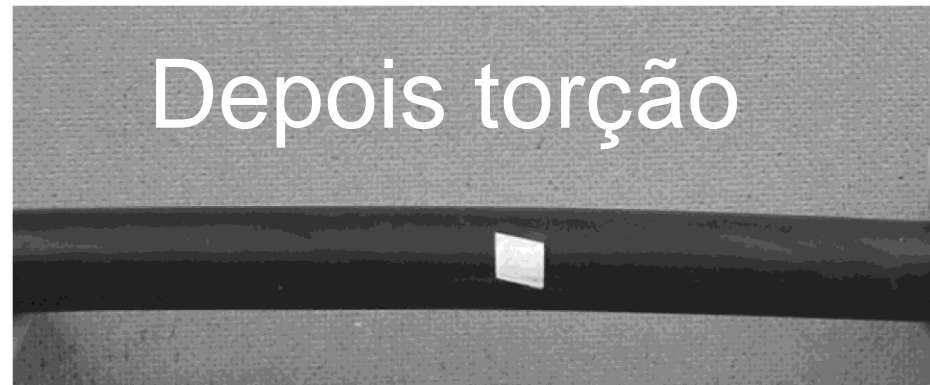
Torção



Antes torção

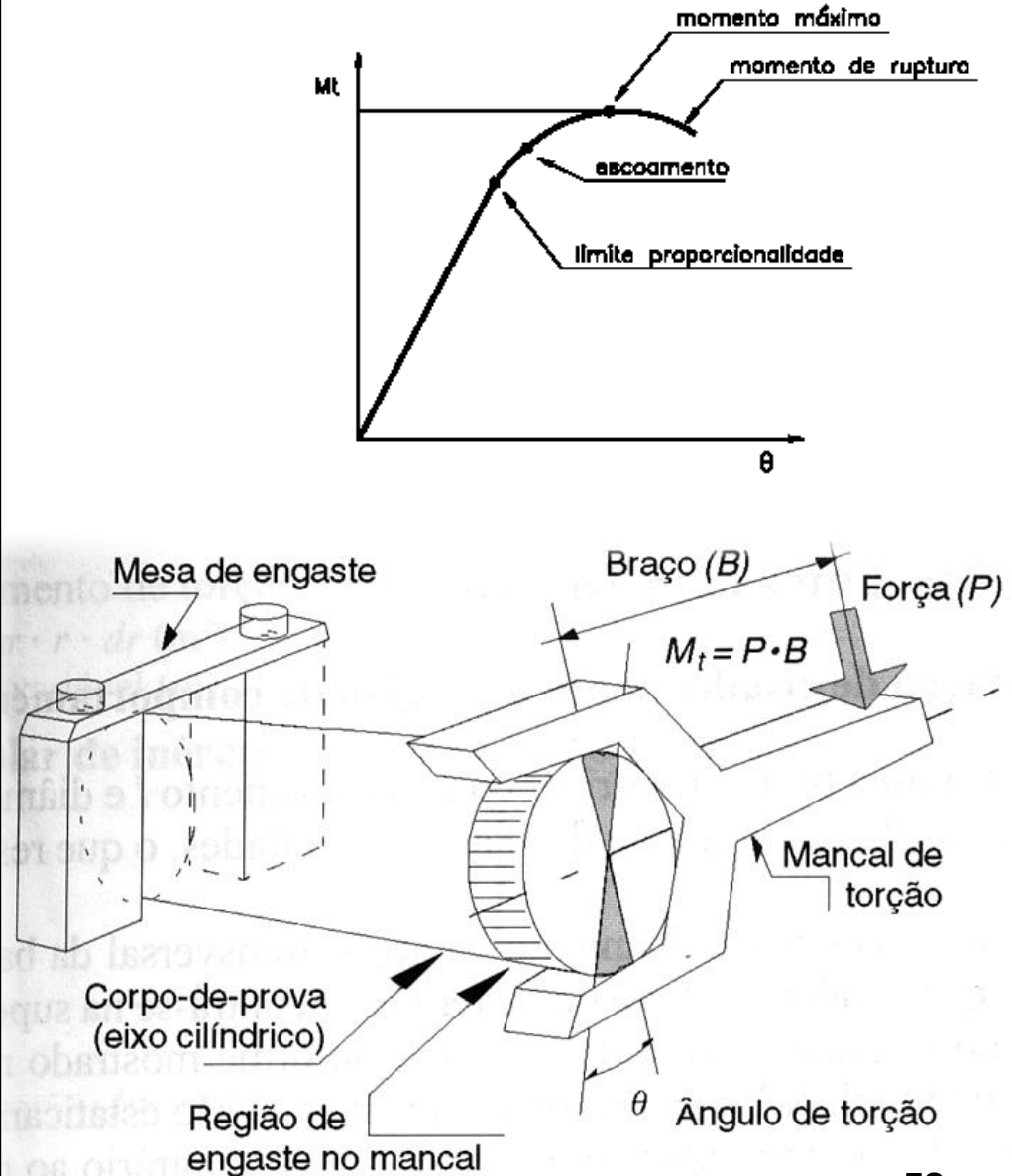


Depois torção



Ensaio de Torção

- O Ensaio de torção consiste na aplicação de carga rotativa em um corpo de prova geralmente de geometria cilíndrica;
- Mede-se o ângulo de torção como função do momento torsor aplicado;
- Muito utilizado na indústria de componentes mecânicos como motores de arranque, turbinas aeronáuticas, rotores de máquinas pesadas, barras de torção, molas etc...



Ensaio de Torção



As propriedades principais obtidas no ensaio de torção são:

- Limite de escoamento à torção

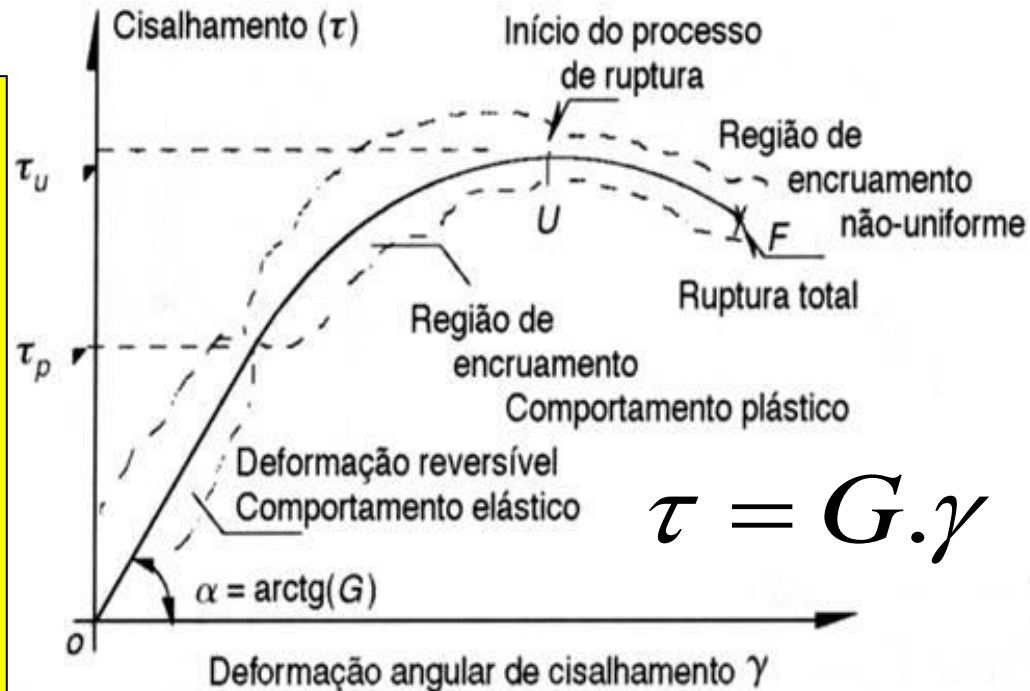
$$\tau_e$$

- Módulo de ruptura à torção

$$\tau_u$$

- Módulo de elasticidade transversal ou de cisalhamento

$$G$$

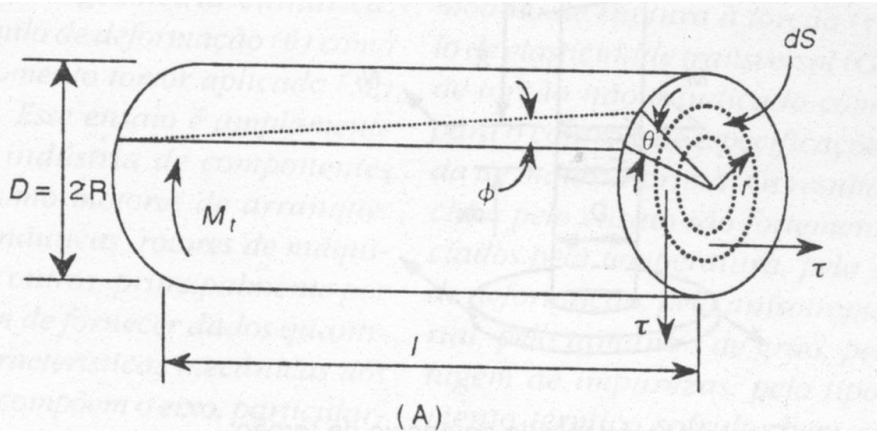


$$\tau = G \cdot \gamma$$

G = módulo de cisalhamento (ensaios de torção)

t = Tensão de cisalhamento

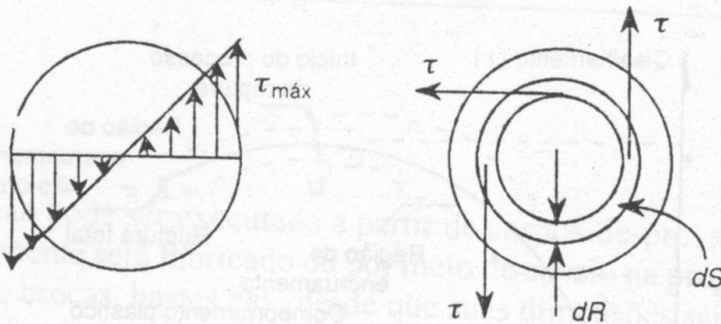
g = Deformação de cisalhamento



$$M_T = \int_{r=0}^{r=a} \tau r dA = \frac{\tau}{r} \int_0^a r^2 dA$$

Momento polar de inércia, J

$$M_T = \frac{\tau J}{r} \quad \Rightarrow \quad \tau = \frac{M_T r}{J}$$



t = tensão de cisalhamento, MPa

M_T = momento torsor, N.m

r = dist. radial medida do centro da barra, m

J = momento polar de inércia, m⁴

Como a tensão máxima de cisalhamento se verifica na superfície e o momento polar de inércia de uma seção circular e:

$$J = \frac{\pi}{32} \cdot D^4$$

Tem-se

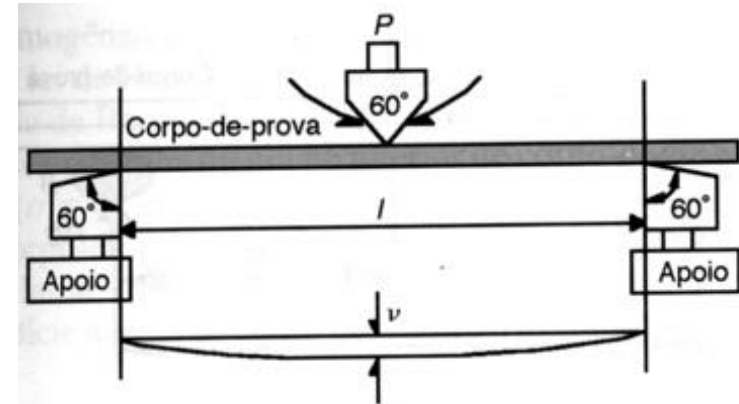
$$\tau_{\max} = \frac{16 M_T}{\pi D^3}$$

Para um corpo tubular tem-se:

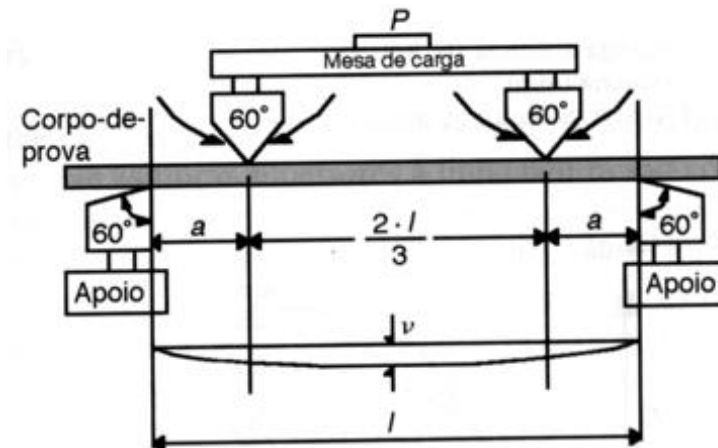
$$\tau_{\max} = \frac{16 M_{T \max} D_1}{\pi (D_1^4 - D_2^4)}$$

Ensaio de Flexão

- O Ensaio de flexão consiste na **aplicação de uma carga crescente** em determinados pontos de uma barra
- Mede-se o **valor da carga versus a deformação máxima**
- Existem dois tipos principais de Ensaio de Ensaio de flexão: **Ensaio de flexão em três pontos** e **Ensaio de flexão em quatro pontos**



(A) Ensaio de flexão em três pontos



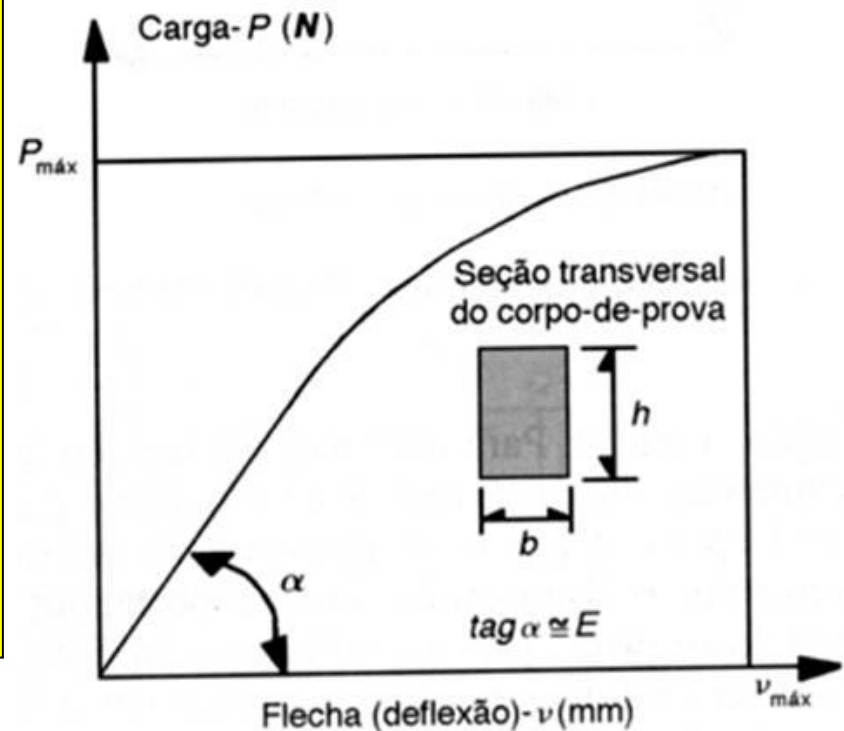
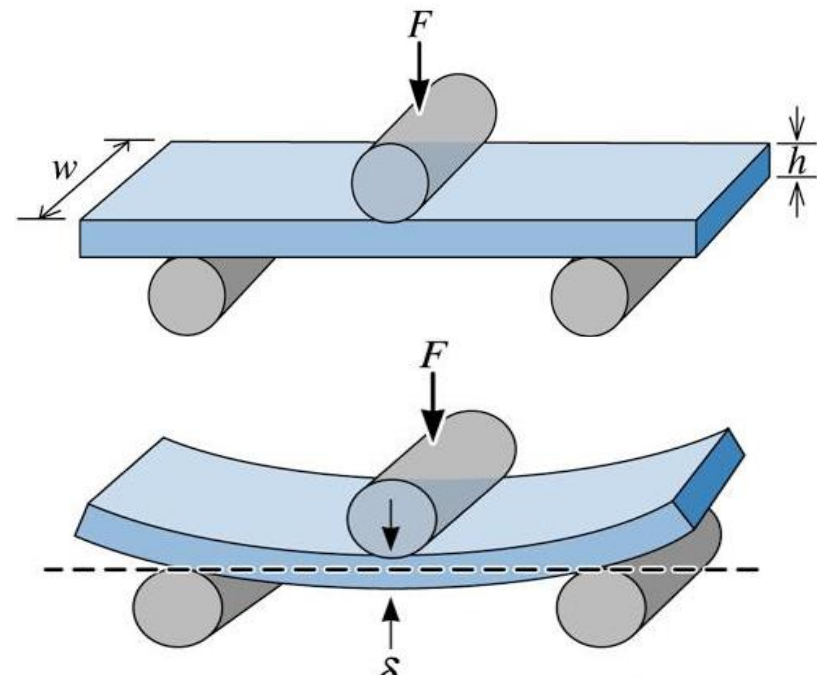
(B) Ensaio de flexão em quatro pontos



- Aplicação para **materiais frágeis ou de elevada dureza: FoFo, aços ferramentas, aços rápidos, e cerâmicas estruturais**, pois estes materiais, devido a baixa ductilidade não permitem ou dificultam a utilização de outros tipos de ensaios mecânicos.
- **Não são utilizados em materiais dúteis**, mas existem duas variantes que são os **ensaios de dobramento e de tenacidade à fratura, CTOD**.

As principais propriedades obtidas em um Ensaio de Flexão são:

- Módulo de ruptura na flexão
 - Módulo de elasticidade
 - Módulo de resiliência
 - Módulo de tenacidade
- É um ensaio muito utilizado em cerâmicas, polímeros e metais duros, pois fornece dados de deformação quando sujeitos a cargas de flexão





Ensaio de Flexão:

Algumas Normas da ASTM:

Metais: E 812, E 855

Concreto: C 78, C 293

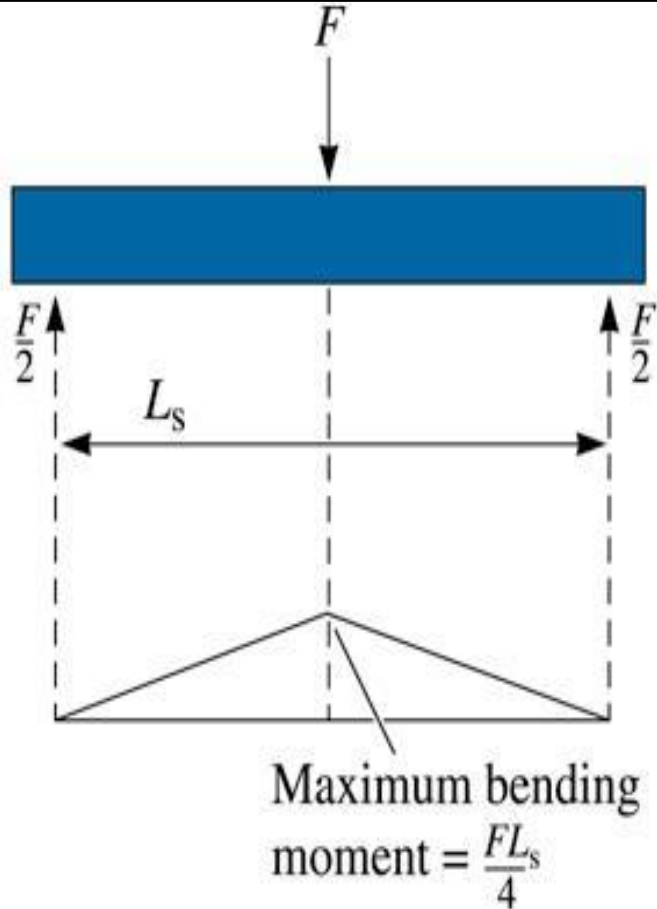
Cerâmicas: C 158, C 674

Fibras e Compósitos: C 393

Plásticos e Material para Isolamento Elétrico: D 790

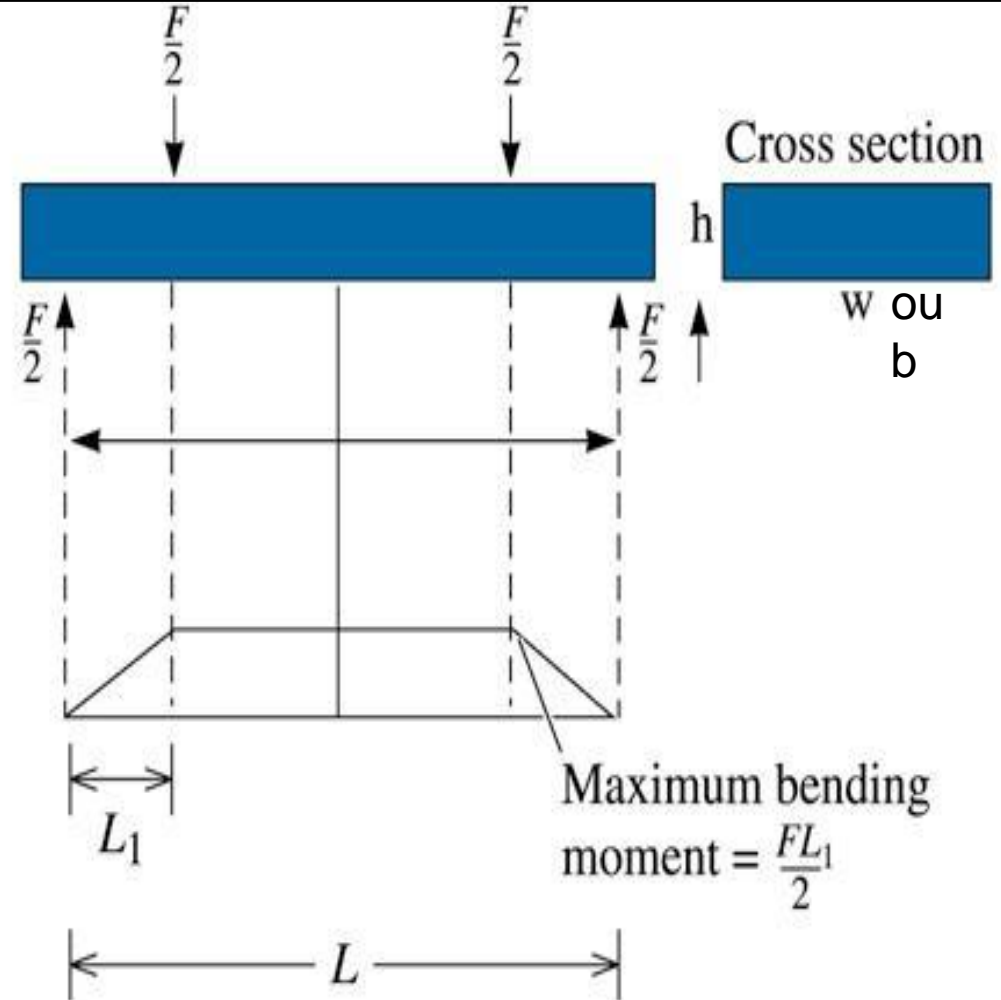
Diagrama de Esforços (Flexão)

MECÂNICA DOS SÓLIDOS: HOMOGENEO, CONTÍNUO E ISOTRÓPICO



3 pontos

(a)



4 pontos

(b)

Determinação da Resistência à Flexão

- A ruptura se dá por tração, iniciando nas fibras inferiores
- Tensão normal em uma viga, regime elástico (Mecânica dos Sólidos):

$$\sigma = \frac{My}{I_z}$$

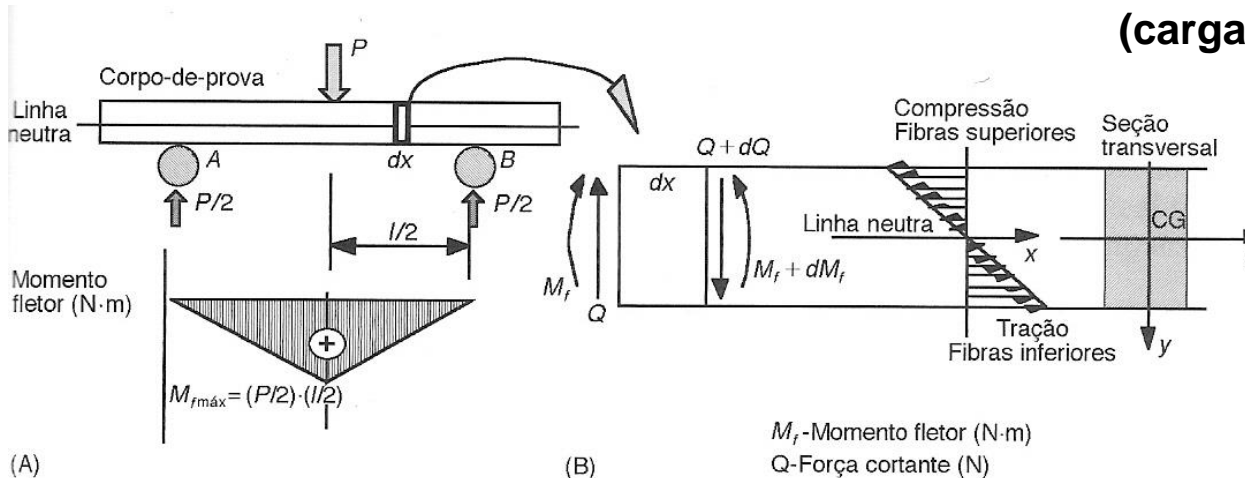
$$I_z = \frac{bh^3}{12}$$

onde: **M** = momento fletor

y = distância até a linha neutra

I_z = momento de inércia em relação à linha neutra
(seção retangular de largura *b* e altura *h*)

Desenvolvendo para M máximo:
(carga P no instante da ruptura)



$$\sigma_R = \frac{3PL}{2bh^2} \quad \text{- 3 pontos}$$

$$\sigma_R = \frac{3Pa}{bh^2} \quad \text{- 4 pontos}$$

A **linha neutra (plano)** é a superfície material curva de um corpo deformado por flexão que separa a zona comprimida da zona tracionada.

Determinação do Módulo de Young:

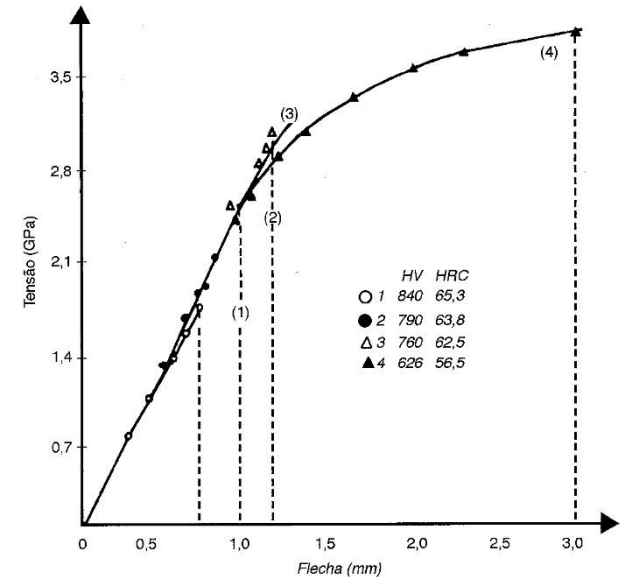
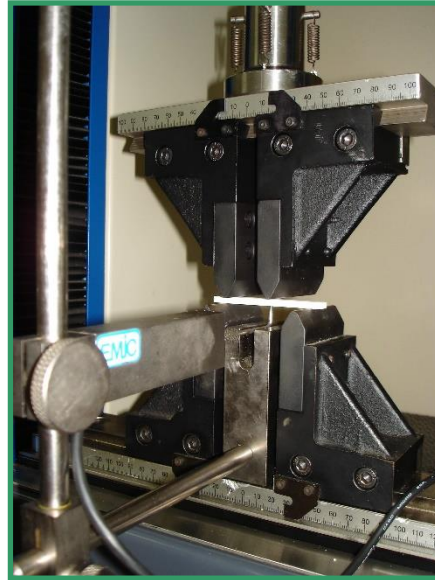
- **Recomendações: considerar no cálculo**
 - Pré-carga de 20% da força P de ruptura
 - Cargas e deflexões até 50% de P de ruptura
 - Mínimo 5 pontos experimentais

- **Flexão a 3 Pontos:**

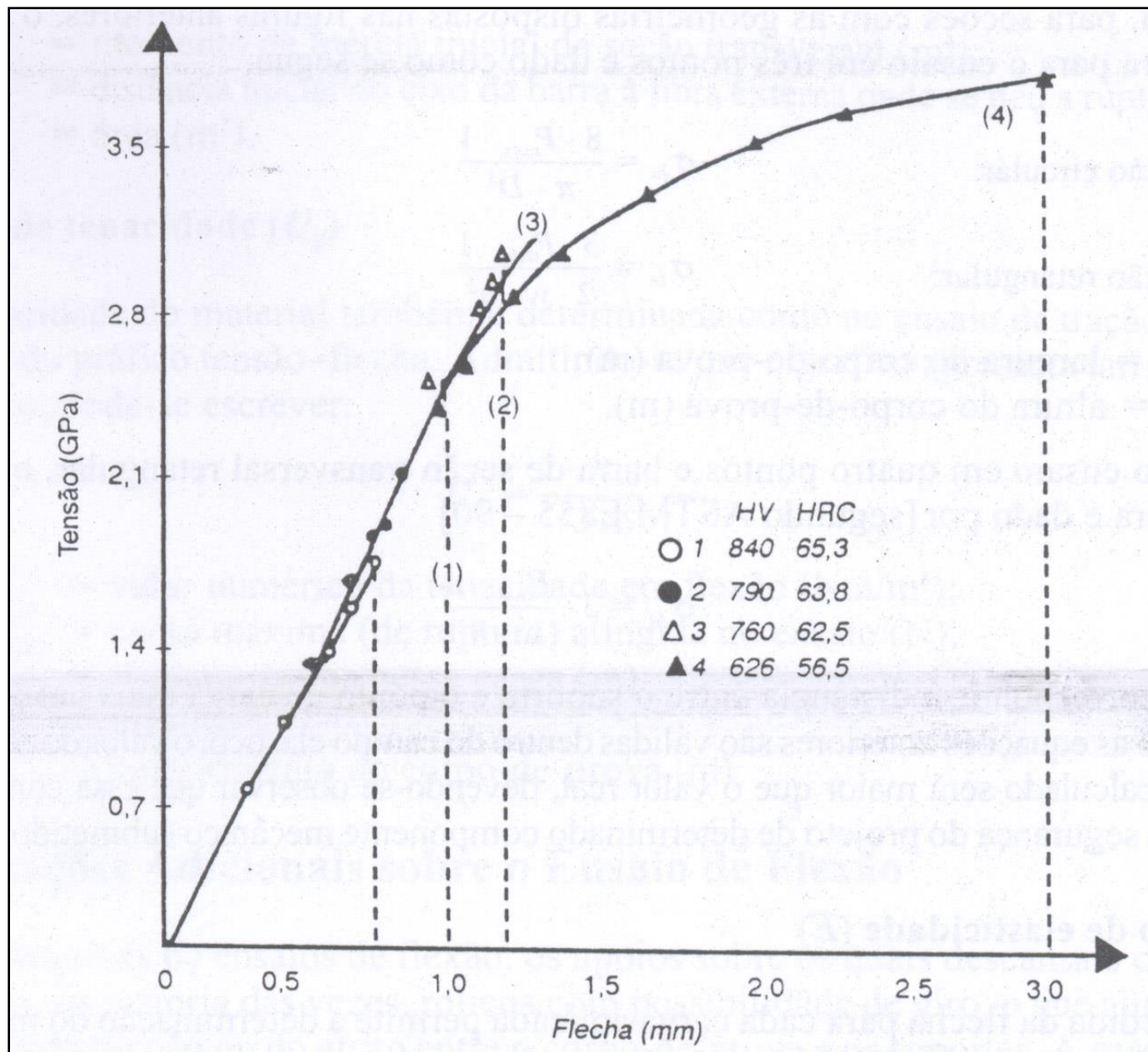
$$E = \frac{l^3}{4bh^3} \left(\frac{\Delta P}{\Delta v} \right)$$

- **Flexão a 4 Pontos:**

$$E = \frac{a}{4bh^3} \left(3l^2 - 4a^2 \right) \left(\frac{\Delta P}{\Delta v} \right)$$



- A medida das flexas permite obtenção de curvas tensão-deformação

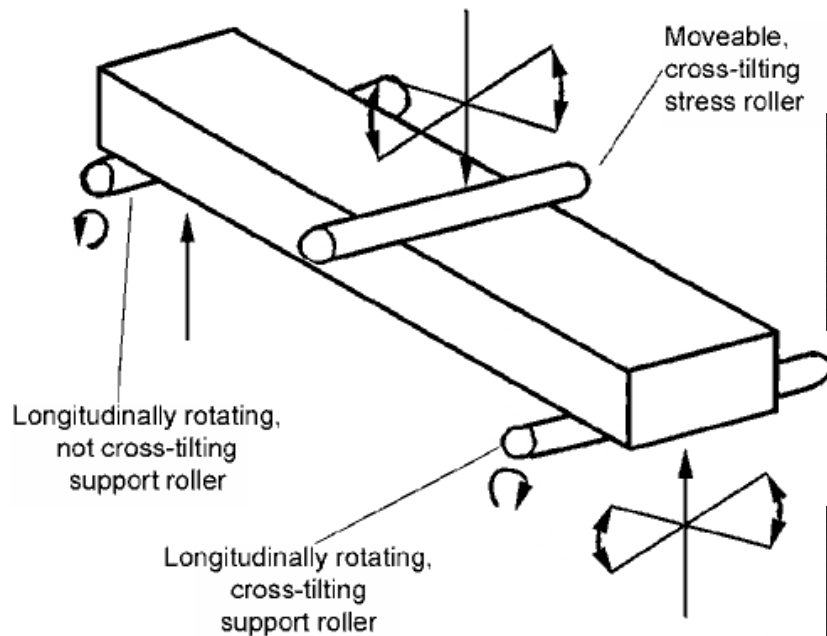




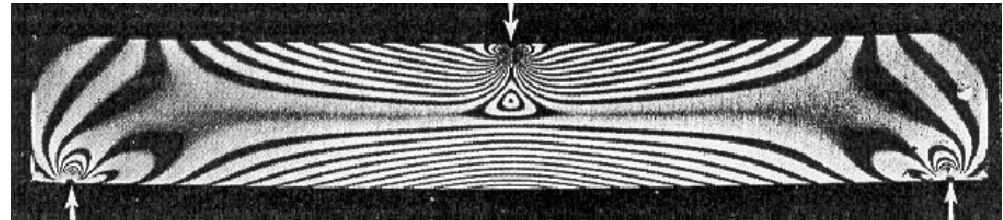
Erros nos ensaios de flexão:

- Campos de tensões em vigas prismáticas
- Dispositivos otimizados para minimização de erros experimentais

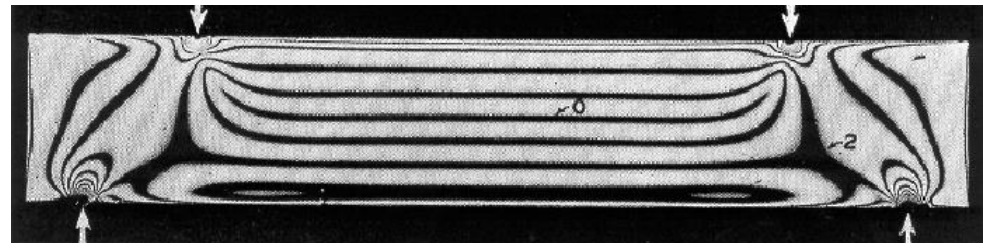
“O ensaio de flexão a 4 pontos, por minimizar o efeito das tensões de contato e expor maior região ao momento fletor máximo, deve ser preferido em relação ao ensaio a 3 pontos”



Ensaio a 3 pontos:



Ensaio a 4 pontos:





FIM