

PROPRIEDADES BÁSICAS DOS MATERIAIS

Propriedades Mecânicas

- resistência à tração e compressão;
- resistência a flexão transversal;
- resistência ao impacto;
- resistência à fadiga, à fluência;
- dureza;
- plasticidade/ductilidade e tenacidade;

Propriedades Químicas

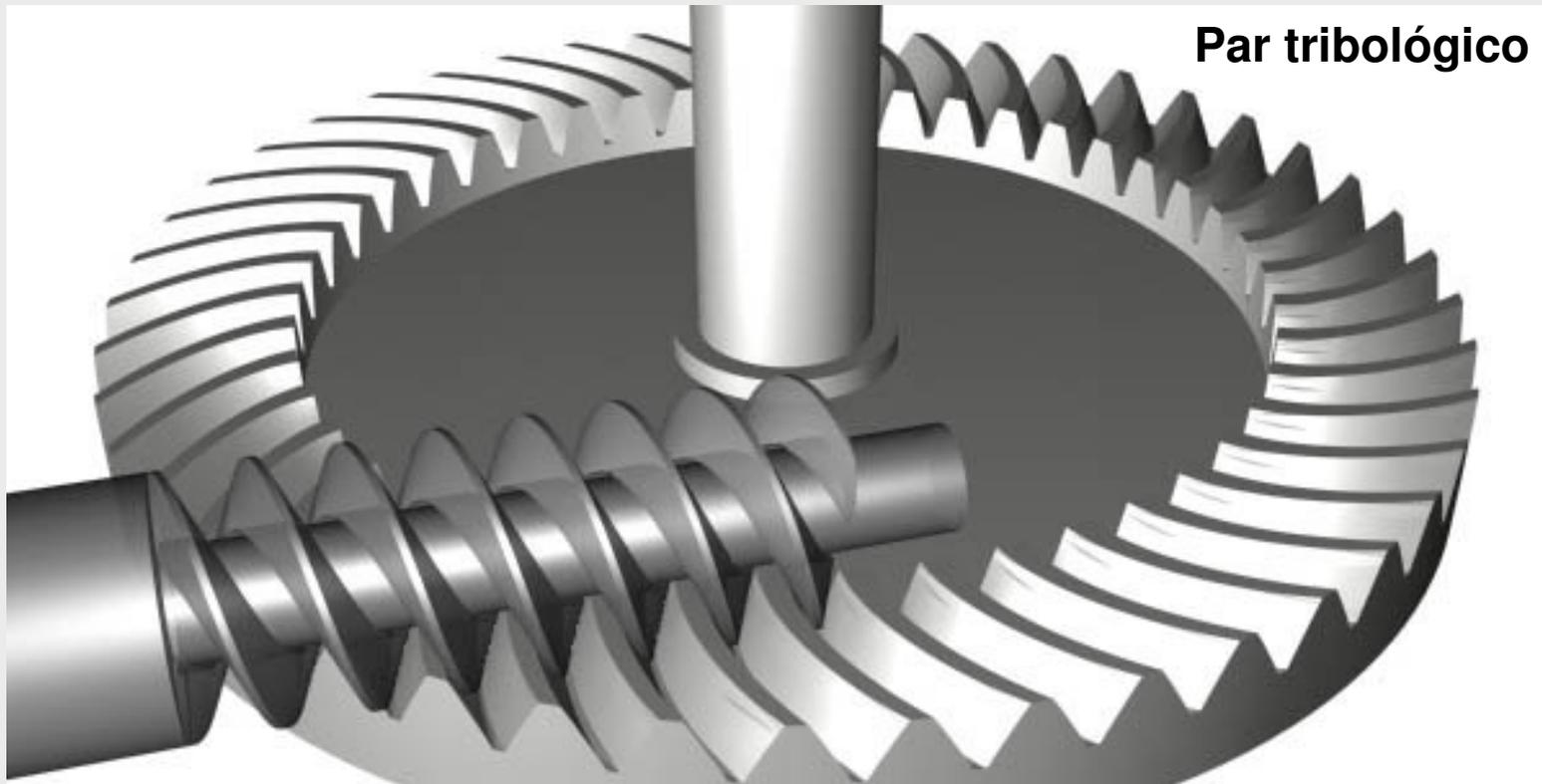
- resistência à corrosão (há diversas formas);
- resistência à oxidação, etc.

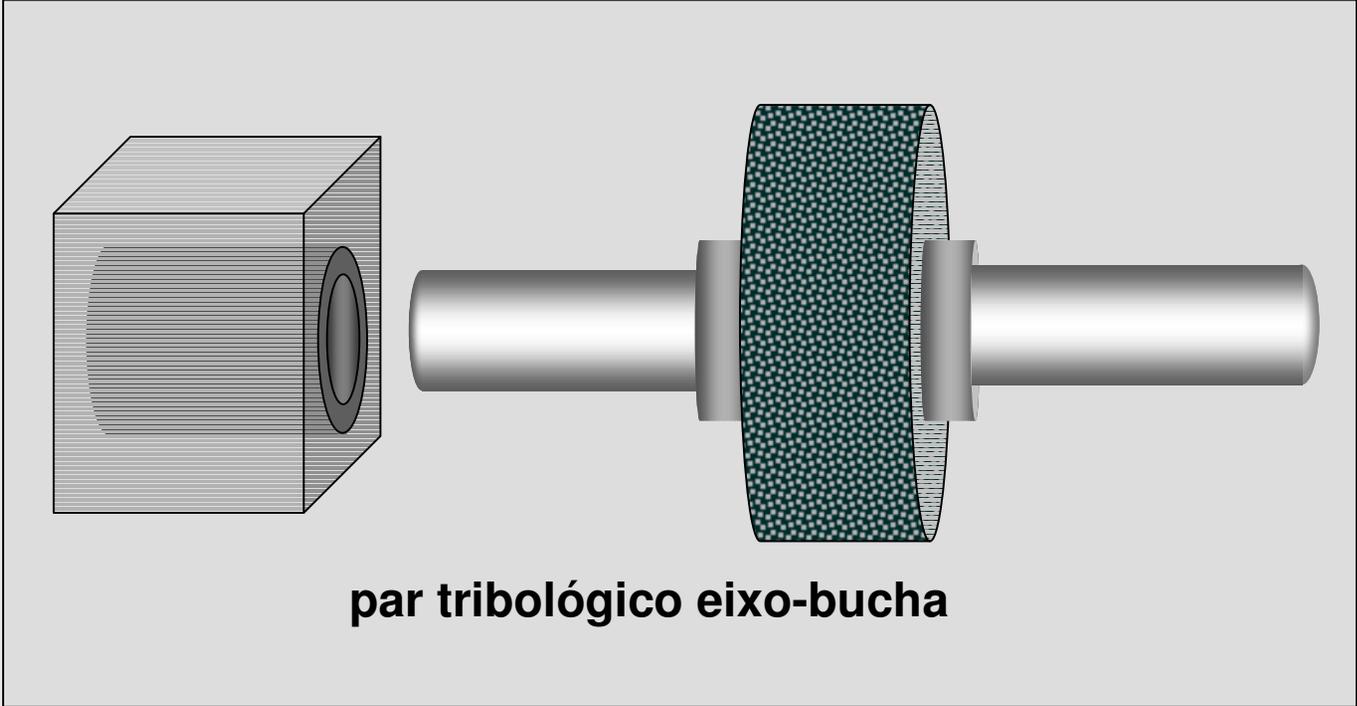
Propriedades Físicas

- *Propriedades Elétricas* (condutividade elétrica, resistividade elétrica, etc)
- *Propriedades Magnéticas* (permeabilidade magnética; força coercitiva, indução magnética, etc.)
- *Propriedades Térmicas* (condutividade térmica; dilatação térmica, etc)
- *Propriedades Óticas* (transparência; índice de refração, etc.)

Propriedades Tribológicas

- resistência aos diversos tipos de desgaste (desgaste abrasivo, desgaste adesivo, desgaste erosivo, etc.);
- coeficiente de atrito do material.





par tribológico eixo-bucha

SELEÇÃO DOS MATERIAIS

A seleção depende das propriedades do material



ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES

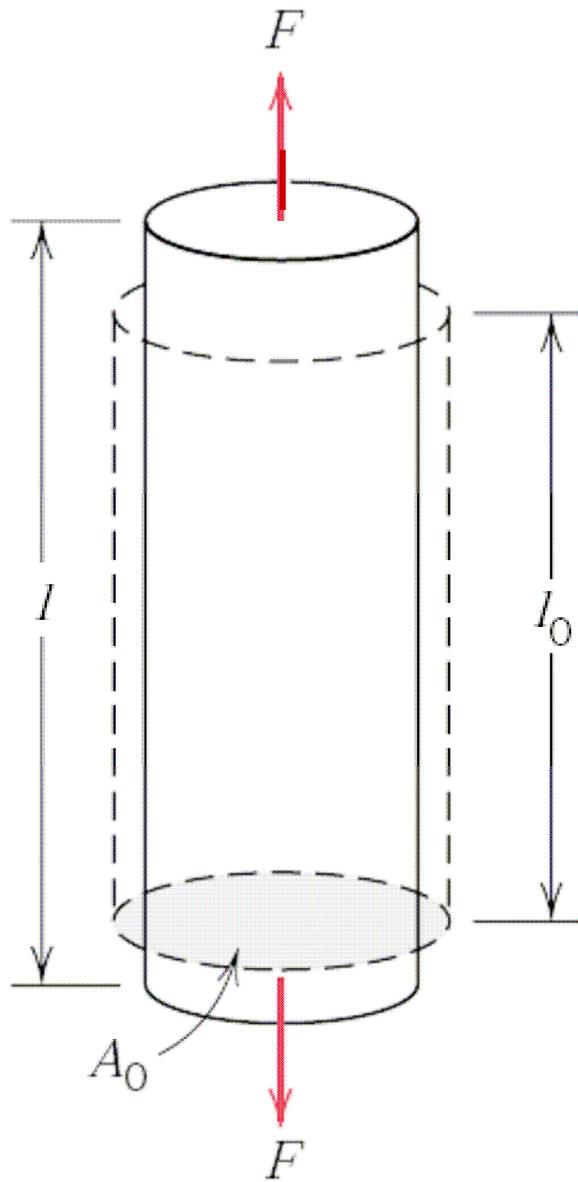
Para determinar as propriedades de um material são realizados ensaios específicos para a cada propriedade. O procedimento de cada ensaio é descrito em normas técnicas nacionais e internacionais como:

- ➡ ISO – International Standard Organization;
- ➡ ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- ➡ DIN - Deutsche Industrie Normen;
- ➡ ASTM – American Society for Testing and Materials
- ➡ MPIF- Metal Powder Industry Federation, etc.

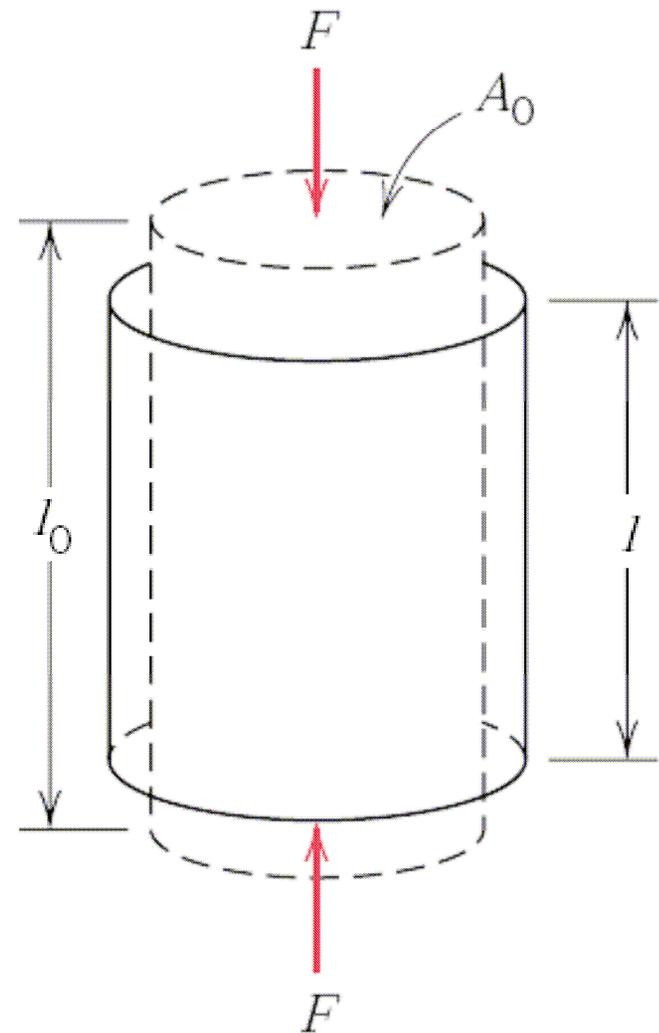
A geometria das amostras a serem ensaiadas (chamados corpos de prova) e as condições técnicas de condução de cada ensaio são descritas nas normas técnicas.

Exemplo: Resistência à tração → é obtida através do chamado Ensaio de Tração (Tensile Test, ASTM Standards E 8 e E 8M)

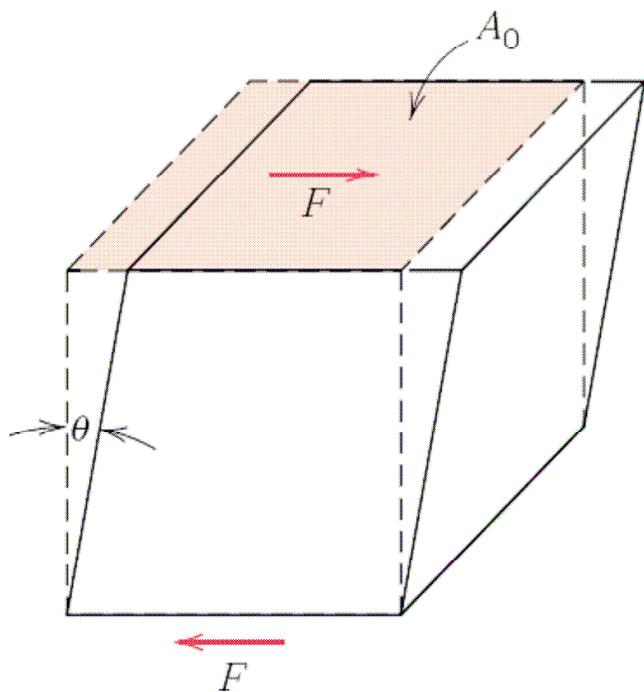




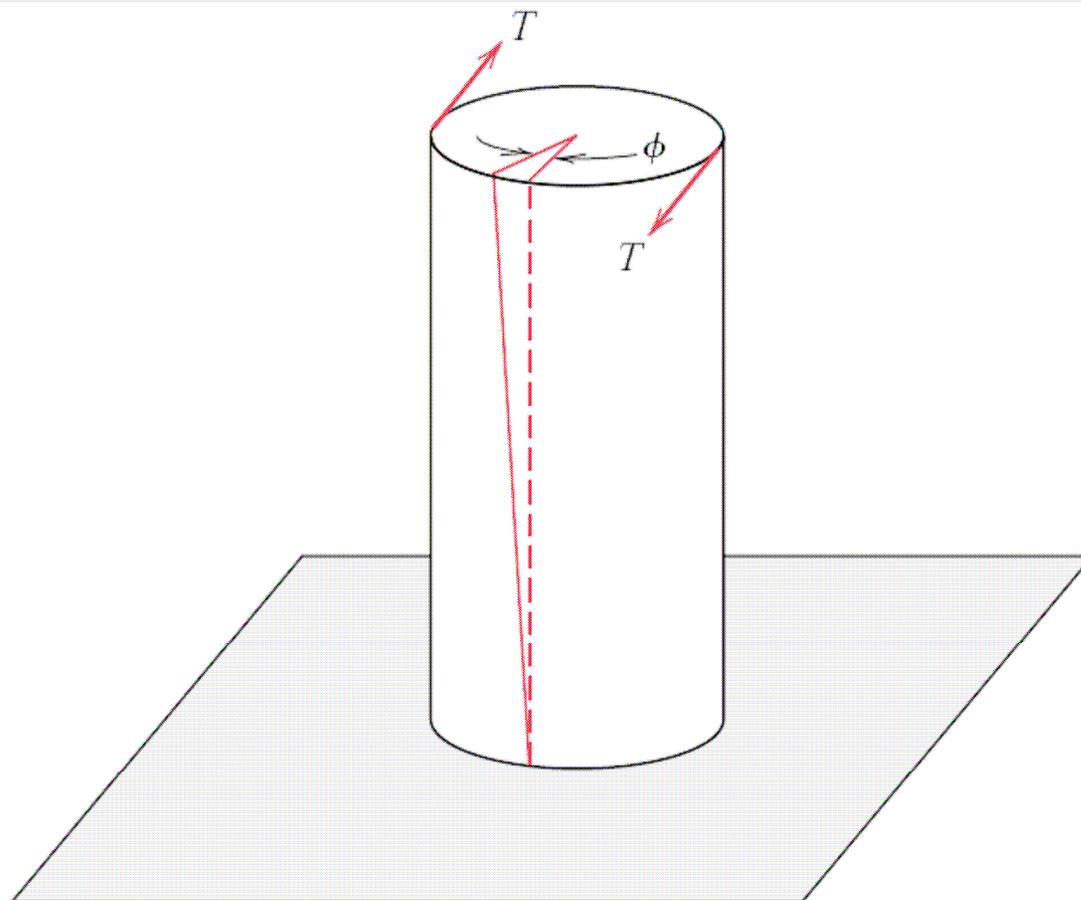
Esforço de tração



Esforço de compressão



Esforço de cisalhamento

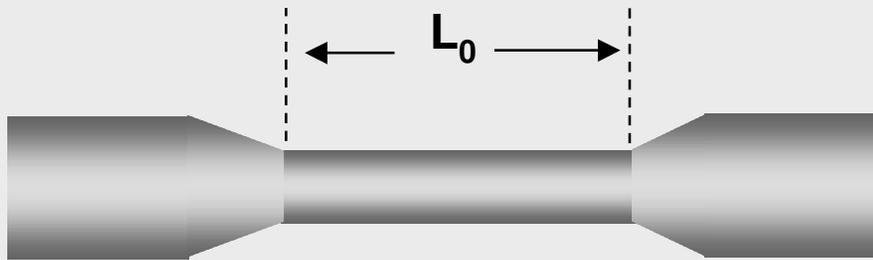


Esforço de torção

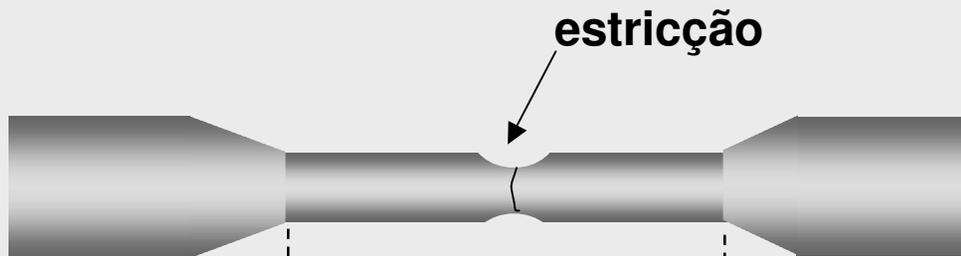
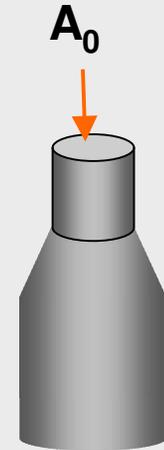
Propriedades mecânicas

1) ENSAIO DE TRAÇÃO

$$\sigma = F/A \quad (\text{N/mm}^2)$$



corpo de prova
antes do ensaio



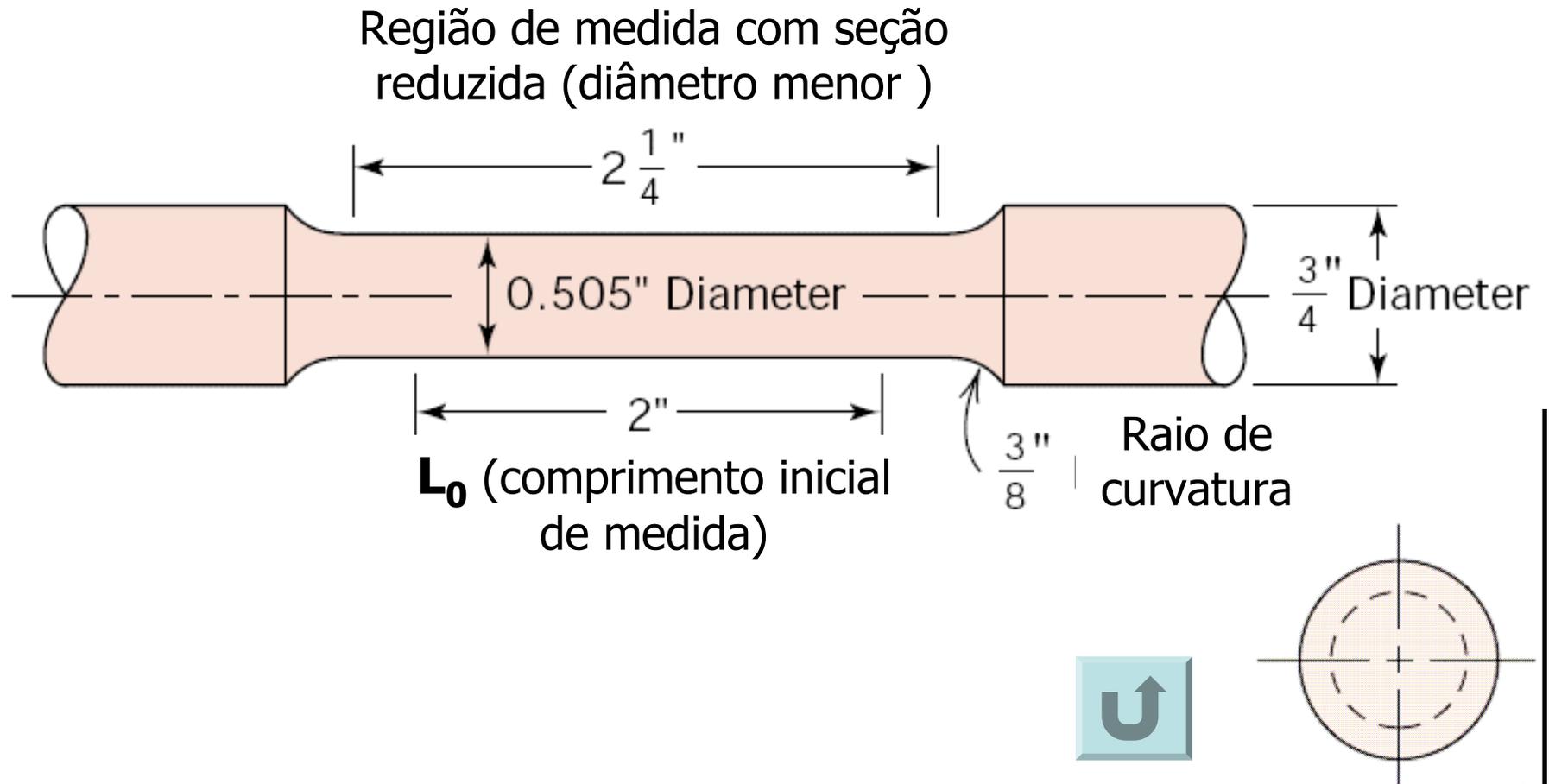
corpo de prova
após ensaio

L_f



Corpo de prova com
rosca para facilitar a
fixação na máquina
de ensaios

Corpo de prova de tração com seção circular (segundo a norma ASTM, Standards E 8 e E 8M)



¹ ASTM Standards E 8 and E 8M, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials."

Conceitos de Tensão e de deformação

Devemos diferenciar entre:

- tensão nominal ou **tensão de engenharia** (engineering stress) → $\sigma = F/A_0$ [N/mm²]
- **tensão real** (true stress) → $\sigma = F/A$ [N/mm²]
 - ▶ O conhecimento da tensão real é mais interessante em estudos científicos sobre comportamento mecânico e mecanismos de deformação envolvidos.
 - ▶ Na engenharia, para projetar estruturas e componentes mecânicos, utilizamos a tensão de engenharia.

Deformação

A deformação nominal ou de engenharia (engineering strain) no sentido do comprimento do corpo de prova é dada por:

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

A deformação real (true strain) é dado por:

$$\epsilon_v = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \left[\frac{L}{L_0} \right] = \ln \left[\frac{A_0}{A} \right]$$

onde **L** = comprimento instantâneo e **A** = área instantânea

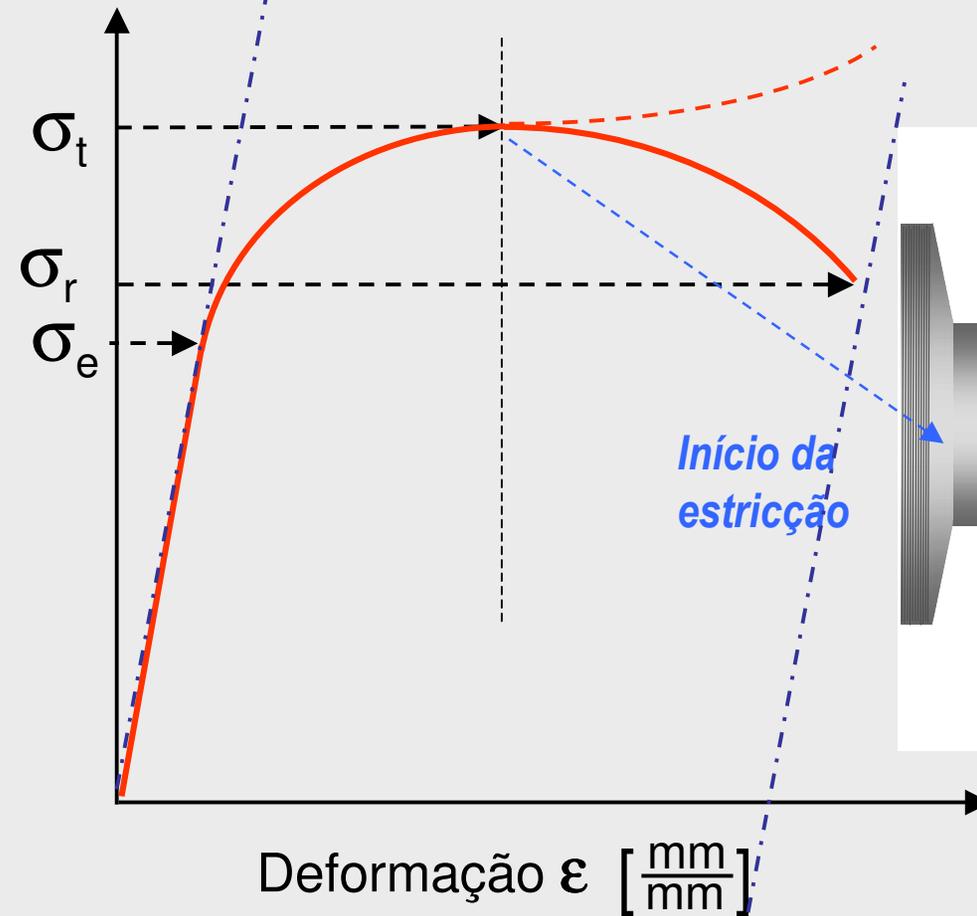
Gráficos $\sigma \times \epsilon$

σ_e = tensão de escoamento / limite elástico

σ_t = resistência à tração

σ_r = tensão de ruptura

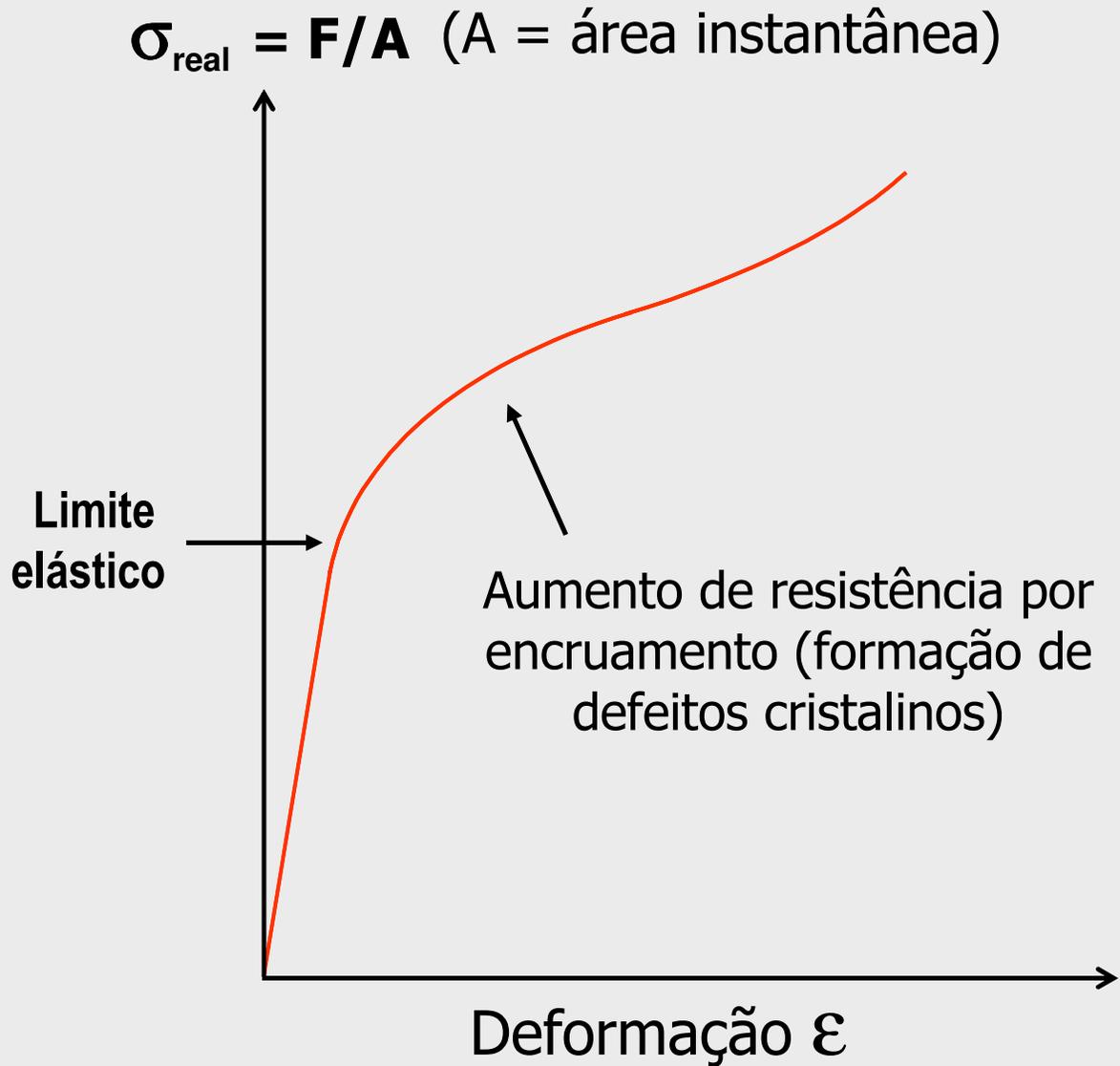
$$\sigma = \frac{F}{A_0} \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$



*Comparar com
Curva real*

*Início da
estricção*

Curva tensão real versus deformação em tração



Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade é a inclinação da curva tensão versus deformação ($\sigma \times \varepsilon$) na região elástica.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \sigma/\varepsilon$$



É uma propriedade muito importante pois representa a rigidez do material, isto é, a sua resistência à deformação elástica.

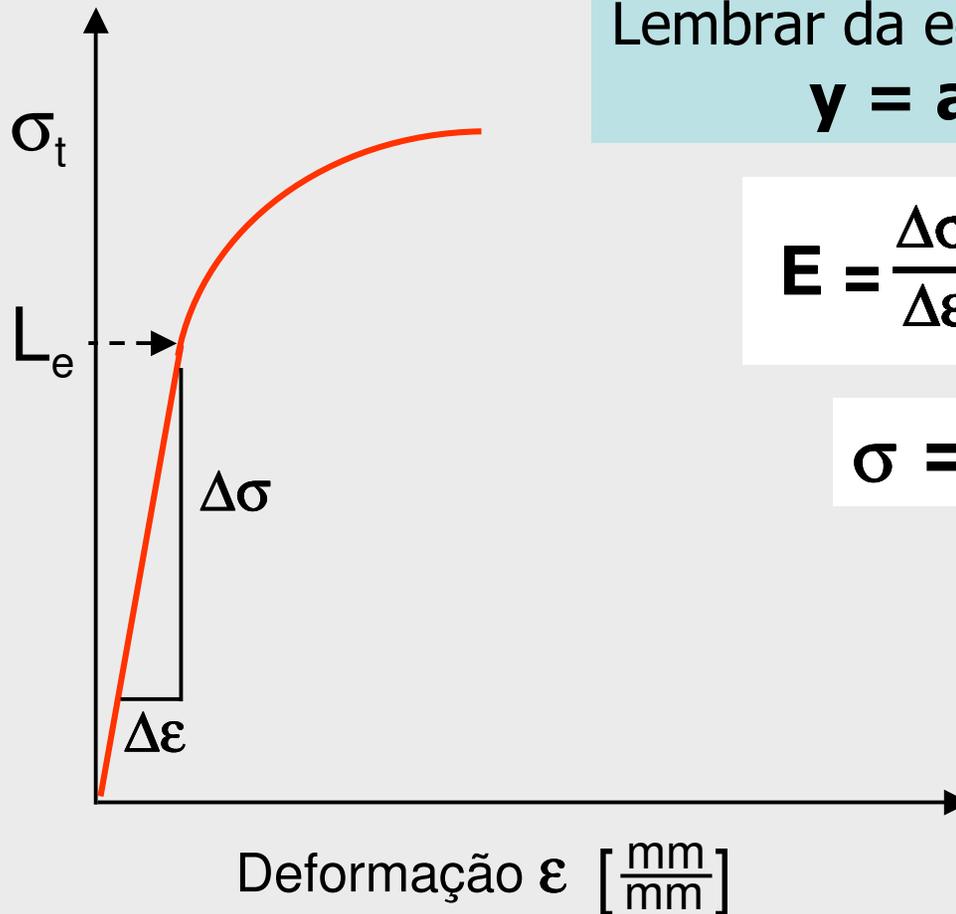
Valores do módulo de elasticidade:

- Metais: varia entre 45 GPa (Mg) e 407 GPa (W);
- Cerâmica: entre 70 e 500 GPa e Diamante = 1000GPa
- Polímeros: entre 0,007 e 4 GPa.

(1GPa = 1000 MPa = 1000 N/mm²)

Módulo de Elasticidade

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$



Lembrar da equação da reta
 $y = ax + b$

$$\mathbf{E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{\sigma}{\epsilon}}$$

$$\mathbf{\sigma = E \epsilon}$$

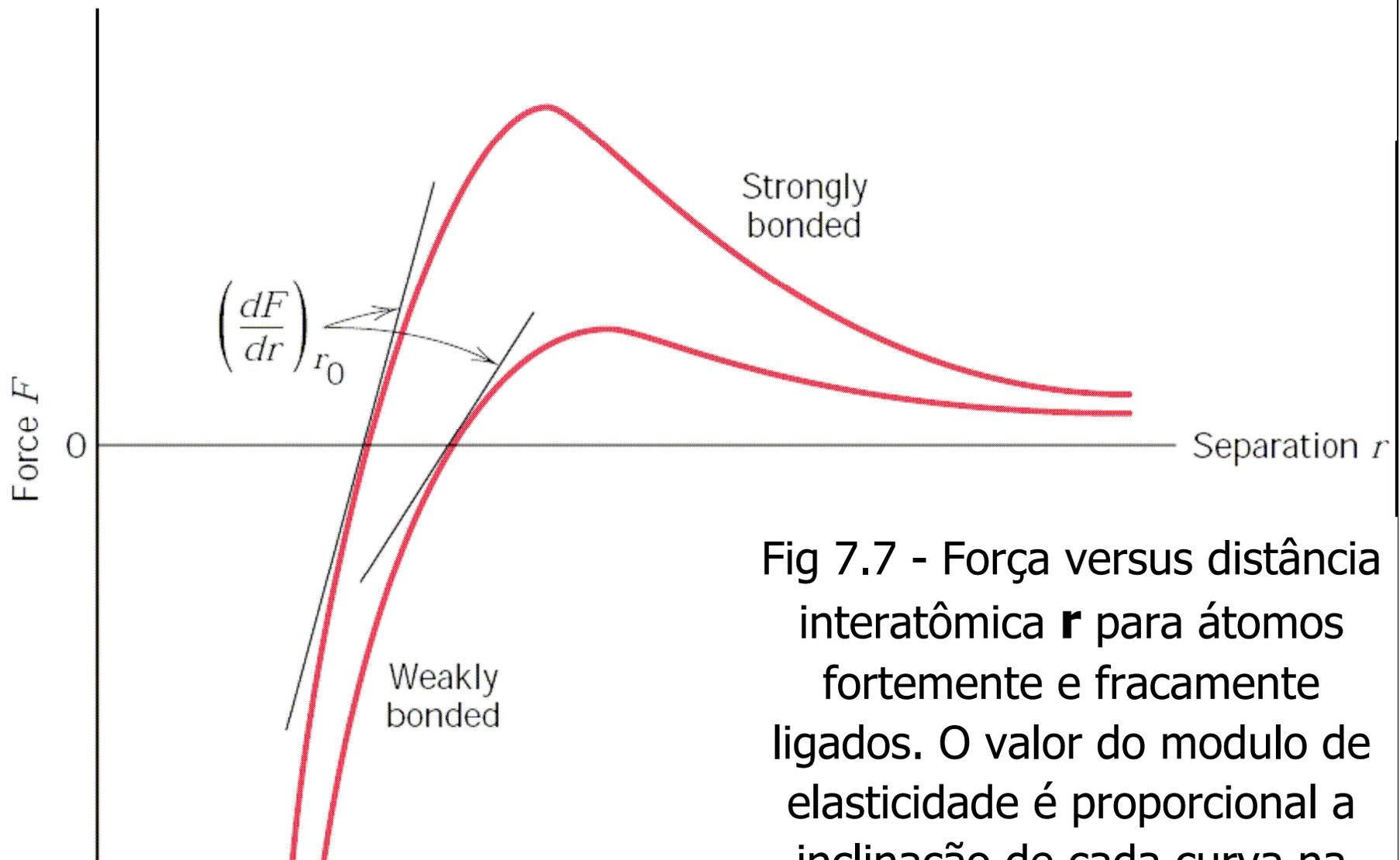


Fig 7.7 - Força versus distância interatômica r para átomos fortemente e fracamente ligados. O valor do modulo de elasticidade é proporcional a inclinação de cada curva na posição de equilíbrio r_0



Tensão de cisalhamento

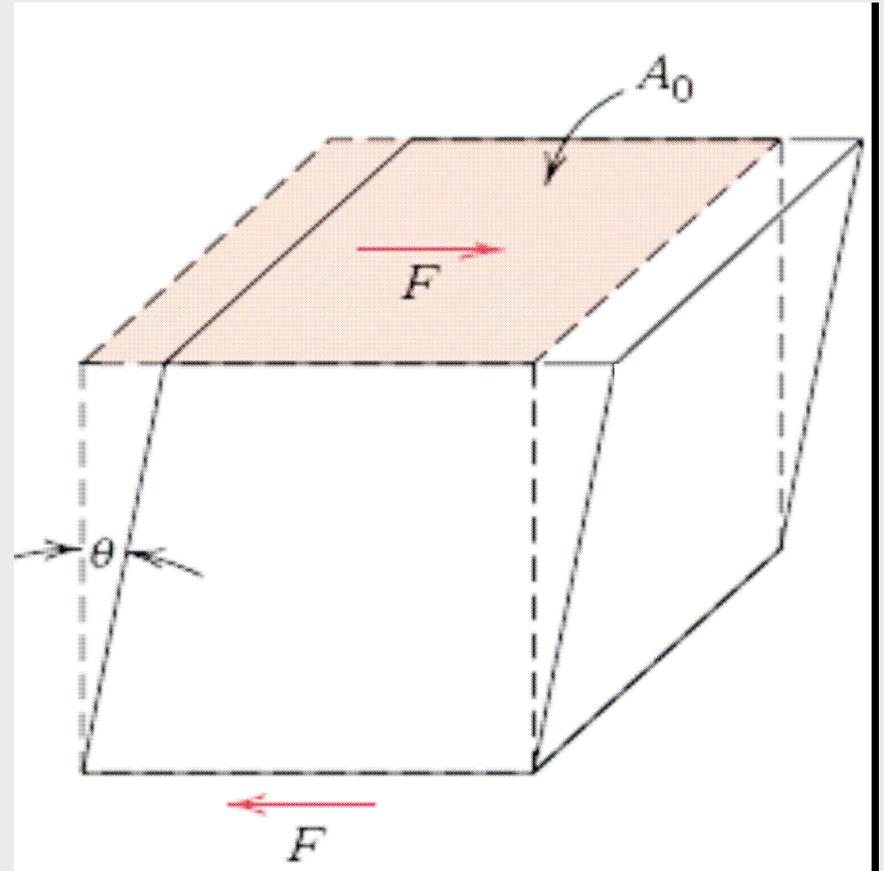
$$\tau = \frac{F}{A_0}$$

Deformação de cisalhamento

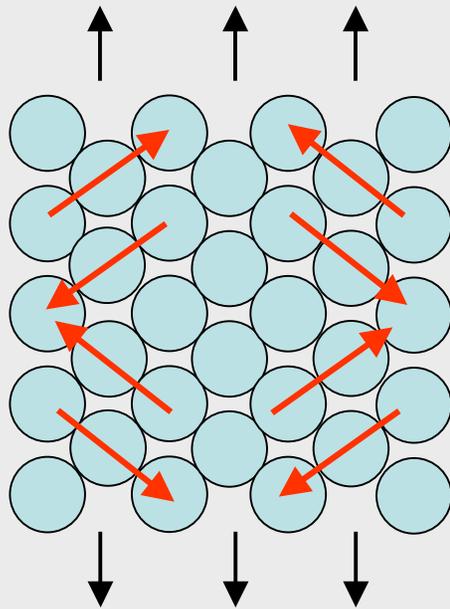
$$\gamma = \tan \theta$$

Módulo de cisalhamento

$$\tau = G\gamma$$



σ de tração



$$\sigma = F/A$$

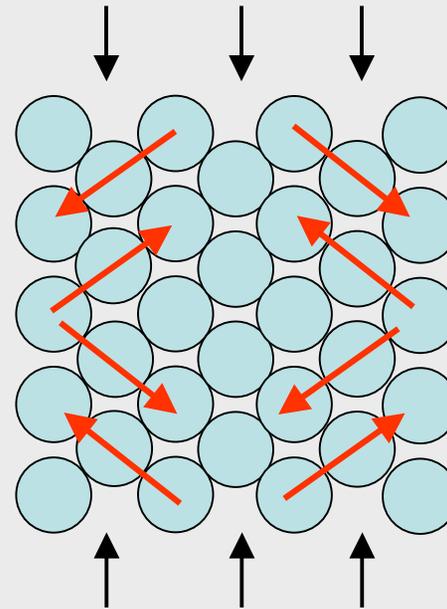
Tensão de cisalhamento

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

Deformação de cisalhamento

$$\gamma = \tan \theta$$

σ de compressão

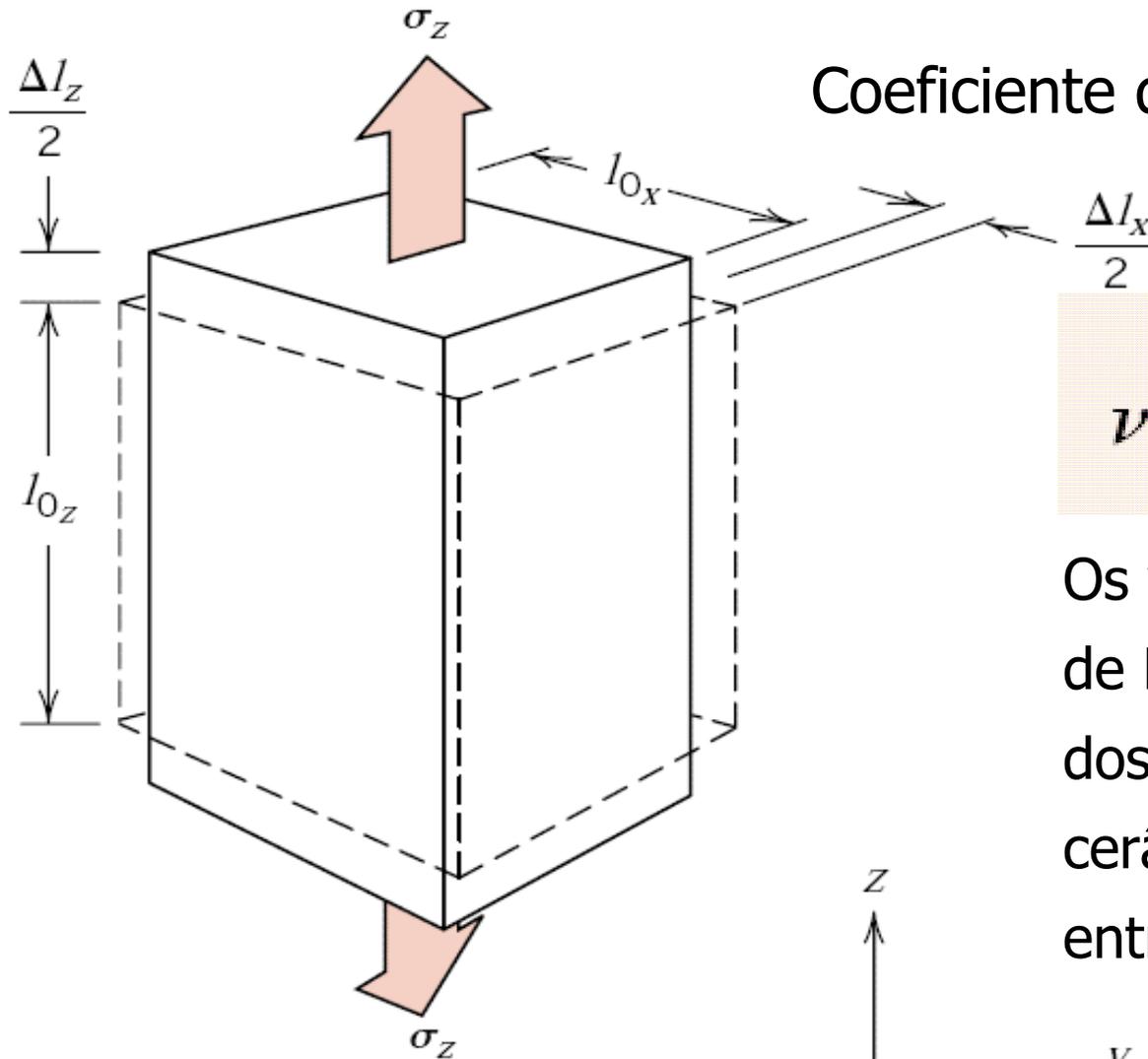


σ

Módulo de cisalhamento

$$\tau = G\gamma$$

Coeficiente de Poisson



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

Os valores do coeficiente de Poisson da maioria dos materiais metálicos e cerâmicos encontram-se entre 0,26 e 0,35.

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

Para materiais isotópicos o módulo de elasticidade se correlaciona com o de cisalhamento e com o coeficiente de Poisson pela equação:

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

Na maioria dos metais vale que $G \cong 0,4E$

Table 7.1 Room-Temperature Elastic and Shear Moduli, and Poisson's Ratio for Various Materials

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

Table 7.1 Room-Temperature Elastic and Shear Moduli, and Poisson's Ratio for Various Materials

<i>Material</i>	<i>Modulus of Elasticity</i>		<i>Shear Modulus</i>		<i>Poisson's Ratio</i>
	<i>GPa</i>	<i>10⁶ psi</i>	<i>GPa</i>	<i>10⁶ psi</i>	
Ceramic Materials					
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	393	57	—	—	0.22
Silicon carbide (SiC)	345	50	—	—	0.17
Silicon nitride (Si ₃ N ₄)	304	44	—	—	0.30
Spinel (MgAl ₂ O ₄)	260	38	—	—	—
Magnesium oxide (MgO)	225	33	—	—	0.18
Zirconia ^a	205	30	—	—	0.31
Mullite (3Al ₂ O ₃ -2SiO ₂)	145	21	—	—	0.24
Glass-ceramic (Pyroceram)	120	17	—	—	0.25
Fused silica (SiO ₂)	73	11	—	—	0.17
Soda-lime glass	69	10	—	—	0.23

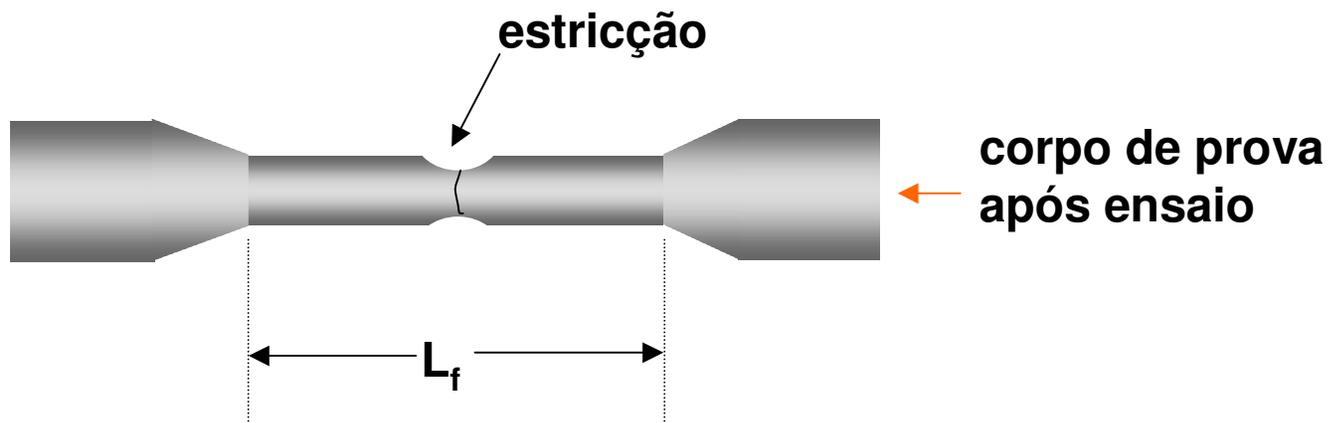
Table 7.1 Room-Temperature Elastic and Shear Moduli, and Poisson's Ratio for Various Materials

<i>Material</i>	<i>Modulus of Elasticity</i>		<i>Shear Modulus</i>		<i>Poisson's Ratio</i>
	<i>GPa</i>	<i>10⁶ psi</i>	<i>GPa</i>	<i>10⁶ psi</i>	
Polymers^b					
Phenol-formaldehyde	2.76–4.83	0.40–0.70	—	—	—
Polyvinyl chloride (PVC)	2.41–4.14	0.35–0.60	—	—	0.38
Polyester (PET)	2.76–4.14	0.40–0.60	—	—	—
Polystyrene (PS)	2.28–3.28	0.33–0.48	—	—	0.33
Polymethyl methacrylate (PMMA) (acrílico)	2.24–3.24	0.33–0.47	—	—	—
Polycarbonate (PC)	2.38	0.35	—	—	0.36
Nylon 6,6	1.58–3.80	0.23–0.55	—	—	0.39
Polypropylene (PP)	1.14–1.55	0.17–0.23	—	—	—
Polyethylene—high density (HDPE)	1.08	0.16	—	—	—
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	0.40–0.55	0.058–0.080	—	—	0.46
Polyethylene—low density (LDPE)	0.17–0.28	0.025–0.041	—	—	—

Estricção

Chama-se de estricção o percentual de deformação em área no local onde se forma a estricção (pescoço), isto é,

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



Alongamento

Chama-se de alongamento à deformação plástica total ocorrida no corpo de prova até a sua ruptura no ensaio de tração.

$$A = \frac{L_f - L_0}{L_0} \text{ (após ruptura)}$$



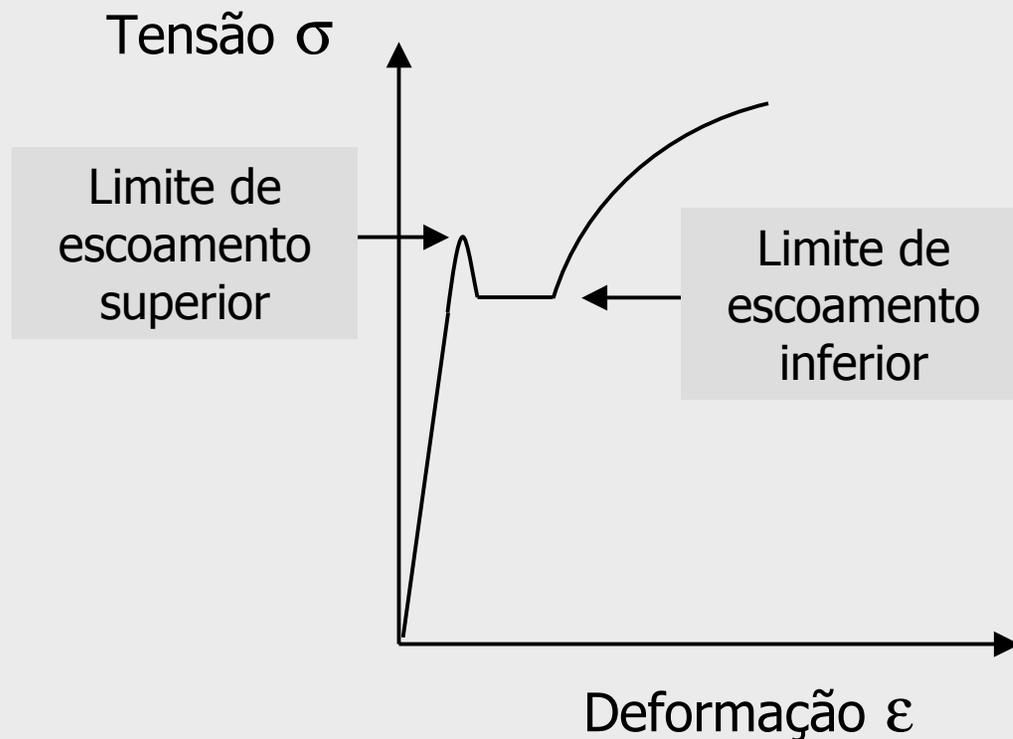
Alongamento é a deformação plástica máxima na direção da aplicação da força

È uma propriedade do material que se relaciona com a sua capacidade de deformar-se plasticamente (sua plasticidade). Quanto mais dúctil o material maior o seu alongamento.

TENSÃO DE ESCOAMENTO (σ_e)

É o valor de tensão para a qual o material inicia a se deformar plasticamente (deformação plástica).

Alguns materiais (por ex., ferro e aço) apresentam patamar de escoamento bem definido, com limite superior e inferior, conforme ilustrado esquematicamente na figura abaixo.



→ O valor da tensão de escoamento de um metal é uma medida de sua resistência à deformação plástica.

→ A Tensão de escoamento dos metais encontra-se no intervalo de 35 MPa (alumínio) a 1400 MPa para aços de alta resistência

→ A resistência a tração varia entre 50 MPa a 3.000 MPa

LIMITE ELÁSTICO (L_E)

Quando submetido a uma força de tração o material sofre, inicialmente, apenas deformação elástica até ser alcançado o **limite elástico**; a partir deste ponto do ensaio começa a ocorrer, além da elástica, a deformação plástica ou permanente.

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}$$

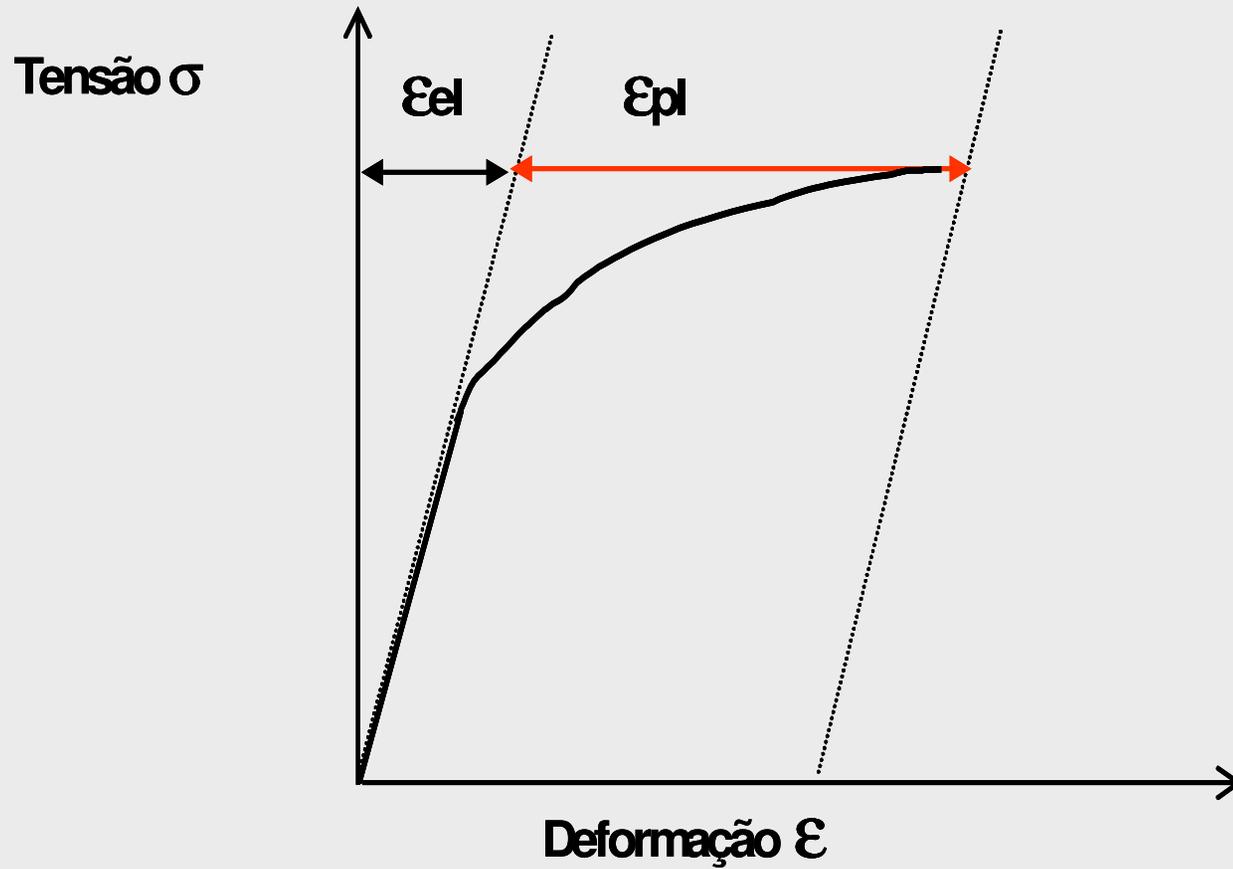


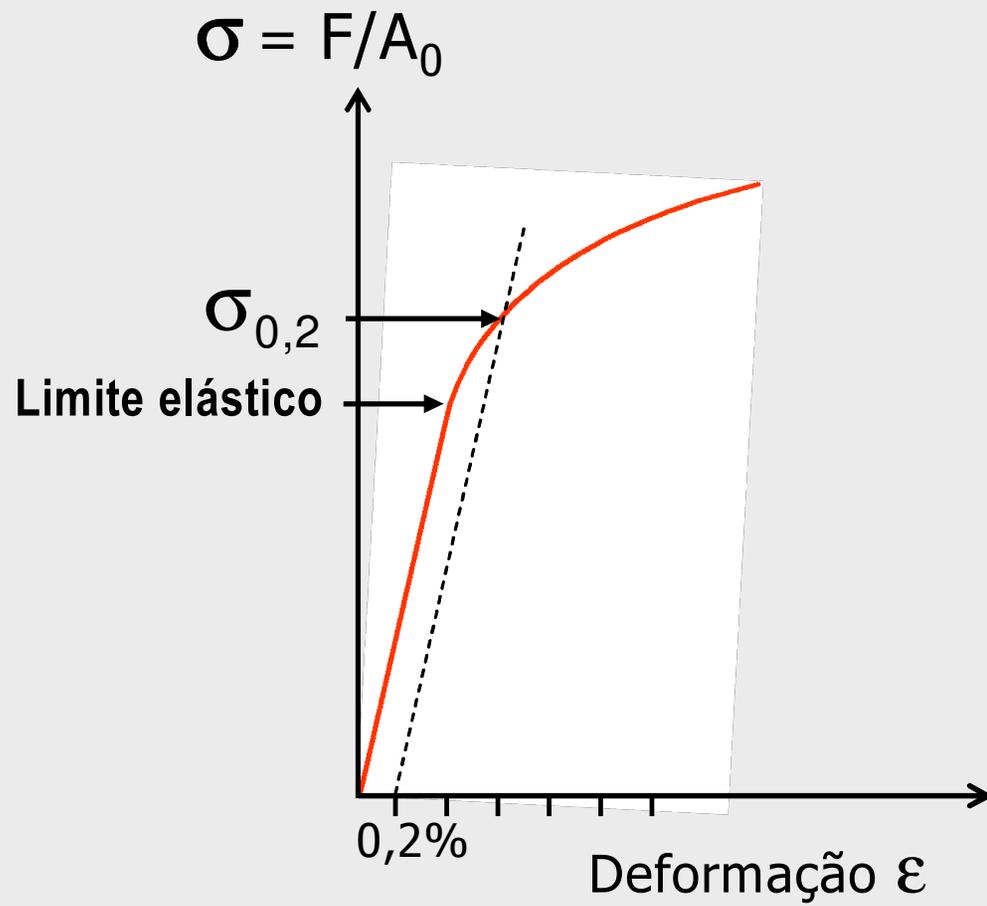
TENSÃO DE ESCOAMENTO CONVENCIONADA ($\sigma_{0,2}$)

Quando não apresenta patamar de escoamento claramente definido define-se, por norma, como tensão de escoamento aquela tensão para a qual o material já apresenta 0,2% de deformação permanente e determina-se graficamente (ver figura).

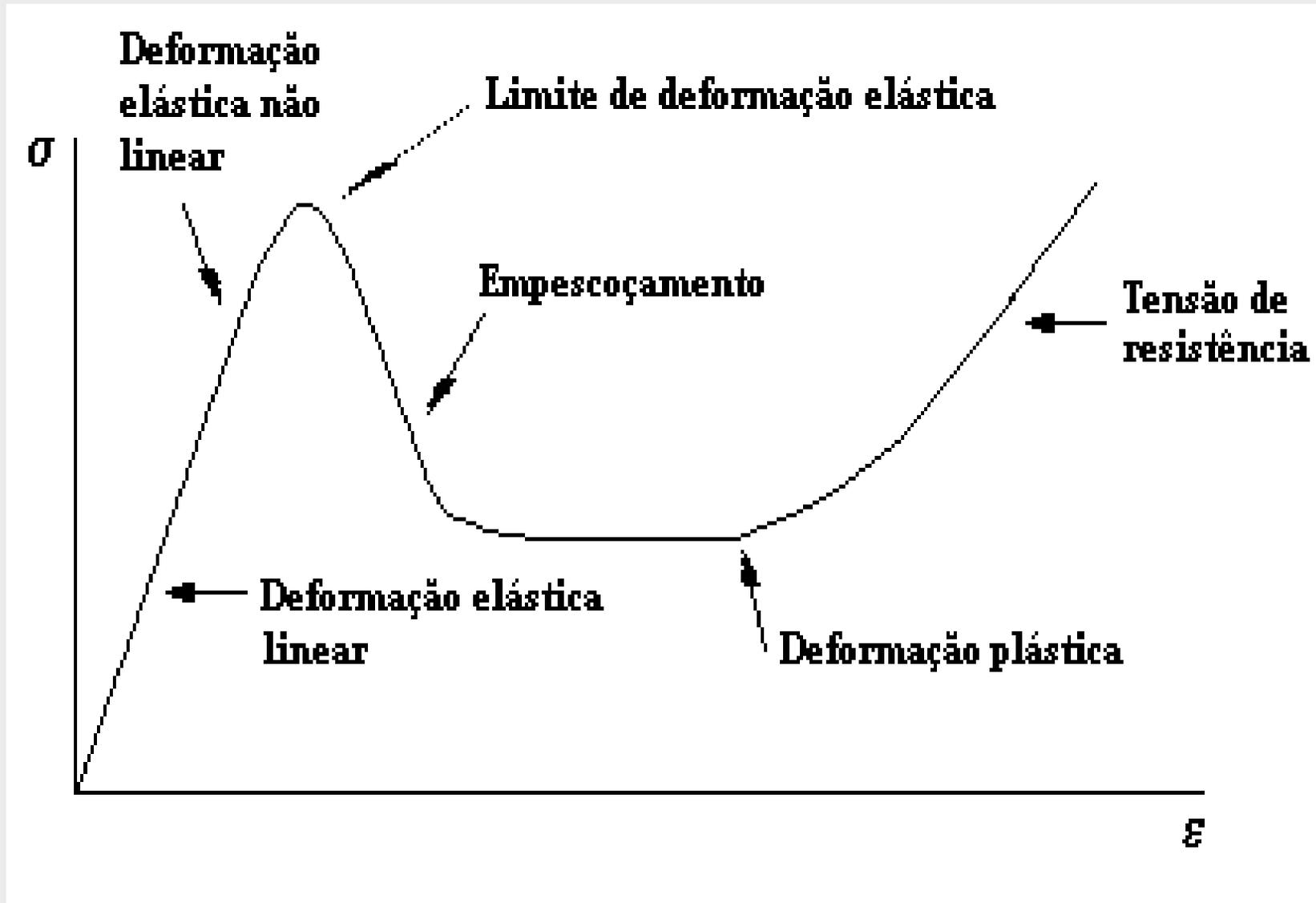


$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}$$





Ensaio de tração de Polímeros



RESILIÊNCIA

A resiliência é a capacidade de um material de absorver energia quando ele é deformado elasticamente e depois, com o descarregamento, ter esta energia recuperada.

A propriedade associada é o módulo de resiliência (U_r) que representa a energia de deformação por unidade de volume para tensionar o material até seu limite elástico. Na tração, é a área abaixo da curva $\sigma \times \epsilon$ até o limite elástico.

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

Em materiais nos quais a região elástica é linear (em compósitos e polímeros a região elástica pode não ser linear!) temos

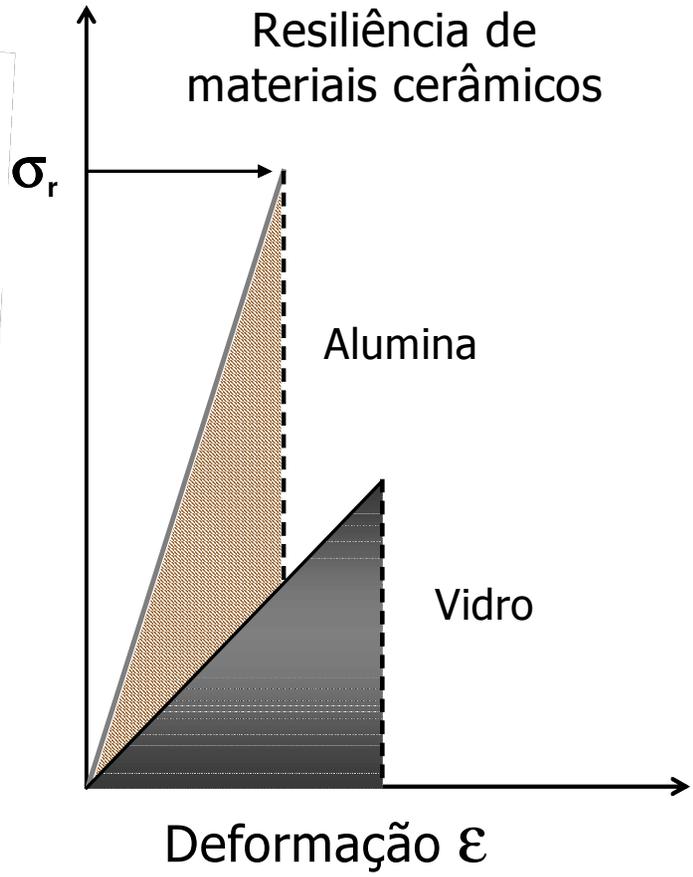
$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_e \epsilon_e$$

Como $\epsilon = \sigma/\mathbf{E}$, podemos escrever

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_e \left(\frac{\sigma_e}{\mathbf{E}} \right) = \frac{\sigma_e^2}{2\mathbf{E}}$$



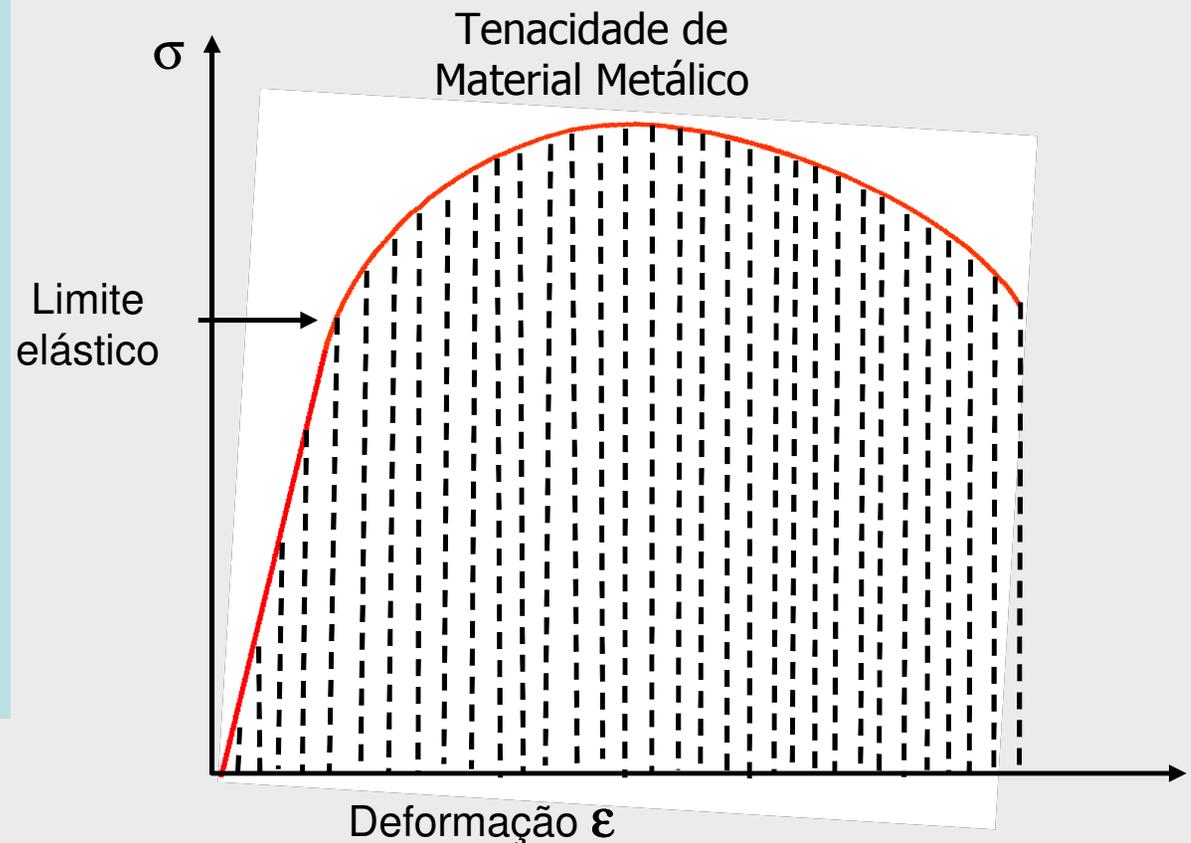
$$\sigma = F/A_0$$



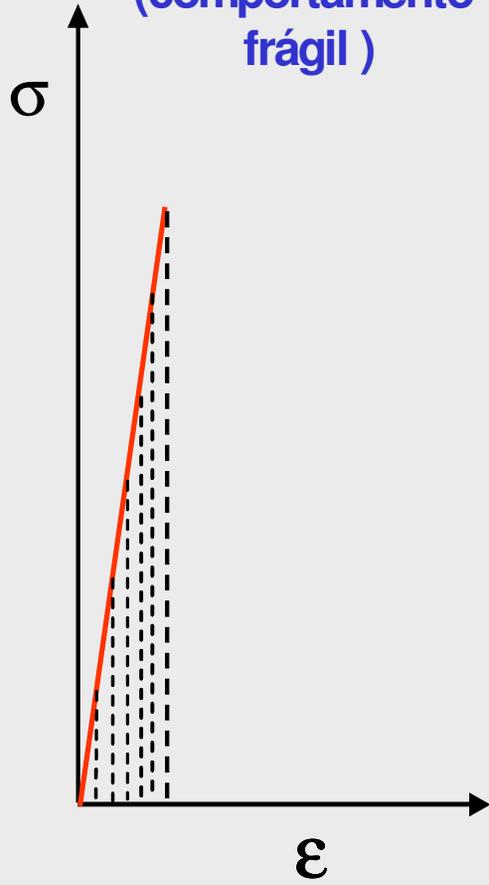
Tenacidade de material metálico

A tenacidade é um termo (dentro da área de propriedades mecânicas) utilizado em vários contextos: ela representa uma medida da habilidade do material em absorver energia até sua ruptura. A geometria do corpo de prova, bem como a maneira pela qual a carga é aplicada são fatores importantes na determinação da tenacidade.

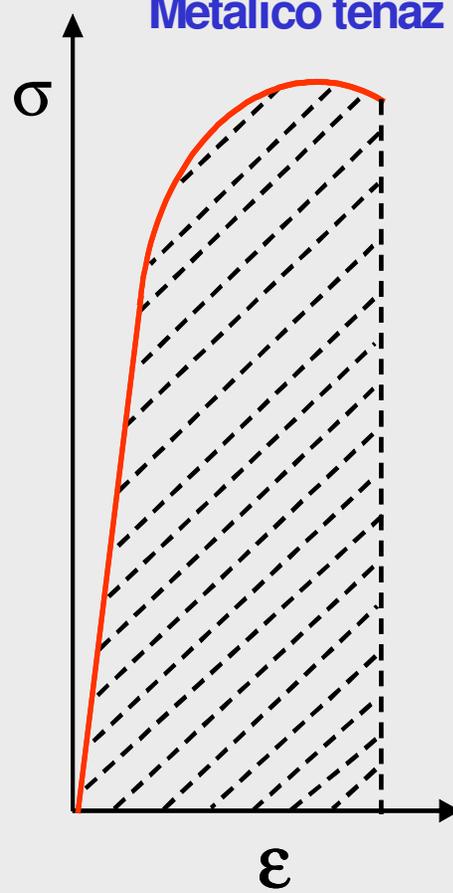
Para uma situação estática (pequena taxa de deformação), a tenacidade pode ser determinada a partir dos resultados de tensão versus deformação de um ensaio de tração (área abaixo da curva $\sigma \times \epsilon$ do ensaio de tração)



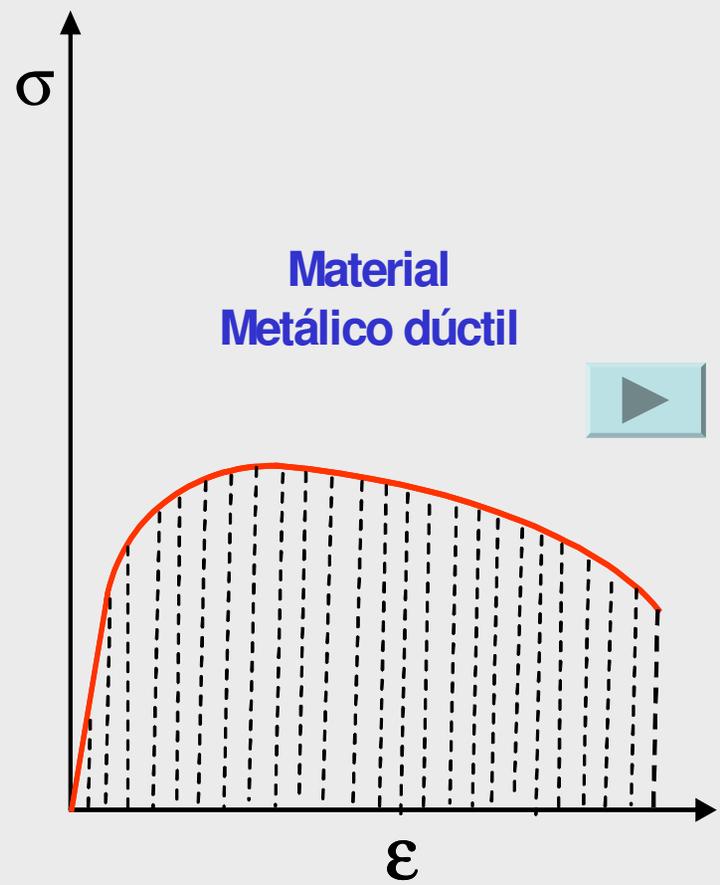
**Material cerâmico
(comportamento frágil)**



**Material
Metálico tenaz**



**Material
Metálico dúctil**



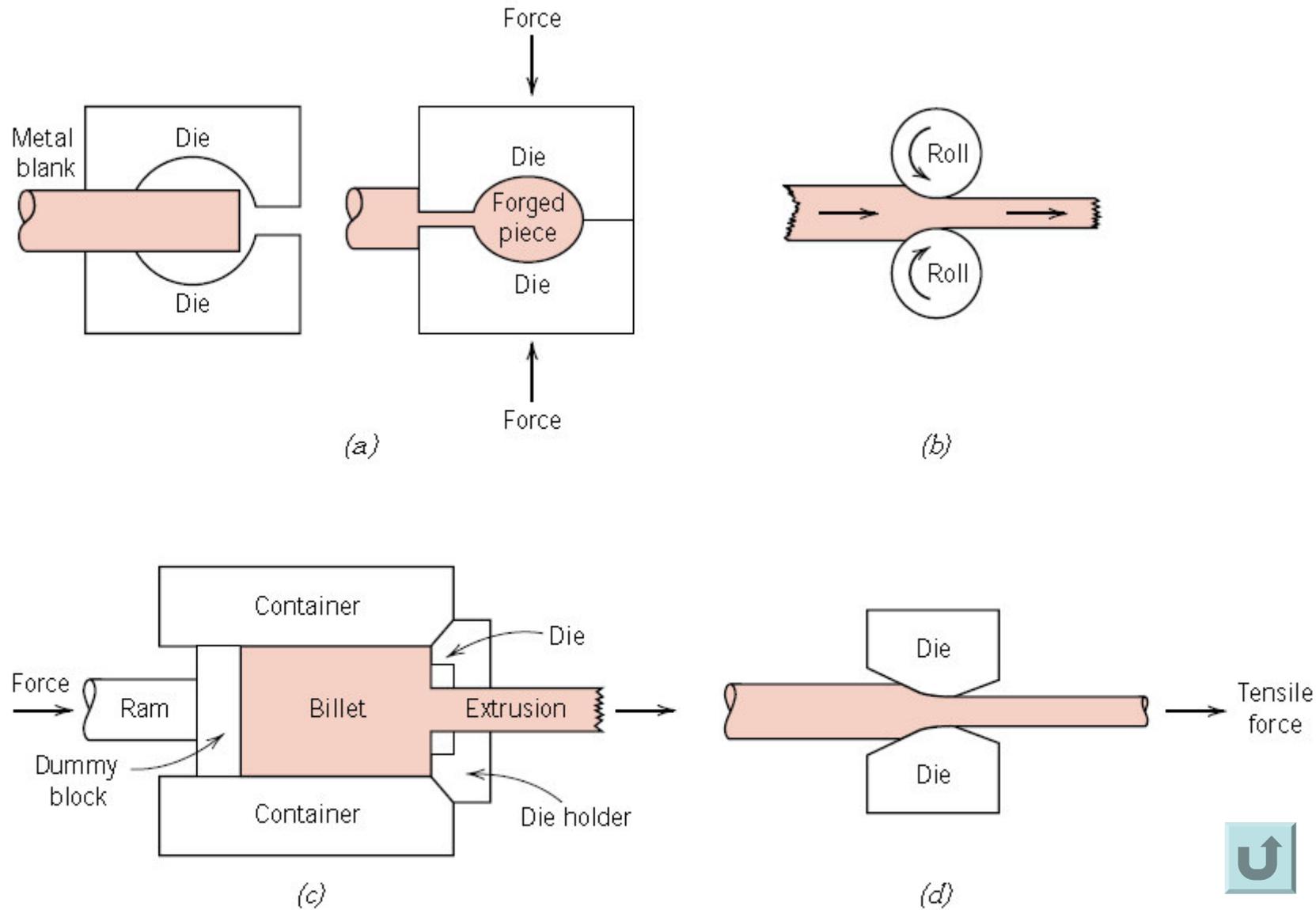
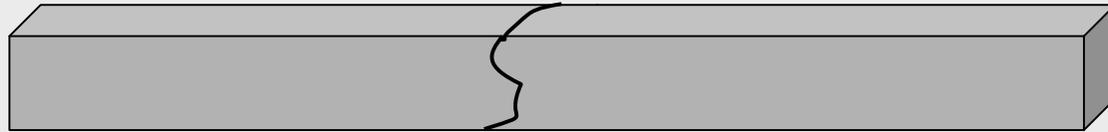
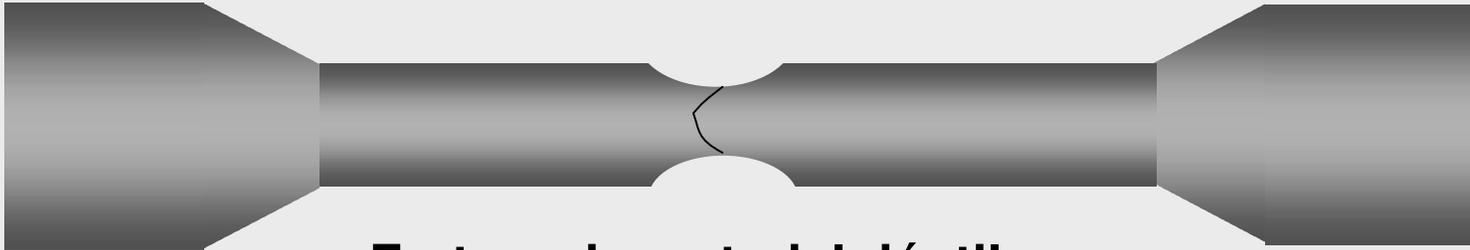


FIGURE 14.2 Metal deformation during (a) forging, (b) rolling, (c) extrusion, and (d) drawing.

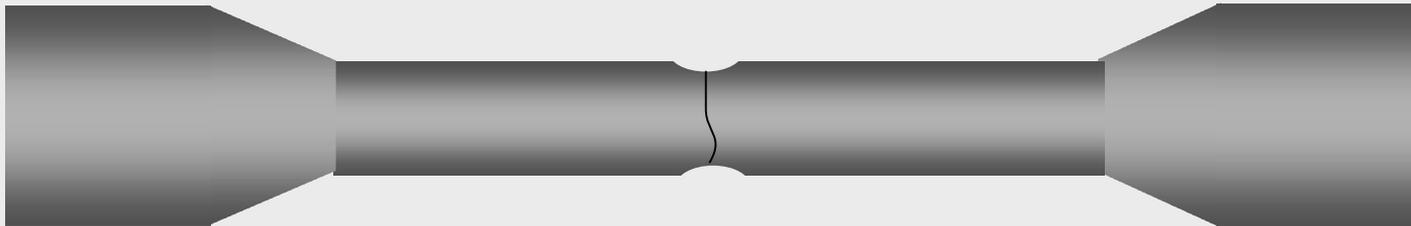
Aspecto da fratura de materiais



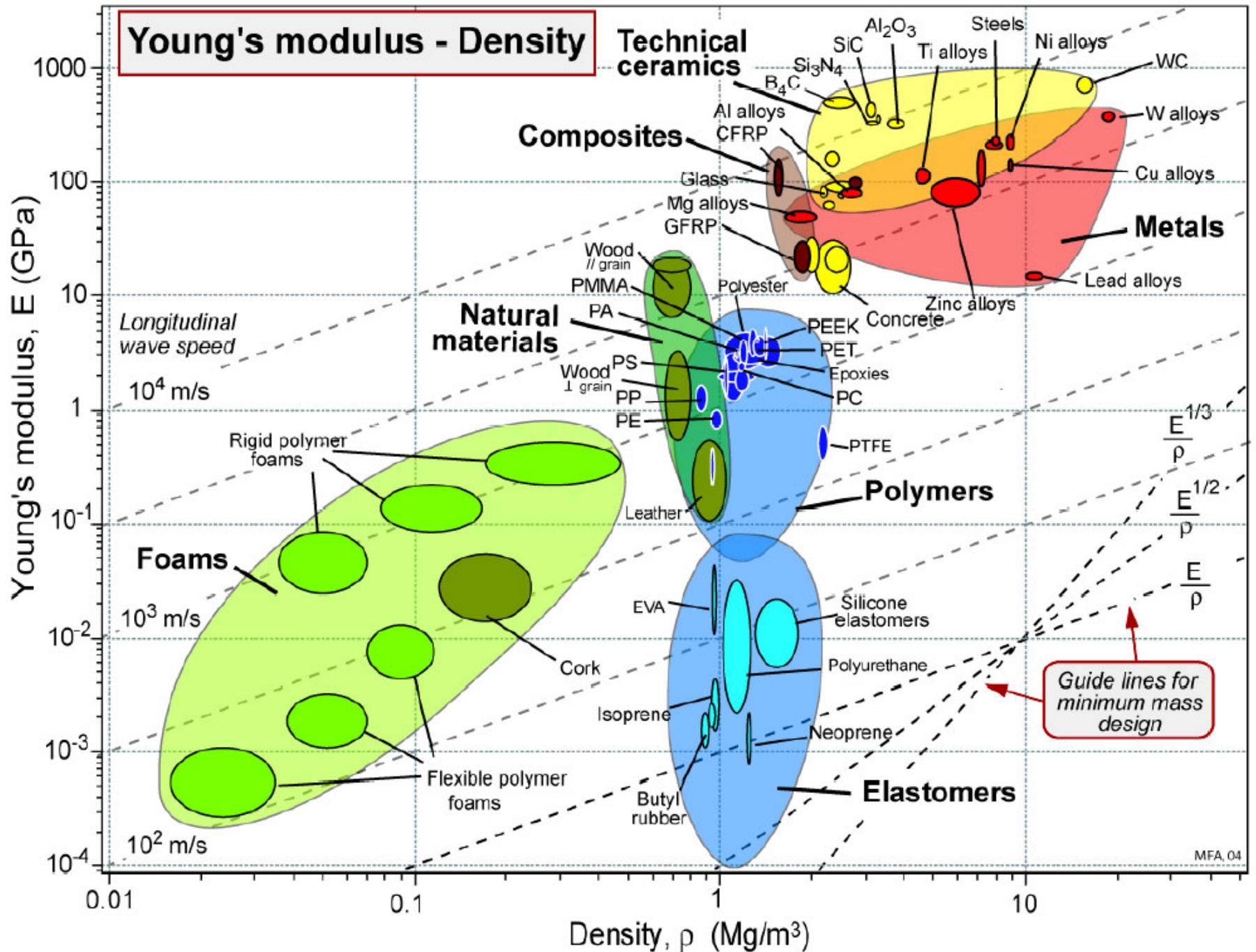
Fratura de material frágil



Fratura de material dúctil



Fratura de material tenaz



T- expansion - T- conductivity

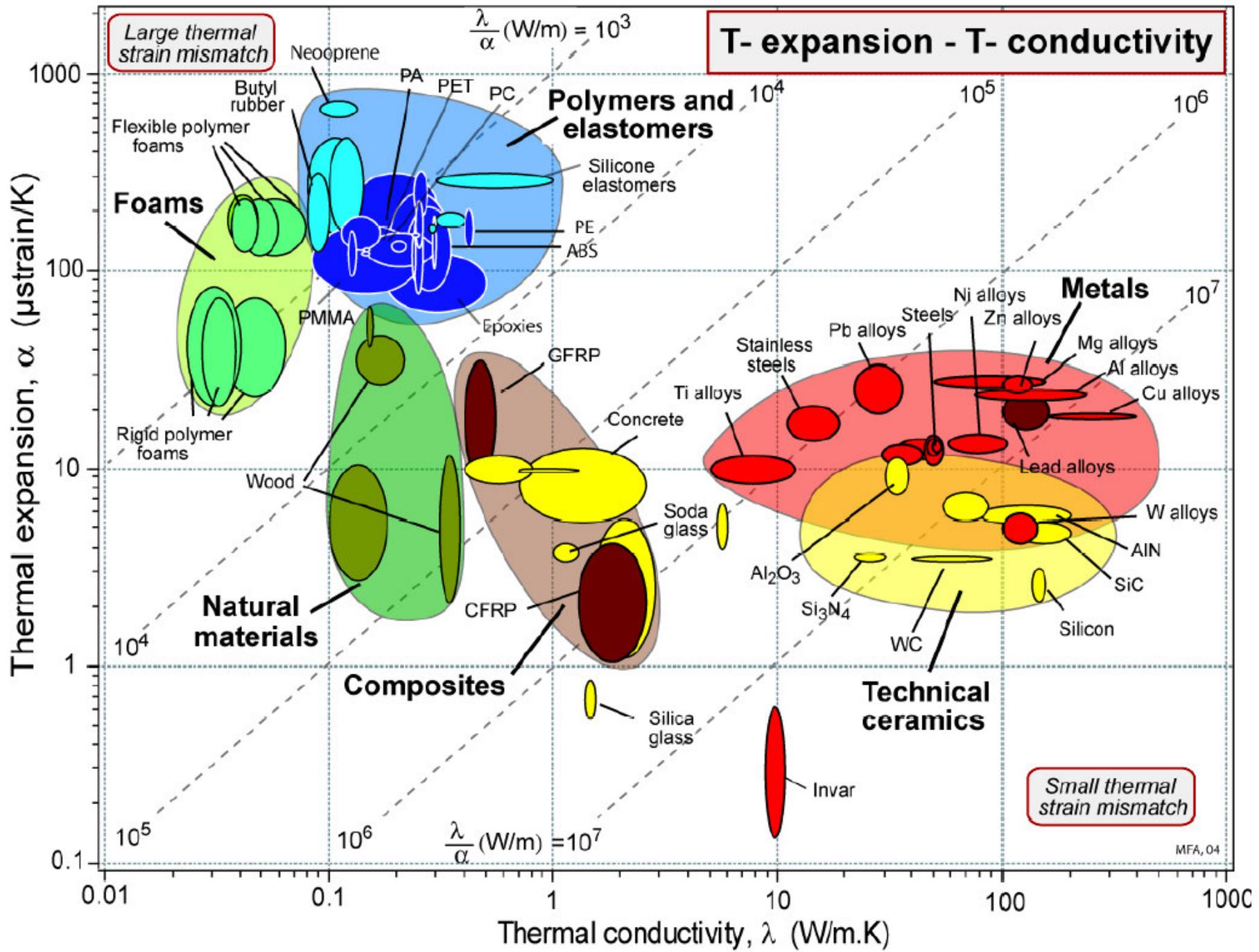


Tabela 1. Propriedades mecânicas de alguns materiais

MATERIAL	$\sigma_{esc.}$ [N/mm ²]	Resistência [N/mm ²]	Módulo de Elasticidade [N/mm ²]	Alonga- mento (%)	Coefficiente de Poisson
Magnésio	41	165 T	45.000	14	0,29
Prata	55	125 T	76.000	48	0,37
Alumínio (>99,5)	17	55 T	69.000	25	0,33
Ferro puro	130	260 T	207.000	45	0,27
Níquel (> 99)	138	483 T	207.000	40	0,31
Cobre (99,95)	69	220 T	110.000	45	0,35
Latão (70Cu+30Zn)	75	303 T	110.000	68	0,35
Bronze (92Cu+8Sn)	152	380 T	110.000	70	0,35
Titânio	240	330 T	107.000	30	0,34
Molibdênio		1600	324.000	35	
Tungstênio		2100	390.000		



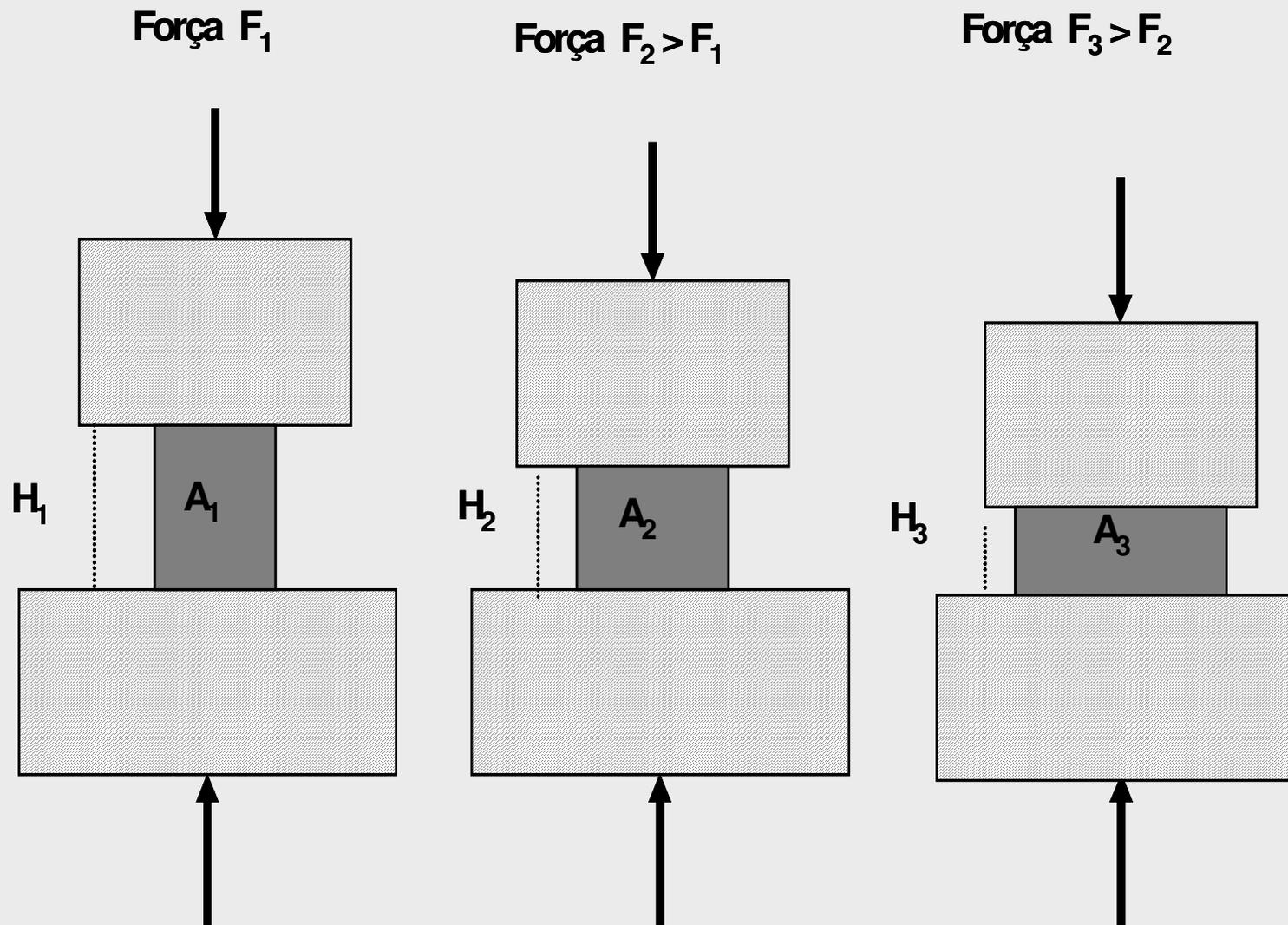
Continuação Tabela 1

MATERIAL	$\sigma_{esc.}$ [N/mm ²]	Resistência [N/mm ²]	Módulo de Elasticidade [N/mm ²]	Alonga- mento (%)	Coefficiente de Poisson
Aço 1040	350	520 T	207.000	30	0,30
Aço inox 310 – aust.	205	515 T	193.000	60	0,30
Aço inox 410- Mart.	275	483 T	200.000	30	0,30
Metal duro WC+10 % Co		2200-2600 F			
Al ₂ O ₃ sinterizado (5%poros)		210 a 340 F	370.000		0,26
Carbeto de Silício		170 F	470.000		0,19
Diamante		5000 Com.	1.000.000	0	
Grafita		3T, 8 F; 20°C	22.000		
Vidro de Borosilicato		69 F	69.000		0,20

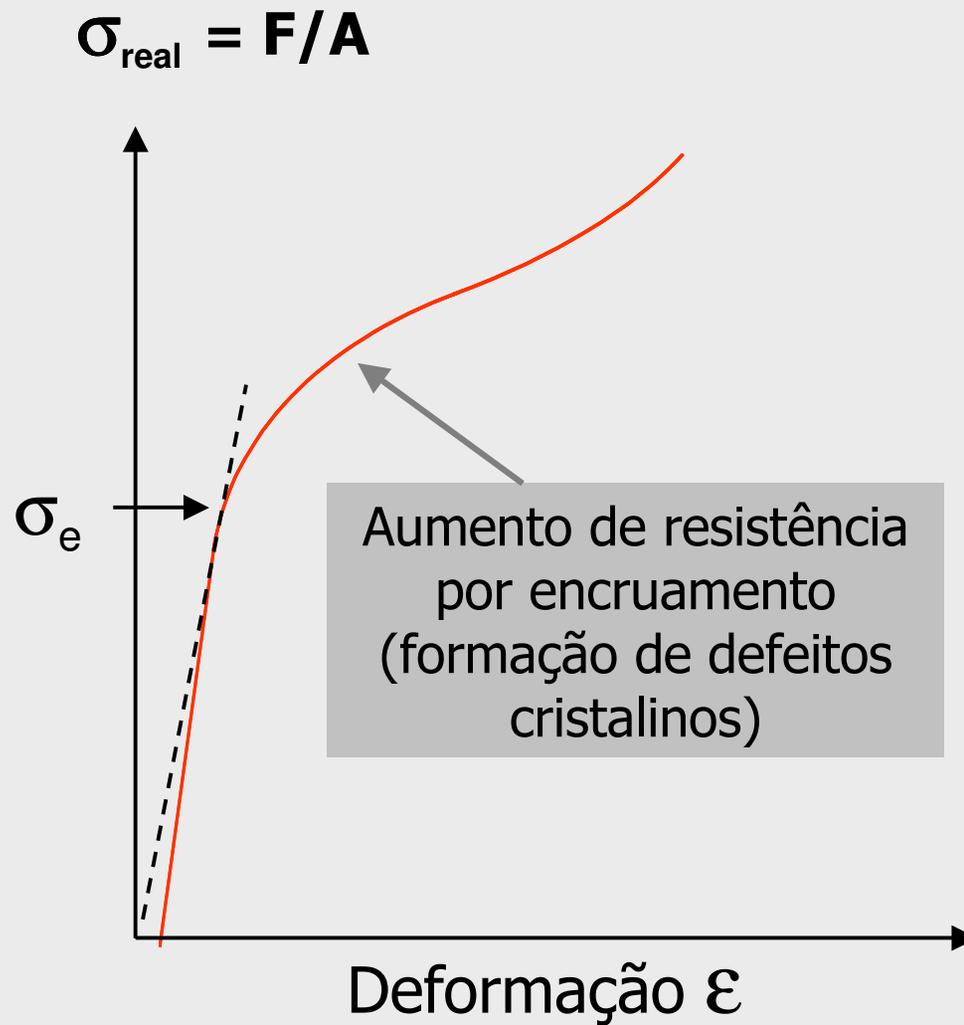
Continuação Tabela 1

MATERIAL	$\sigma_{esc.}$ [N/mm ²]	Resistência [N/mm ²]	Módulo de Elasticidade [N/mm ²]	Alonga- mento (%)	Coefficiente de Poisson
Carbeto de Boro Sinterizado (HP)		340 F	290.000		
Polietileno de alta densidade		28	830	15-100	
Poliéster		158	8960	2,7	
PVC (cloreto de polivinila)		41	2800	2-30	
nylon 66		82,7	2830	60	
ABS		28-48	2100	20-80	
Poliestireno vulcanizado		1,4 - 3,0	1,6	440- 600	
Polisopreno vulcanizado		17-25	1,3	750- 850	

ENSAIO DE COMPRESSÃO



ENSAIO DE COMPRESSÃO



Deformação em altura: $\epsilon_{\text{altura}} = \Delta_H / H_0$

Deformação em área: $\epsilon_A = \Delta_A / A_0$

Coefficiente de Poisson: $\nu = \epsilon_x / \epsilon_z = \epsilon_y / \epsilon_z$

O coeficiente de Poisson é a relação entre a deformação elástica no sentido da aplicação da força e a deformação elástica perpendicular a esta direção.

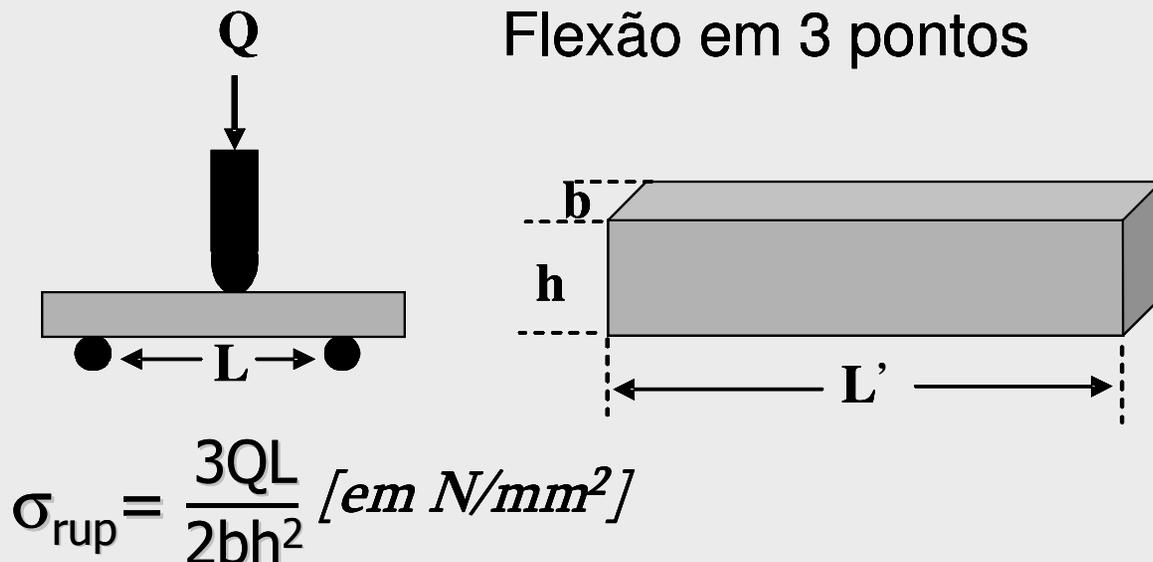
Os valores do coeficiente de Poisson da maioria dos materiais metálicos e cerâmicos encontram-se entre 0,26 e 0,35.

Ensaio de Ruptura por Flexão

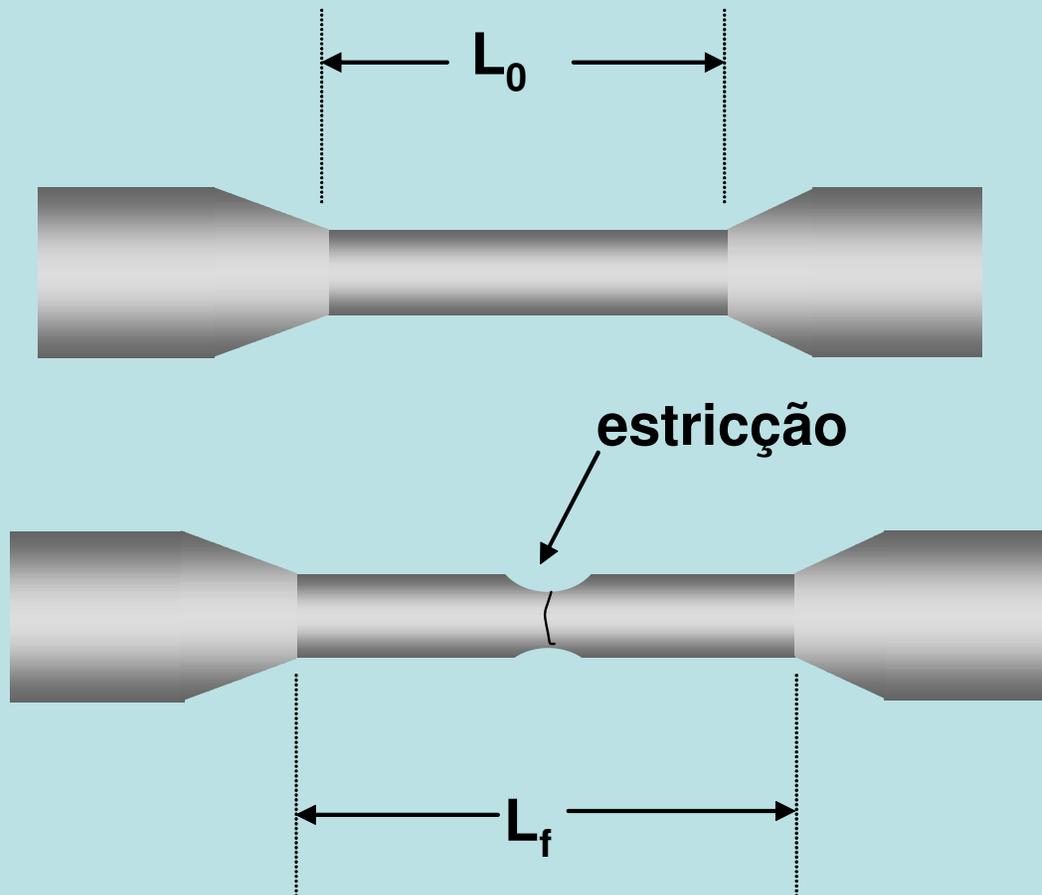
▶ Em materiais muito duros, o ensaio de tração é muito difícil de ser realizado na prática e, então, prefere-se utilizar o ensaio de flexão para determinar **a resistência do material**, neste caso, chamada de **resistência à ruptura por flexão**. 

▶ O ensaio de flexão é utilizado em todas as classes de materiais

▶ **Ensaio de flexão em três pontos** → ver figura.



CORPO DE PROVA DO ENSAIO DE TRAÇÃO



Cálculo da resistência à flexão:

▶ **Secção retangular:** $\sigma_{rup} = \frac{3QL}{2bh^2} [em N/mm^2]$

σ_{rup} é a resistência à ruptura por flexão (medida em N/mm^2 quando a força é dada em **N**);

Q a carga aplicada;

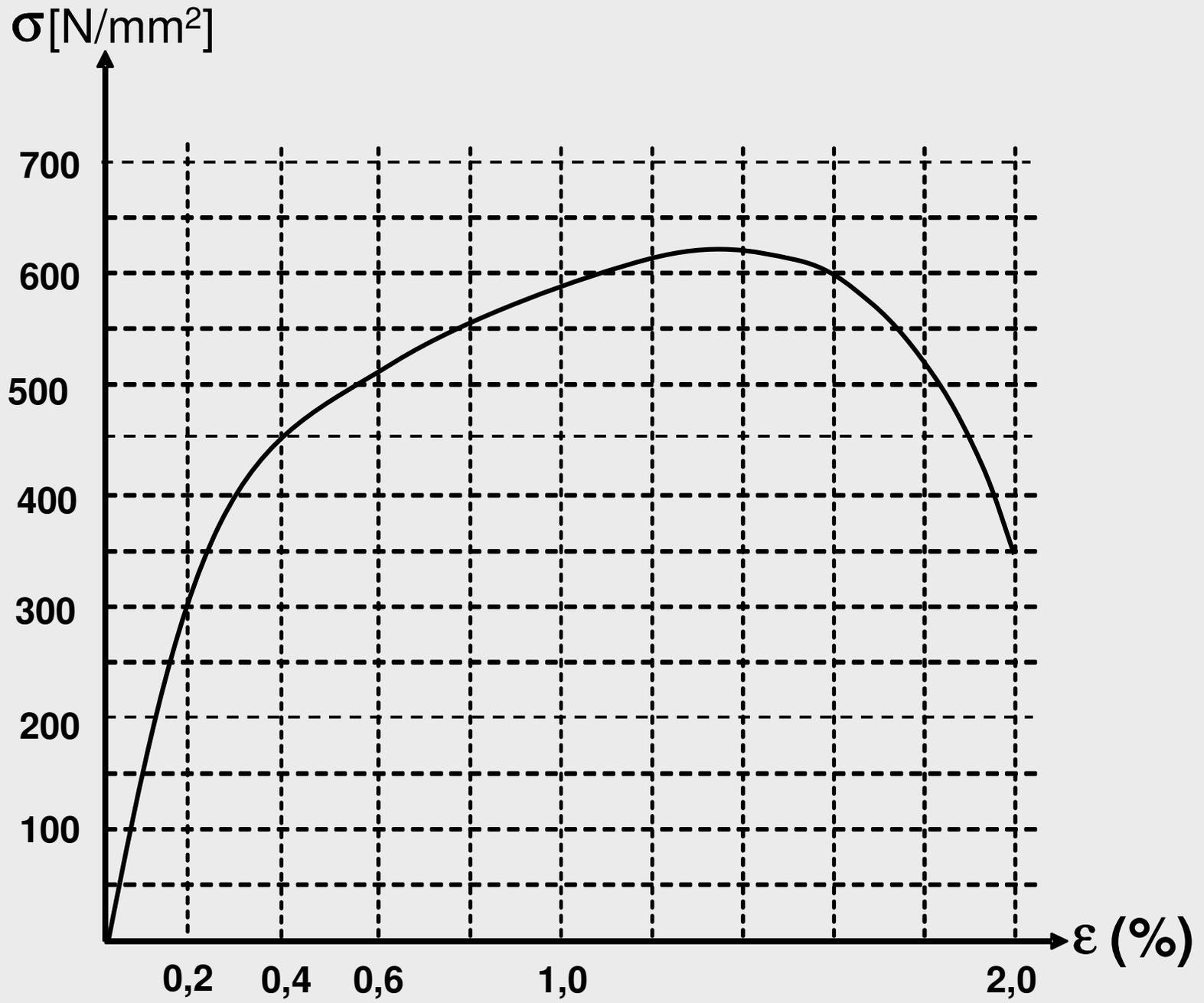
L = distância entre apoio, **b** = largura e **h** = altura do corpo de prova retangular

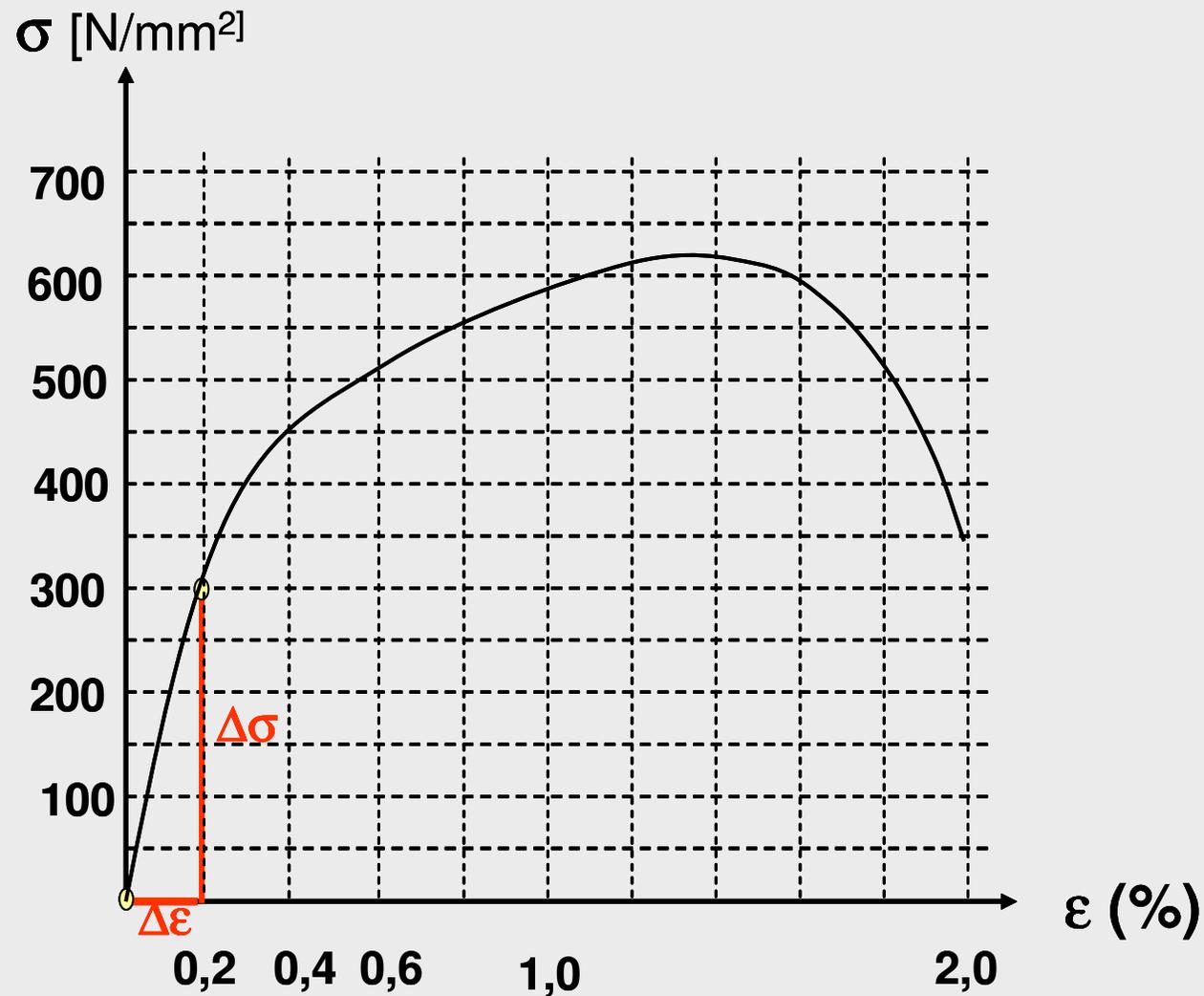
▶ **Seção circular:** $\sigma_{rup} = 2,546 \frac{QL}{D^3} [em N/mm^2]$

D é o diâmetro

EXERCÍCIOS

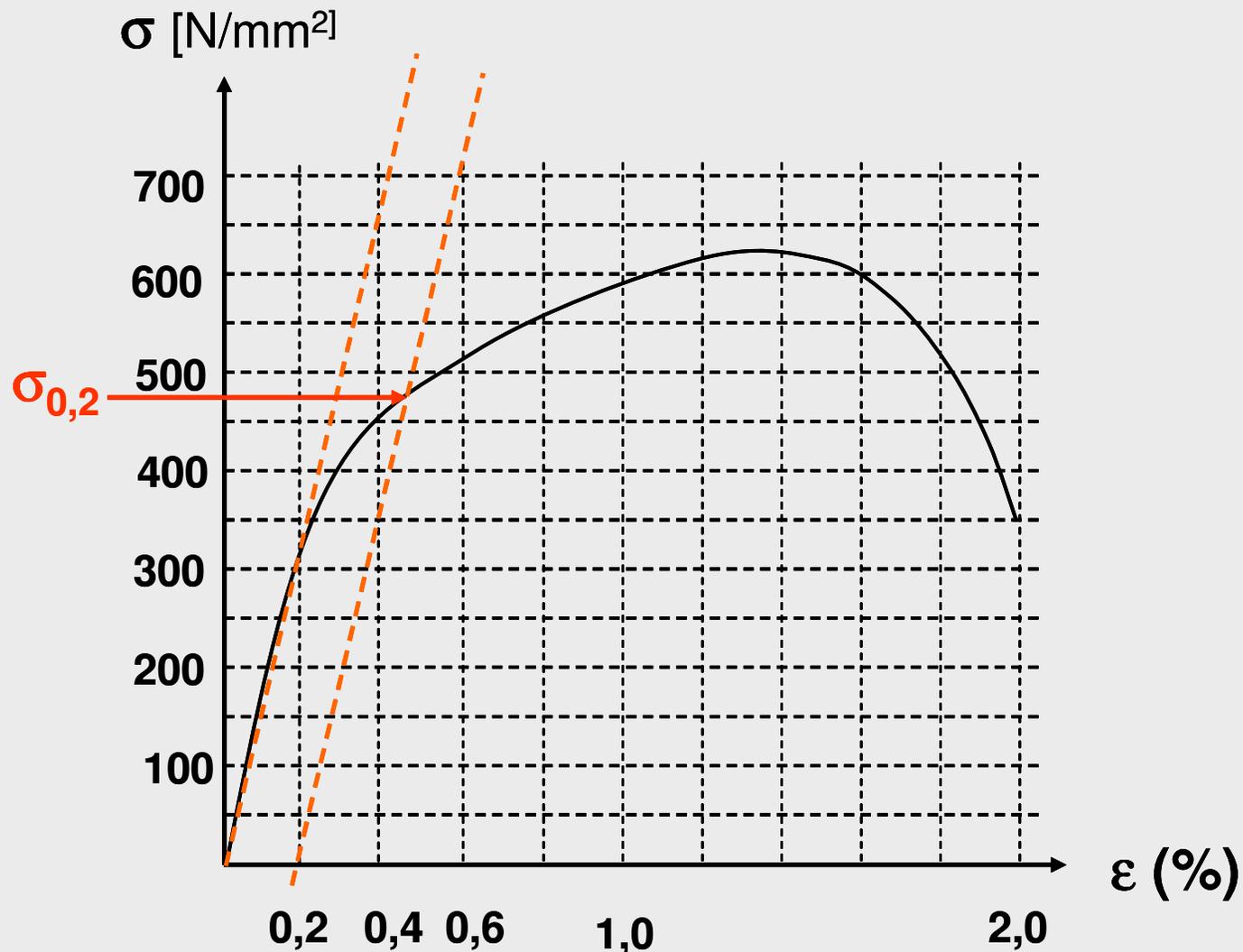
- 1) Baseado no resultado do ensaio de tração apresentado na figura a seguir, determinar:
 - a) Módulo de elasticidade do material;
 - b) Resistência do material ao escoamento;
 - c) Resistência à tração;
 - d) Alongamento.





a) Módulo de elasticidade do material

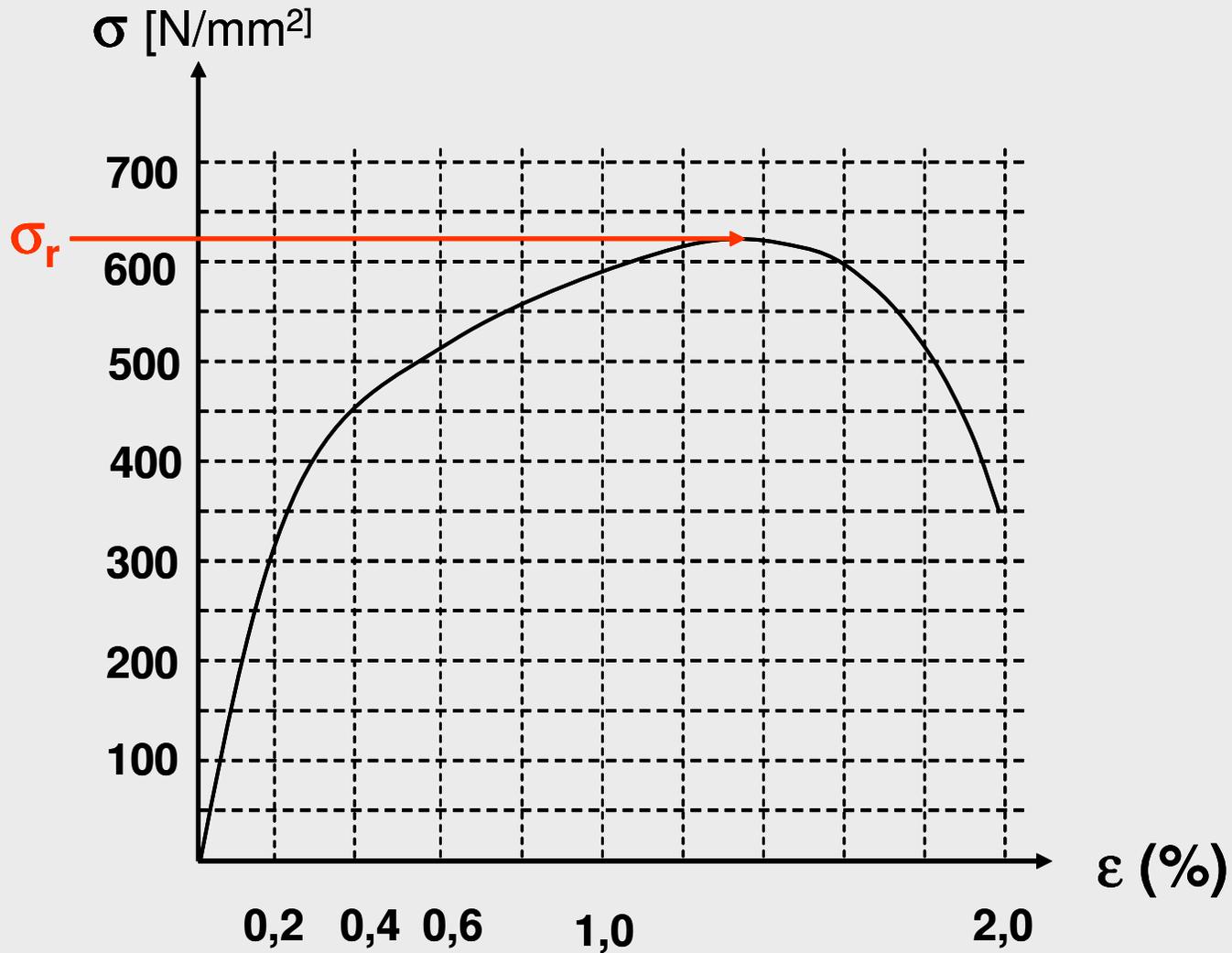
$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{300 \text{ N/mm}^2}{0,002\text{mm/mm}} = 150.000 \text{ N/mm}^2$$



b) Resistência do material ao escoamento

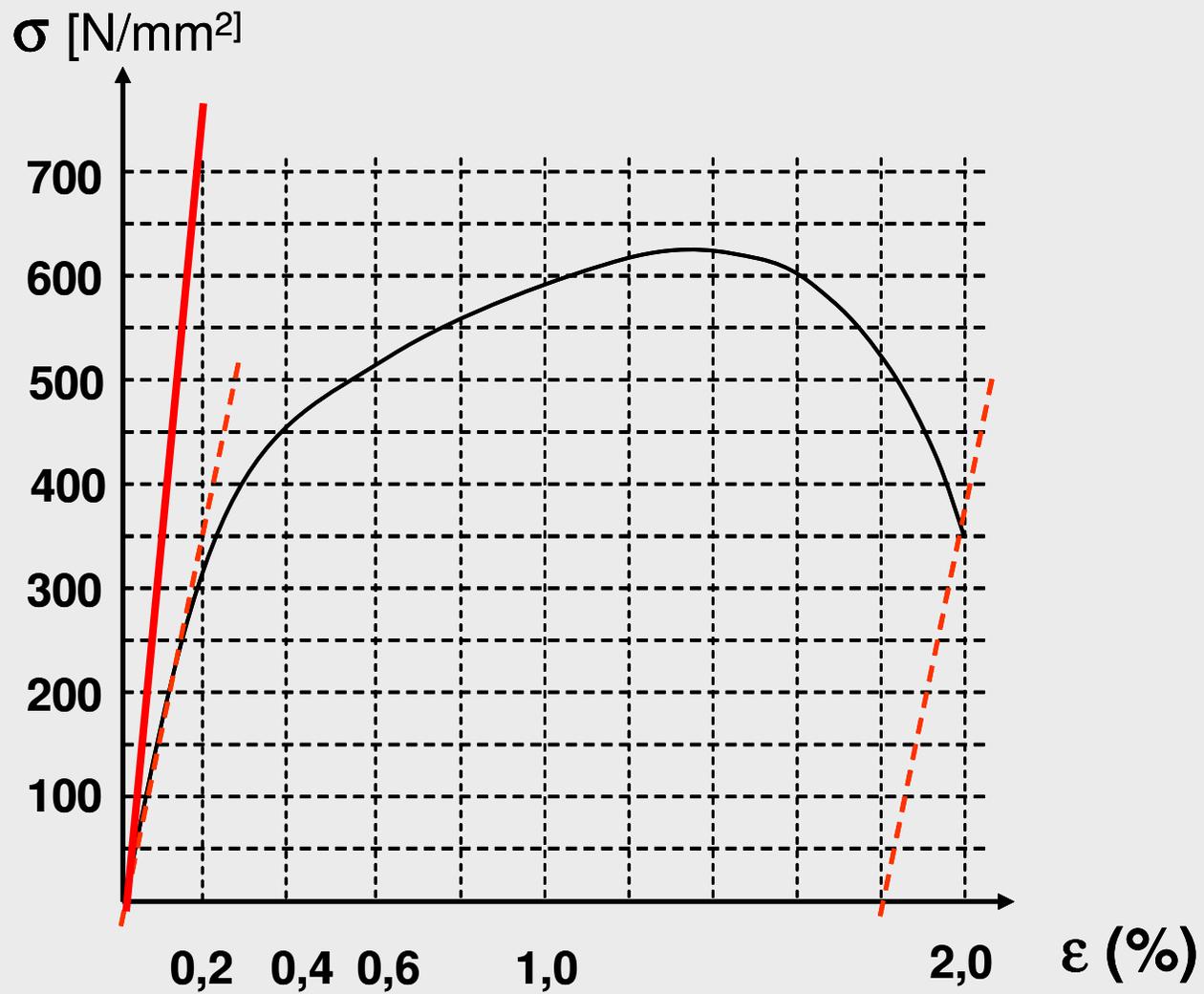
No caso, como não tem patamar de escoamento definido, utiliza-se o conceito de tensão de escoamento convencionalada, ou seja, $\sigma_{0,2}$

$$\sigma_{0,2} = 475 \text{ N/mm}^2$$



c) Resistência do material a tração

$$\sigma_r = 625 \text{ N/mm}^2$$



d) Alongamento obtido no ensaio de tração

$$A = 1,8\%$$

- 2) Baseado no resultado do ensaio de tração apresentado na figura a seguir, determinar:
- a) Módulo de elasticidade do material;
 - b) Resistência do material ao escoamento;
 - c) Resistência à tração;
 - d) Alongamento.

Tensão σ [N/mm²]

1400

1200

1000

800

600

400

200

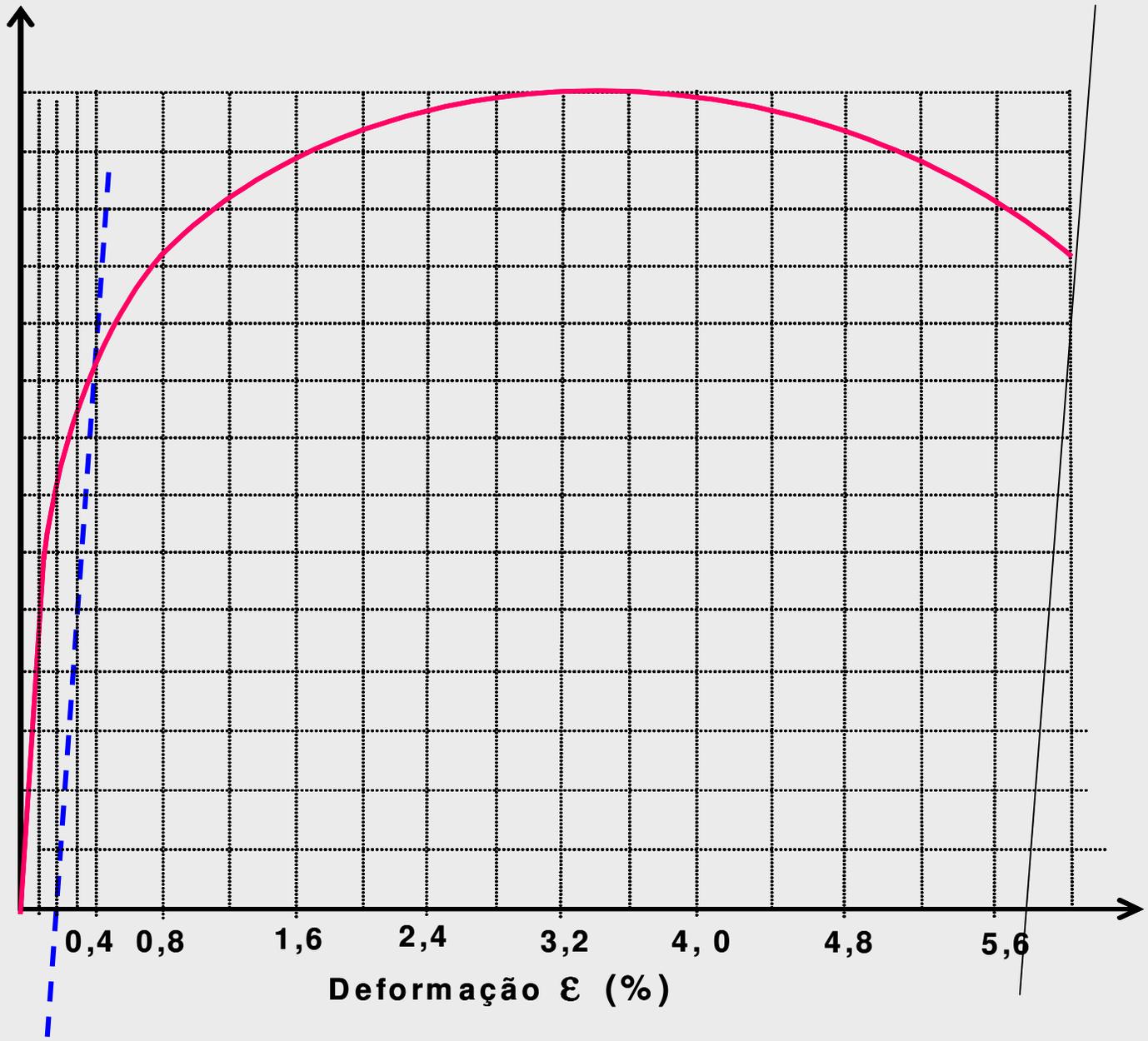
0,4 0,8

1,6 2,4

3,2 4,0

4,8 5,6

Deformação ϵ (%)



EXERCÍCIOS

- 2) Baseado no resultado do ensaio de tração apresentado na figura a seguir, determinar:
- Módulo de elasticidade do material;
 - Resistência do material ao escoamento;
 - Resistência à tração;
 - Alongamento.

SOLUÇÃO

$$a) E = \frac{500 \text{ N/mm}^2}{0,001 \text{ mm/mm}} = 5 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$$

$$b) \text{ Resistência ao escoamento: } \sigma_{\text{esc}} = \sigma_{0,2} = 900 \text{ N/mm}^2$$

$$c) \text{ Resistência a tração: } \sigma_r = 1400 \text{ N/mm}^2$$

$$d) \text{ Alongamento é aproximadamente } 5,8\%$$

3) Uma base de medida de 50 mm é adotada num fio de cobre. O fio é tracionado até que as marcas da base de medida assumam a distância de 59 mm. Calcule a deformação.

Solução: $\epsilon = \Delta L/L_0 = (59 - 50)/50 = 9/50 = 0,18 \text{ mm/mm}$, ou seja, 18%

4) Se o módulo de elasticidade médio de um aço é de 205.000 MPa, de quanto será estendido um fio de aço com diâmetro de 2,5 mm e comprimento inicial de 3 metros ao suportar uma carga de 4900N ?

Solução:

$$A = \pi R^2 = \pi (D/2)^2 = \pi D^2/4 \quad \text{OU} \quad \sigma = F/A = F/\pi R^2 \quad \text{ou} \quad 4F/\pi D^2$$

$$\epsilon = \Delta L/L_0 \quad \text{ou} \quad \Delta L = \epsilon L_0 \quad E = \sigma/\epsilon \quad \text{ou} \quad \epsilon = \sigma/E$$

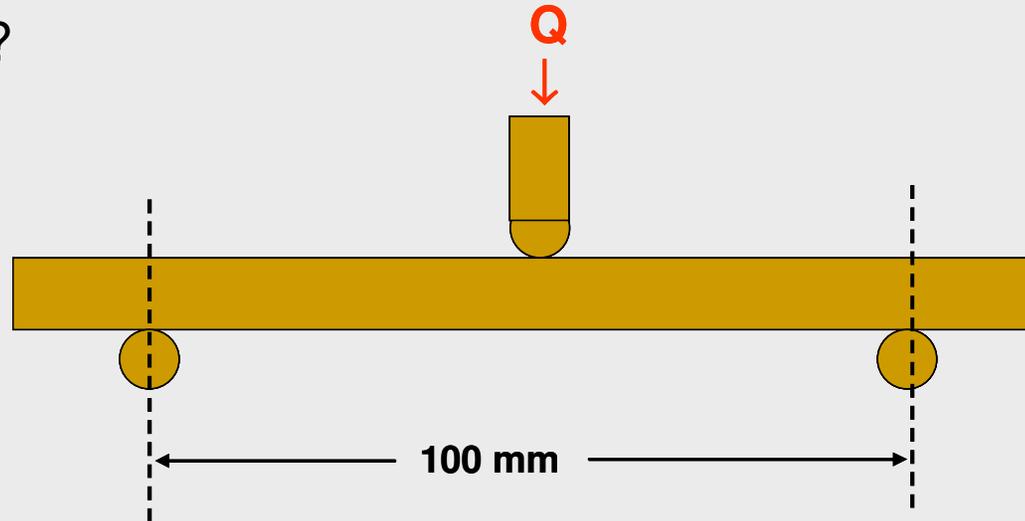
$$\text{Então, temos que } \Delta L = (\sigma/E) L_0 = [F/\pi R^2 E] L_0$$

$$\Delta L = 4.900 / [3,14 \times (1,25)^2 \times 205.000] \times 3000 = 14700000/1005781,25$$

$$\Delta L = 14,615 \text{ mm}$$

4) A resistência a ruptura por flexão de uma barra de secção quadrada de 10 x 10 mm é de 600 N/mm². Qual a carga mínima necessária para romper a barra por flexão sendo a distância entre os apoios de 100mm?

SOLUÇÃO



$$\sigma_{rup} = \frac{3QL}{2bh^2} \text{ [em N/mm}^2\text{]}$$

$$Q = \left(\frac{2bh^2}{3L} \right) \sigma_{rup}$$

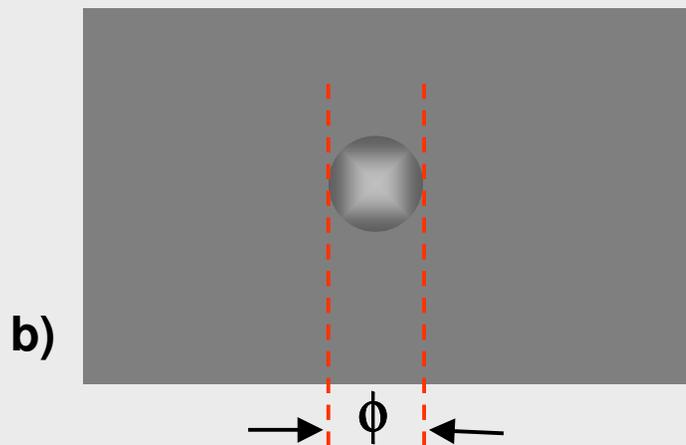
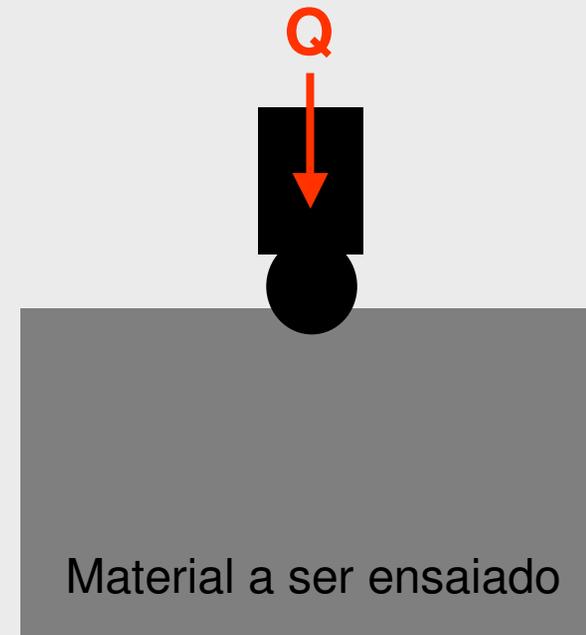
$$Q = \left(\frac{2000\text{mm}^3}{300\text{mm}} \right) 600\text{N/mm}^2 = 4000\text{N}$$

Ensaio de Dureza

Para a engenharia de materiais e a metalurgia, dureza é a resistência do material à deformação plástica;

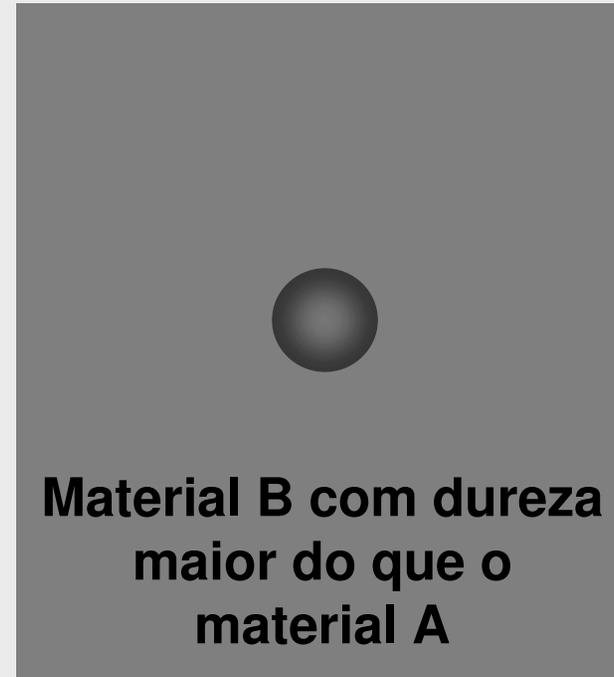
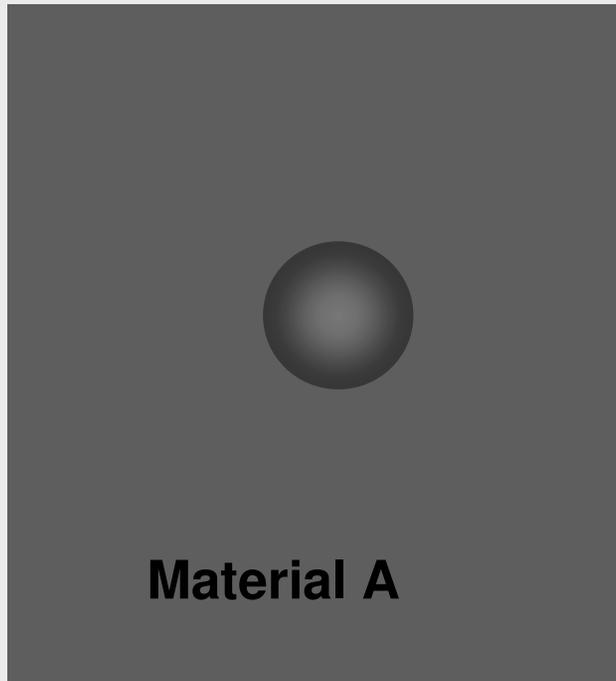
O ensaio de dureza:

Aplica-se uma carga Q através de um penetrador e mede-se o tamanho da marca de deformação deixada pelo mesmo (**impressão de dureza**).



A dureza do penetrador deve ser maior do que a da amostra a ser ensaiada

Materiais mais duros são mais resistentes a deformação plástica e deixam uma impressão menor



Métodos de ensaios de dureza

1) Por risco – Escala de dureza Mohs

Escala de dureza Mohs é uma tabela de 10 minerais padrões em que o anterior é riscado pelo posterior na seguinte ordem: ***talco, gipsita, calcita, fluorita, apatita, ortoclásio, quartzo, topázio, safira e diamante***. Portanto, ela serve para classificação de minérios “in loco”, no campo ou em laboratório.

Este tipo de medida de dureza é de grande utilidade na área de mineralogia e geologia, mas apresenta pouco interesse na área de materiais e metalurgia.

2) Dureza por penetração

No ensaio de dureza por penetração, aplica-se uma carga Q sobre a superfície polida do material a ser ensaiado através de um penetrador e mede-se a marca deixada pelo penetrador após a remoção da carga.



As principais escalas de dureza (ensaio por penetração):

a) Dureza Vickers

Penetrador: pirâmide de diamante com base quadrada, com um ângulo de 136 graus entre as faces opostas.

Através do penetrador (pirâmide de diamante) pode se aplicar cargas desde muito pequenas (microdurômetro Vickers, $Q < 1\text{N}$) até da ordem de 1500N (durômetro Vickers).

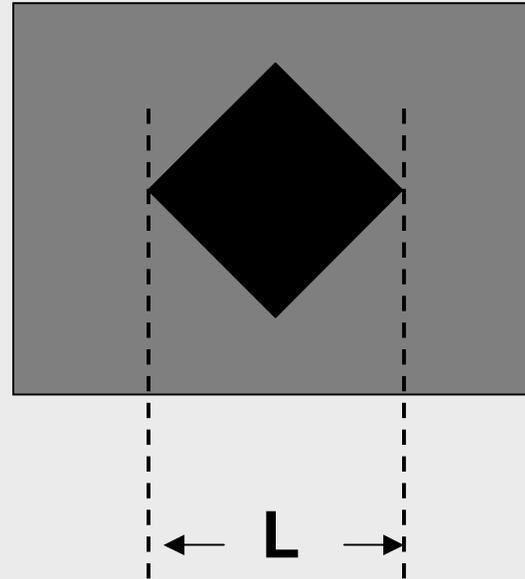
O microdurômetro Vickers serve para medir a dureza de cada fase distinta do material, desde que a impressão de microdureza seja menor que o tamanho de partícula da fase.

¹⁷ ASTM Standard E 92, “Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials,” and ASTM Standard E 384, “Standard Test for Microhardness of Materials.”

$$HV = 1,8544Q/L^2 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Q = carga aplicada no ensaio, isto é, ao penetrador de diamante

L = medida da diagonal da impressão de dureza.

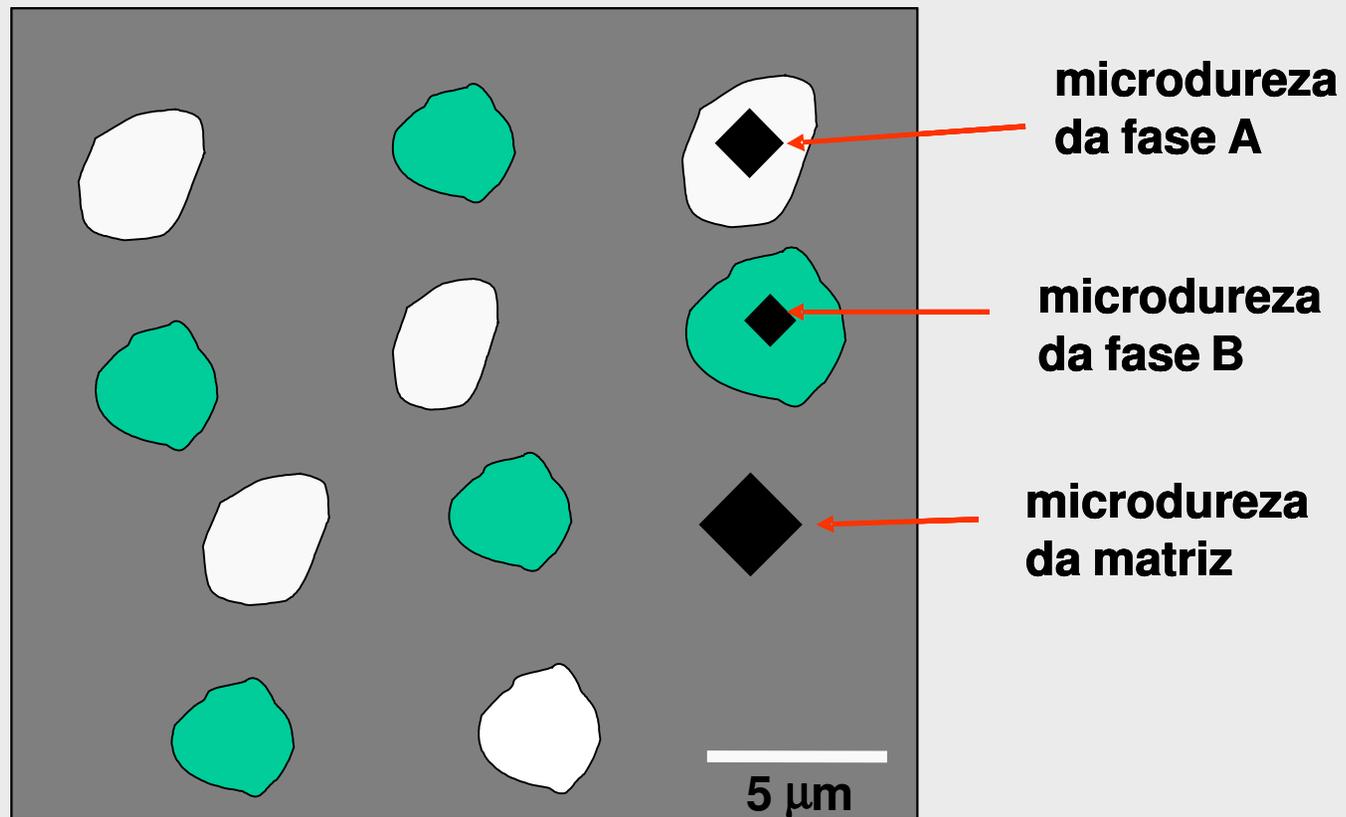


Lei de Meyer:

Para boa parte dos metais observa-se que $HV \sim 3\sigma_e$, onde σ_e é a tensão de escoamento do material

A escala Vickers é muito utilizada na pesquisa porque permite comparação dos materiais entre si, desde os de dureza mais baixa (metais) até os muito duros (cerâmica)

Microdureza em um material polifásico



¹⁷ ASTM Standard E 92, "Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials," and ASTM Standard E 384, "Standard Test for Microhardness of Materials."

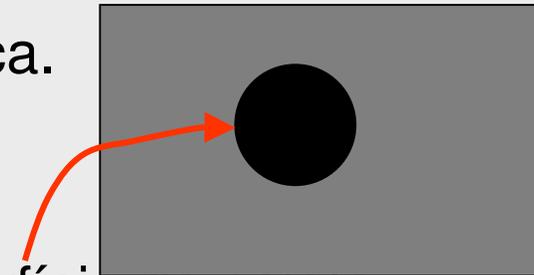
b) Dureza Brinell

Penetrador: esfera de aço temperado; aplica-se carga Q através da esfera; mede-se a calota esférica.

$$HB = Q/S_c = Q/\pi D p \text{ (em N/mm}^2\text{)}$$

D = Diâmetro; Q = carga; S_c = Superfície da calota

p = profundidade da impressão (deformação plástica).



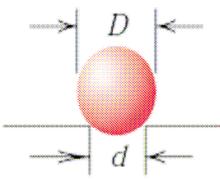
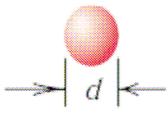
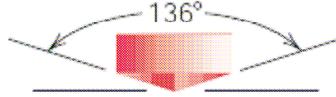
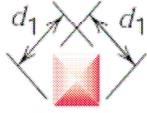
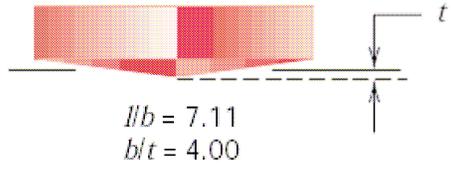
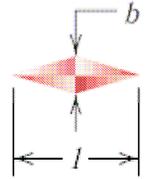
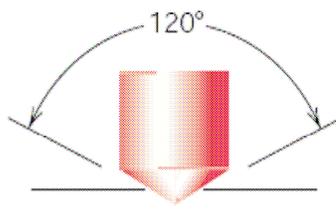
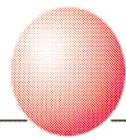
A dureza Brinell ou seja, a **escala Brinell** é muito utilizada em metais de elevada a média ductilidade, isto é, metais não muito duros

¹⁷ ASTM Standard E 92, "Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials," and ASTM Standard E 384, "Standard Test for Microhardness of Materials."

c) Dureza Rockwell

Penetrador: Vários; o principal é um cone de diamante. O ensaio é baseado na profundidade de penetração subtraída da recuperação elástica. Muito utilizado para medir a dureza de aços duros (aços temperados ou aços temperados + revenidos)

Table 7.4 Hardness Testing Techniques

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number ^a
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> Diamond cone $\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}$ in. diameter steel spheres 	 	 	<ul style="list-style-type: none"> 60 kg 100 kg 150 kg } Rockwell <ul style="list-style-type: none"> 15 kg 30 kg 45 kg } Superficial Rockwell	

^a For the hardness formulas given, P (the applied load) is in kg, while D , d , d_1 , and l are all in mm.

Source: Adapted from H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*. Copyright © 1965 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.

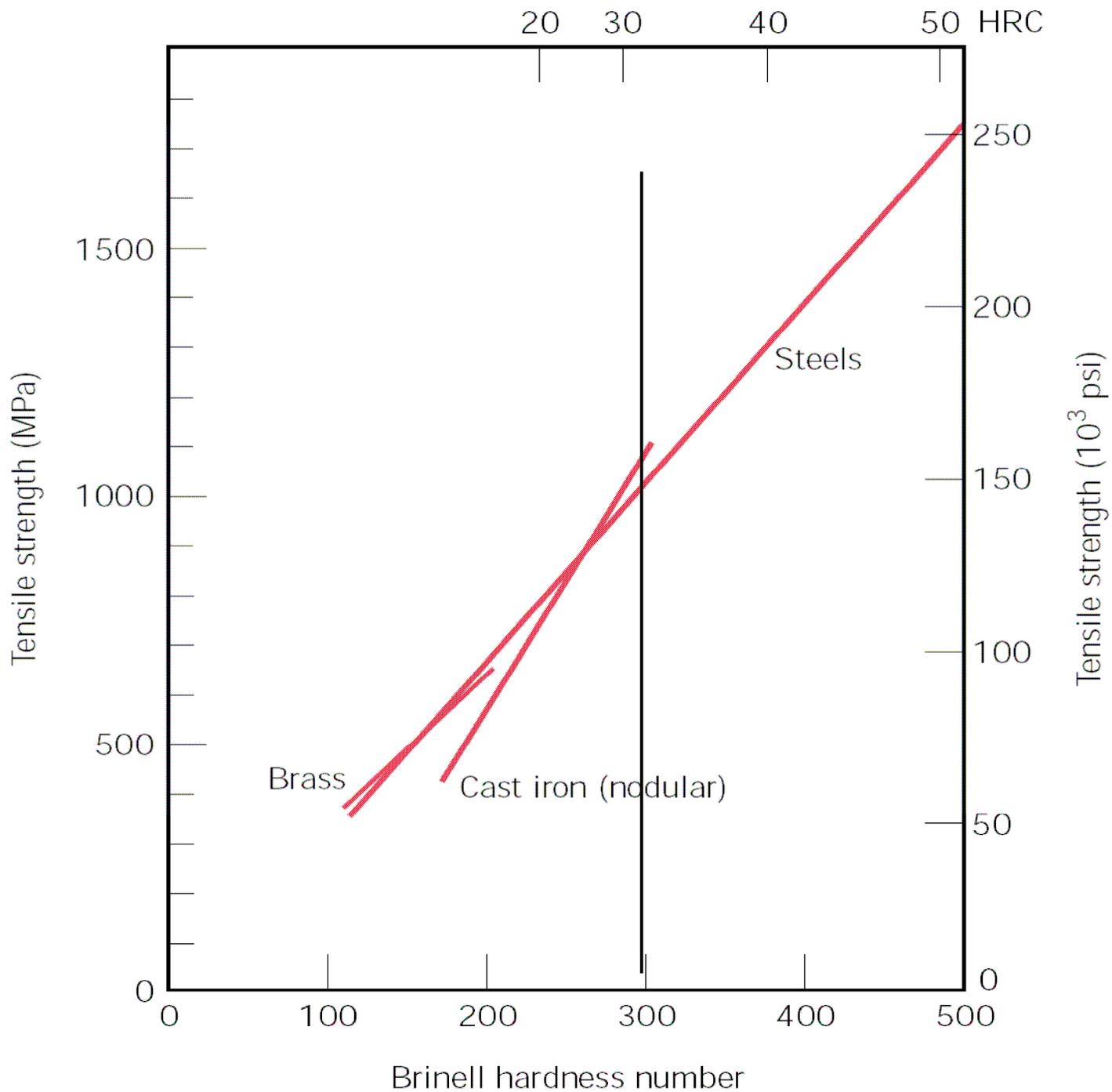


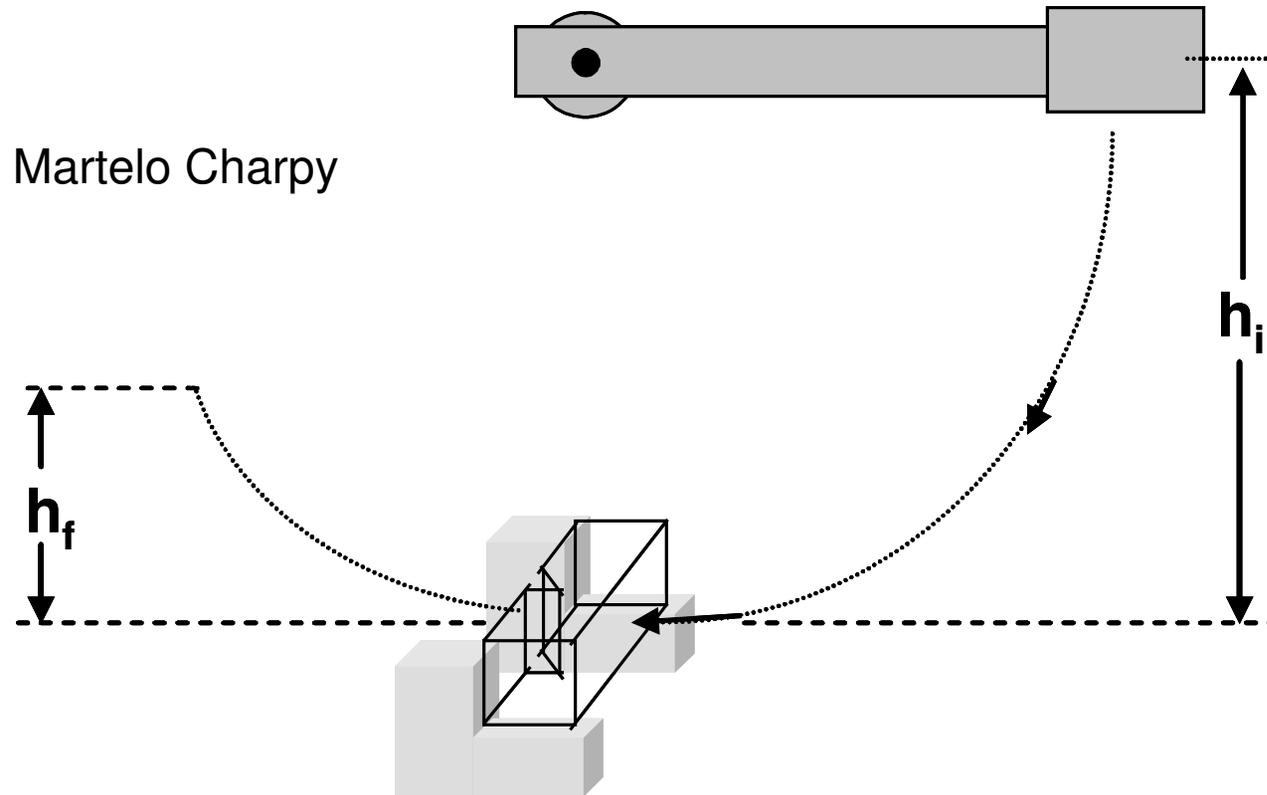
Figura 7.31 – Correlação entre dureza e resistência a tração para aços, latão e ferro fundido (Data taken from Metals Handbook)

Table 7.6 Approximate Knoop Hardness (100 g load) for Seven Ceramic Materials

<i>Material</i>	<i>Approximate Knoop Hardness</i>
Diamond (carbon)	7000
Boron carbide (B_4C)	2800
Silicon carbide (SiC)	2500
Tungsten carbide (WC)	2100
Aluminum oxide (Al_2O_3)	2100
Quartz (SiO_2)	800
Glass	550

Resistência ao Impacto

Resistência ao impacto / Ensaio de impacto



Representação esquemática do ensaio de impacto tipo charpy

A diferença entre a altura h_i e h_f está correlacionada com a perda da energia do martelo gasta para romper o corpo de prova.

Corpos de prova para ensaios de impacto:

Existem dois tipos e são especificados pela norma ASTM E-23

- corpo de prova Charpy e,
- corpo de prova Izod.

Os corpos de prova para o ensaio Charpy são retangulares com as dimensões: $h = b = 10 \text{ mm}$ e $L = 55 \text{ mm}$.

Um entalhe é feito no meio do corpo de prova para facilitar a fratura.

Existem 3 tipos de entalhes praticados:



Charpy tipo A
(entalhe em V)



Charpy tipo B
(entalhe em forma de buraco de fechadura)



Charpy tipo C
(entalhe em U)

55 mm

Ensaio de impacto IZOD

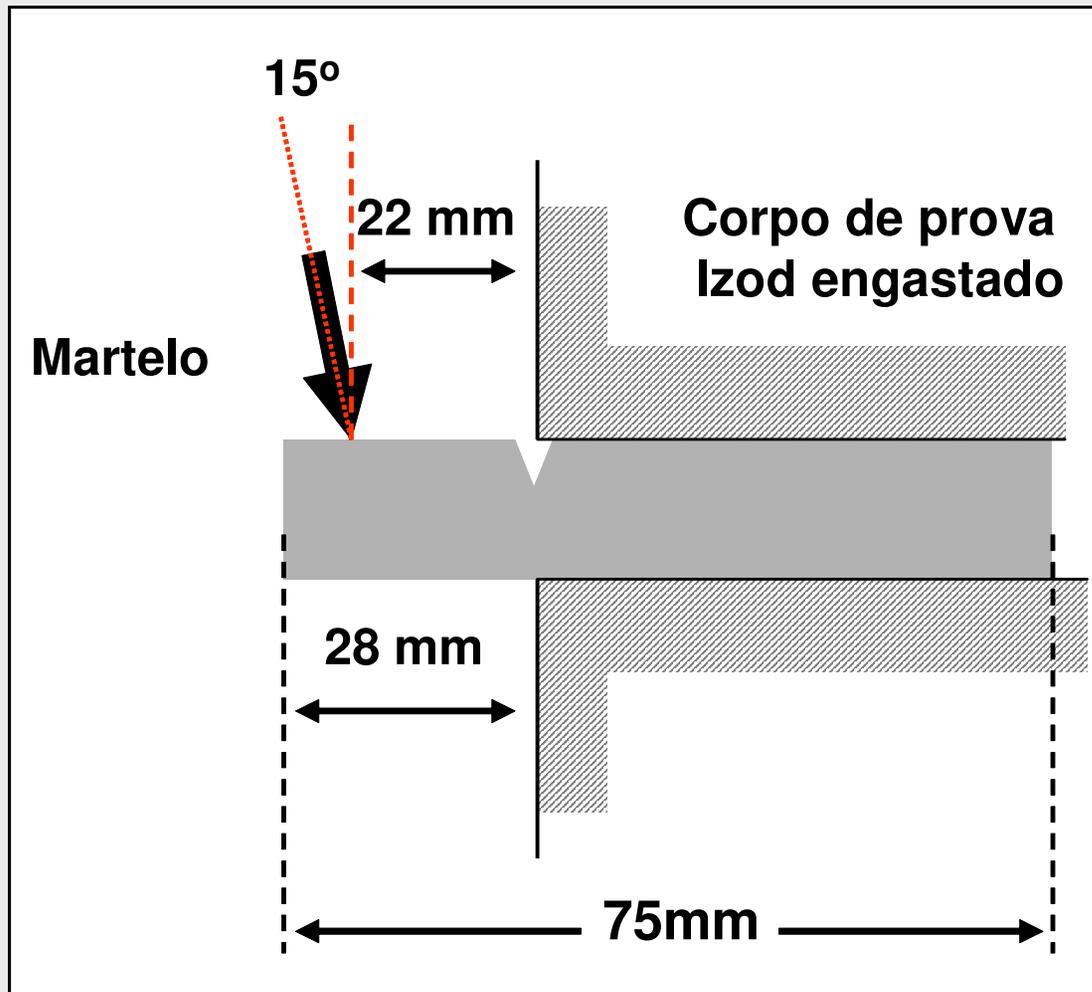
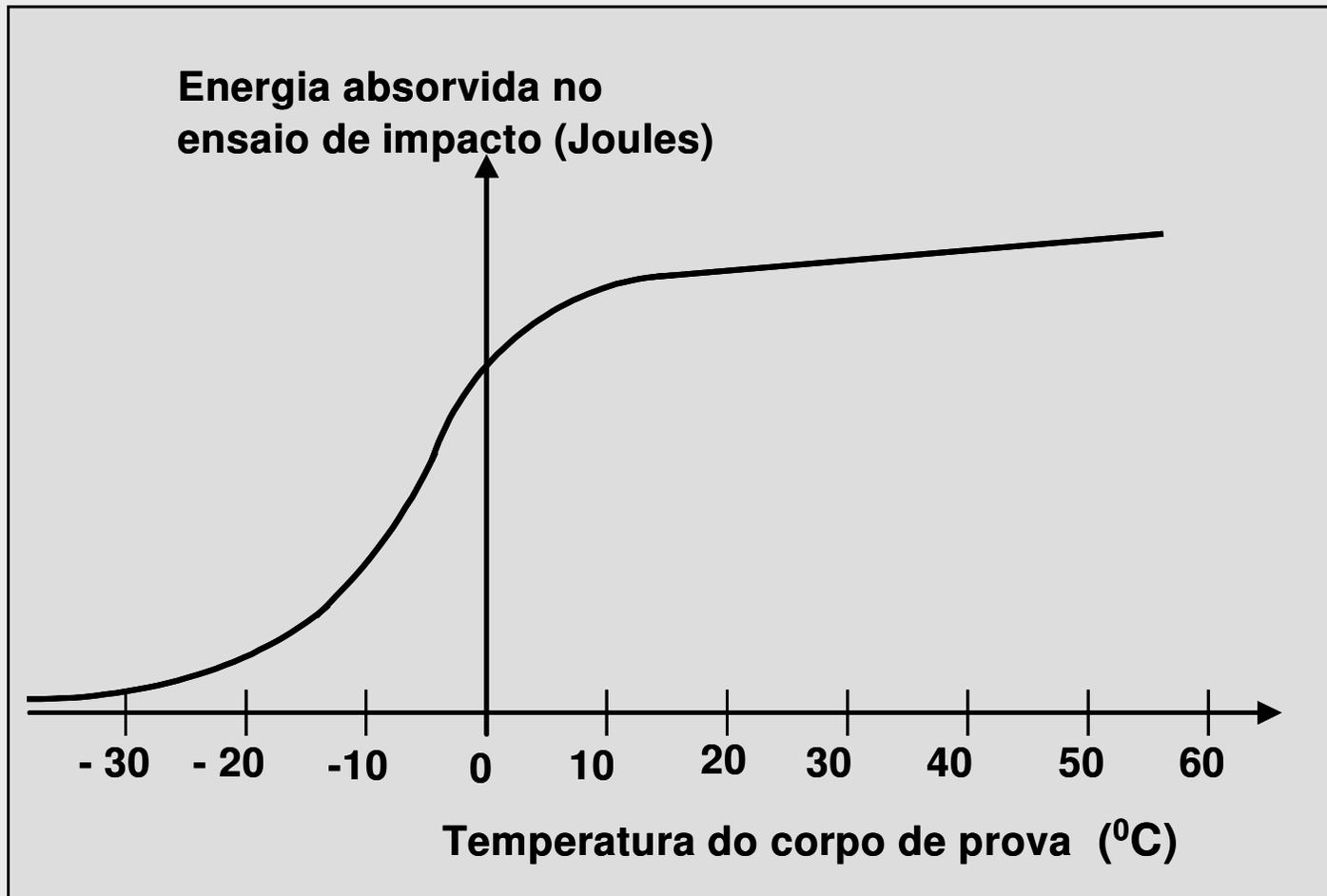


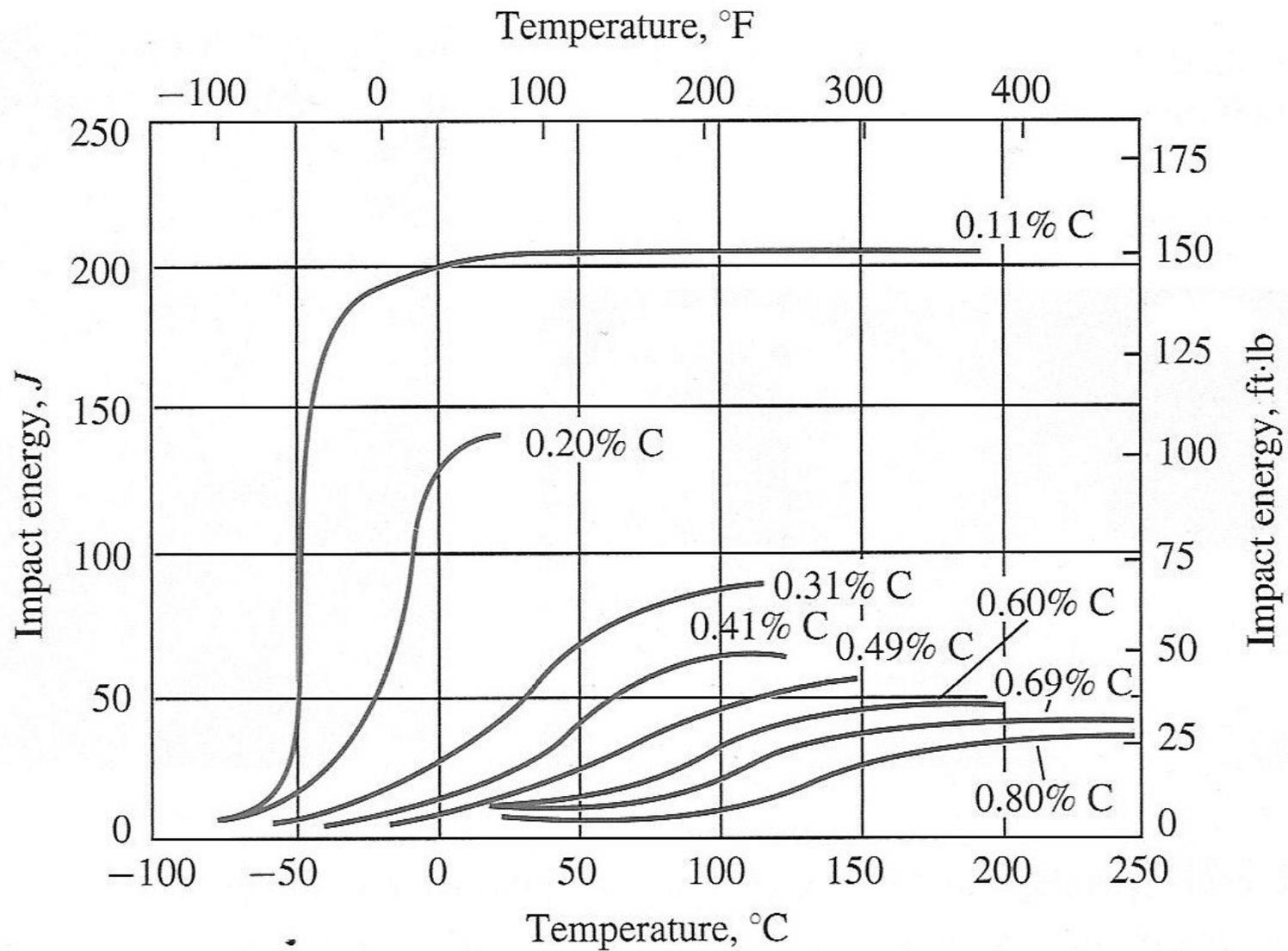
TABLE 7.15**IMPACT TEST (CHARPY) DATA FOR THE ALLOYS OF TABLE 7.10**

Alloy	Impact energy [J (ft · lb)]
1. 1040 carbon steel	180 (133)
2. 8630 low-alloy steel	55 (41)
3. c. 410 stainless steel	34 (25)
4. L2 tool steel	26 (19)
5. Ferrous superalloy (410)	34 (25)
6. a. Ductile iron, quench	9 (7)
7. b. 2048, plate aluminum	10.3 (7.6)
8. a. AZ31B magnesium	4.3 (3.2)
b. AM100A casting magnesium	0.8 (0.6)
9. a. Ti-5Al-2.5Sn	23 (17)
10. Aluminum bronze, 9% (copper alloy)	48 (35)
11. Monel 400 (nickel alloy)	298 (220)
13. 50:50 solder (lead alloy)	21.6 (15.9)
14. Nb-1 Zr (refractory metal)	174 (128)

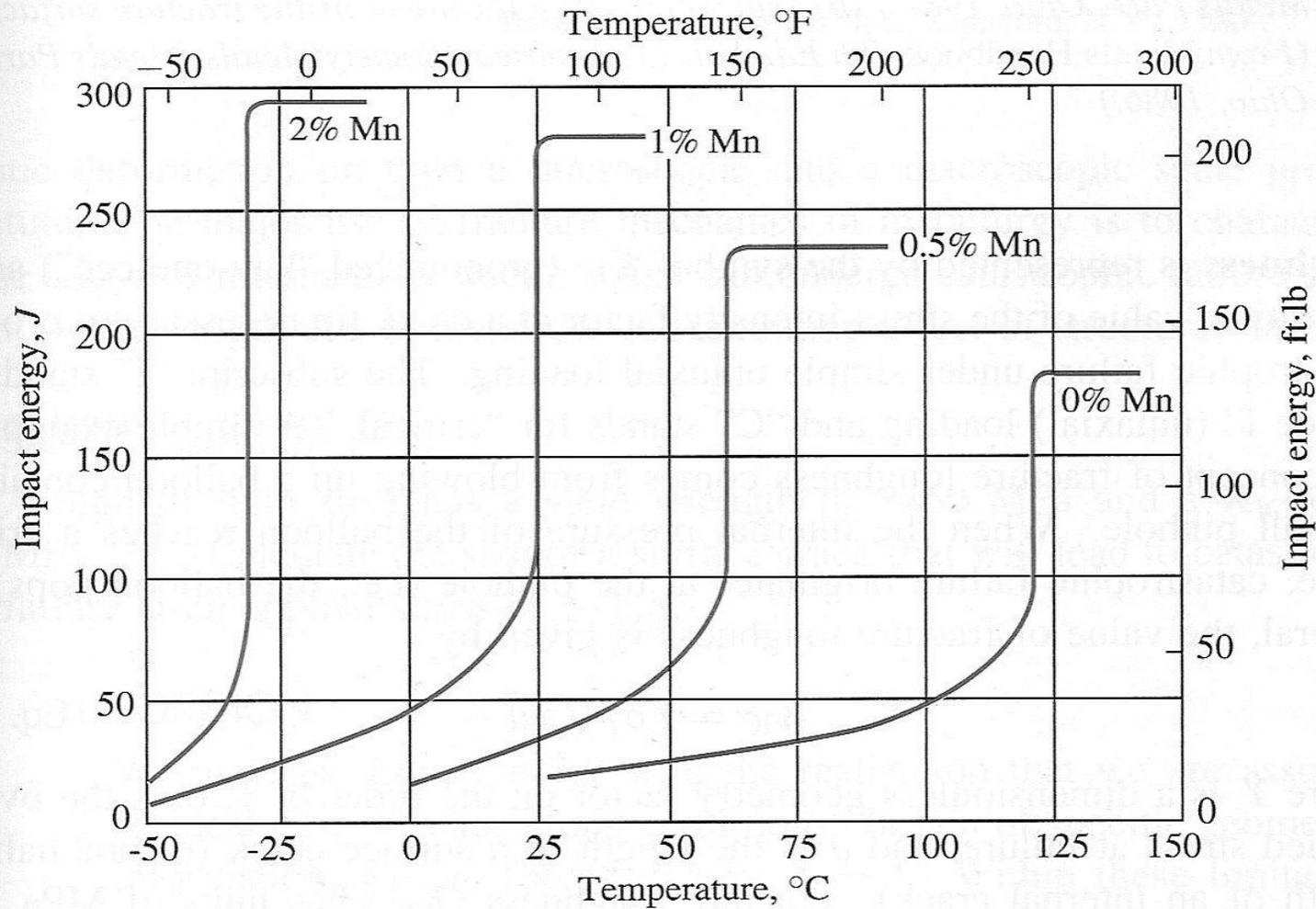


A resistência ao impacto dos materiais metálicos varia com a temperatura. Eles possuem uma transição de dúctil para frágil em determinada faixa de temperaturas, de acordo com a composição química e a microestrutura do aço.

Aços especiais para que mantém elevada energia de impacto em temperaturas baixas chamam-se aços criogênicos.



(a)



(b)

FIGURE 7-20 Variation in ductile-to-brittle transition temperature with alloy composition. (a) Charpy V-notch impact energy with temperature for plain-carbon steels with various carbon levels (in weight percent). (b) Charpy V-notch impact energy with temperature for Fe-Mn-0.05 C alloys with various manganese levels (in weight percent). (From Metals Handbook, 9th Ed., Vol. 1, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1978.)

Observações:

- ▶ O ensaio de impacto é um ensaio dinâmico, isto é, a energia de impacto é transferida de forma instantânea ao corpo de prova. Mede-se a energia necessária para ocasionar a fratura.
- ▶ O resultado do ensaio só serve para comparar entre si materiais ensaiados nas mesmas condições; Entretanto, não fornece indicações seguras sobre o comportamento ao impacto de peças em geral.
- ▶ Indicações mais seguras sobre o comportamento ao impacto de uma peça só são possíveis de serem obtidas se pudermos ensaiar a peça inteira sob as condições que ocorrem na prática (situação real de uso da peça).
- ▶ Quanto maior a energia absorvida no ensaio de impacto (para materiais ensaiados nas mesmas condições) mais tenaz é o material.
- ▶ O teste não faz sentido para materiais cerâmicos.

K_{IC} = Tenacidade a fratura (Fracture toughness)

→ é o valor crítico do fator de tensão em uma ponta de trinca necessária para produzir fratura sob carregamento uniaxial simples (ver figura)

$$K_{IC} = Y \sigma_f \sqrt{\pi a}$$

Y = fator geométrico adimensional aproximadamente 1 (unidade);

a = Comprimento da trinca superficial (ou metade de trinca interna)

σ_f = Tensão de fratura aplicada

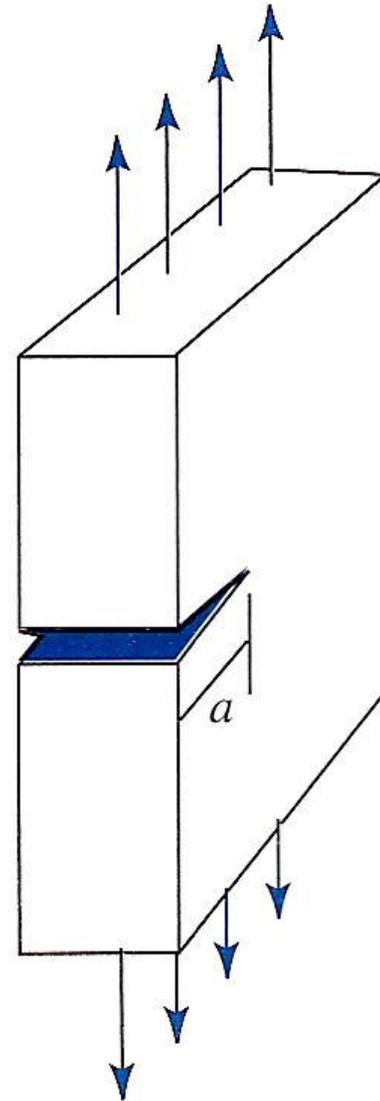


FIGURE 7-22 *Fracture toughness test.*

TABLE 7.16 TYPICAL VALUES OF FRACTURE TOUGHNESS (K_{Ic}) FOR VARIOUS METALS AND ALLOYS

Metal or alloy	K_{Ic} (MPa \sqrt{m})
Mild steel	140
Medium-carbon steel	51
Rotor steels (A533; Discalloy)	204–214
Pressure-vessel steels (HY130)	170
High-strength steels (HSS)	50–154
Cast iron	6–20
Pure ductile metals (e.g., Cu, Ni, Ag, Al)	100–350
Be (brittle, hcp metal)	4
Aluminum alloys (high strength–low strength)	23–45
Titanium alloys (Ti-6Al-4V)	55–115

SOURCE: Data from M. F. Ashby and D. R. H. Jones, *Engineering Materials—An Introduction to Their Properties and Applications*, Pergamon Press, Inc., Elmsford, N.Y., 1980.

SAMPLE PROBLEM 7.9

A high-strength steel has a yield strength of 1460 MPa and a K_{IC} of 98 MPa $\sqrt{\text{m}}$. Calculate the size of a surface crack that will lead to catastrophic failure at an applied stress of $\frac{1}{2}$ Y.S.

SOLUTION

We may use Equation 7.9 with the realization that we are assuming an ideal case of plane strain conditions. In lieu of specific geometrical information, we are forced to take $Y = 1$. Within these limitations, we can calculate

$$K_{IC} = Y\sigma_f\sqrt{\pi a}$$

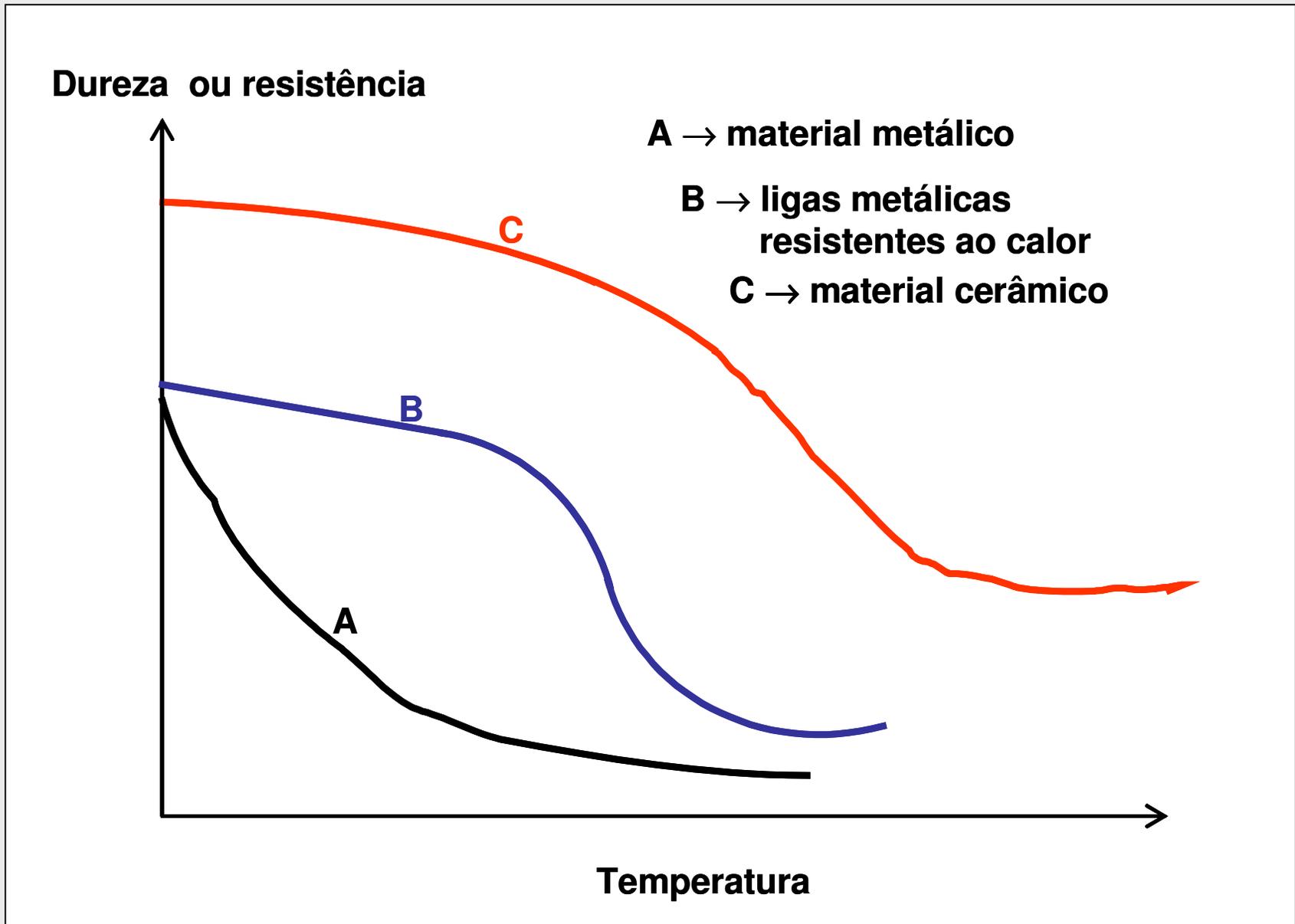
With $Y = 1$ and $\sigma_f = 0.5$ Y.S.,

$$K_{IC} = 0.5 \text{ Y.S. } \sqrt{\pi a}$$

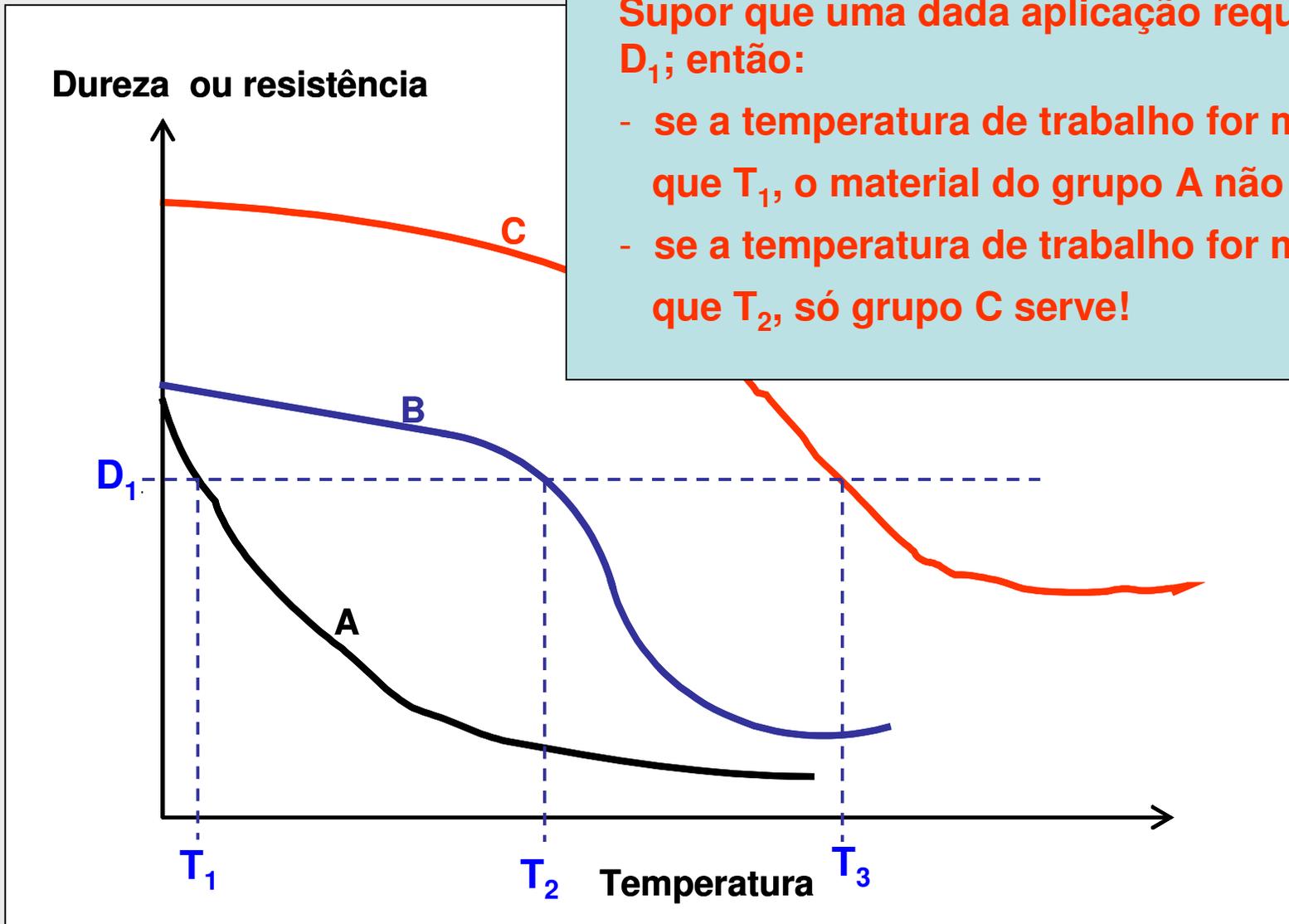
or

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{\pi} \frac{K_{IC}^2}{(0.5 \text{ Y.S.})^2} \\ &= \frac{1}{\pi} \frac{(98 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}})^2}{[0.5(1460 \text{ MPa})]^2} \\ &= 5.74 \times 10^{-3} \text{ m} \\ &= 5.74 \text{ mm} \end{aligned}$$

Resistência do material ao calor



temperatura desejada (temperatura em serviço). ver Figura!!



Supor que uma dada aplicação requer $D \geq D_1$; então:

- se a temperatura de trabalho for maior que T_1 , o material do grupo A não serve!
- se a temperatura de trabalho for maior que T_2 , só grupo C serve!

Fadiga

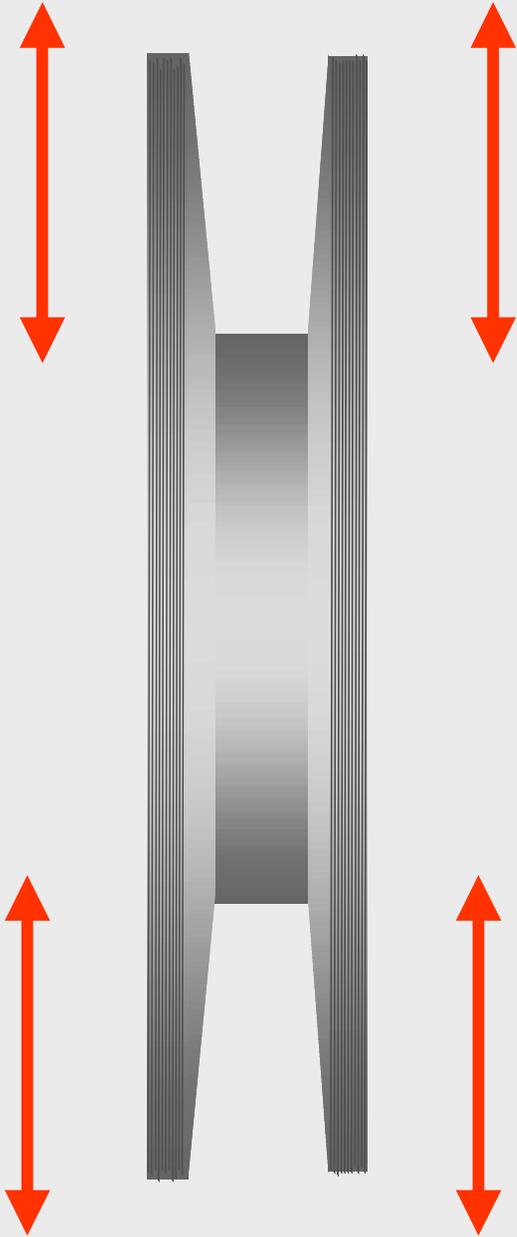
O limite de resistência que determinamos no ensaio de tração vale para apenas um ciclo de carregamento. Este não vale mais quando o material está sujeito a carregamentos cíclicos (carregamentos repetidos).

Quando são aplicados esforços dinâmicos repetidos ou flutuantes a um material metálico, o mesmo pode romper-se com uma tensão bem inferior ao limite de resistência determinado no ensaio de tração (ou compressão), podendo variar de $1/4$ a $1/2$ da tensão de ruptura.

Sob carregamento cíclico o material sofre fadiga !

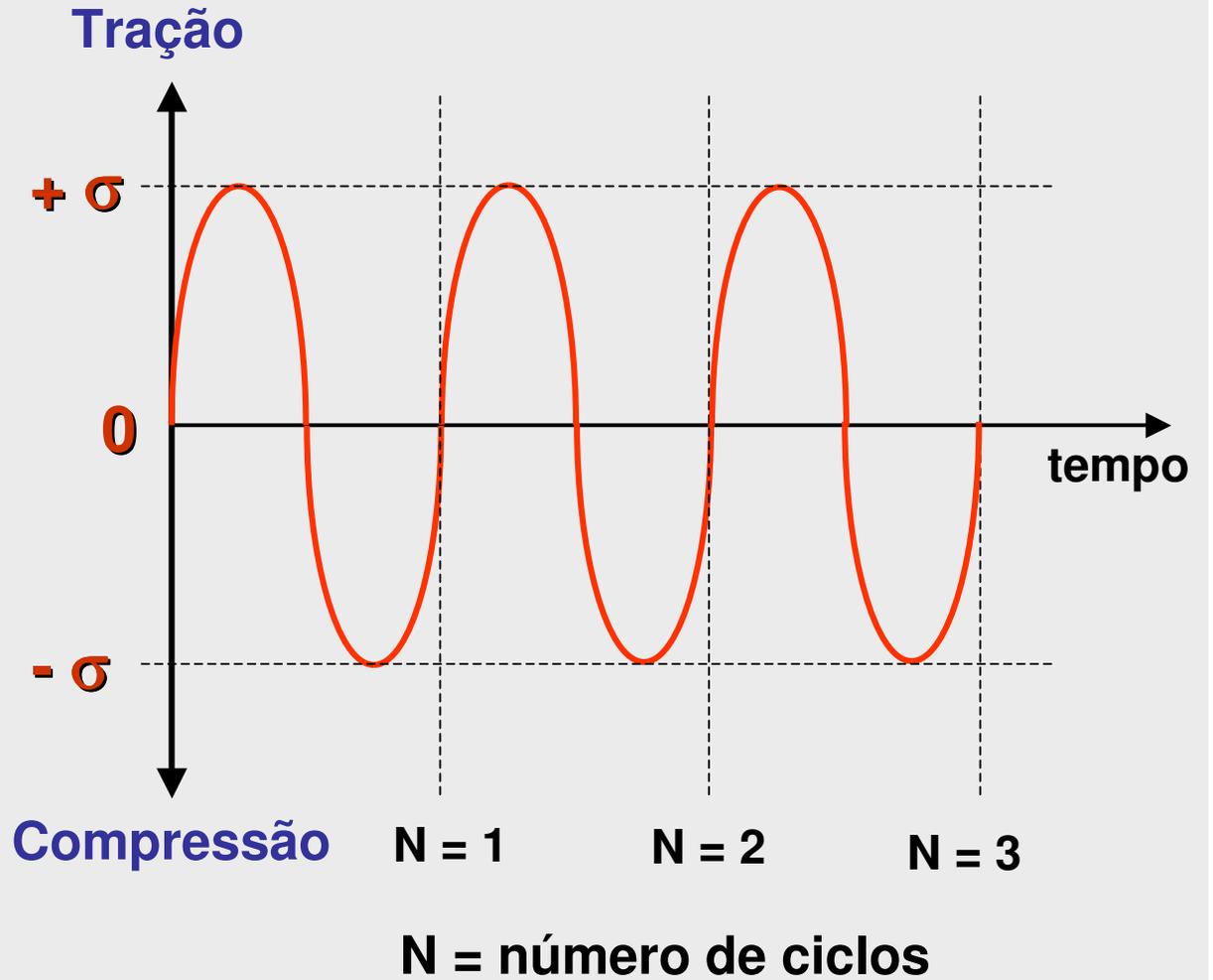
ENSAIO DE FADIGA

Para determinar a resistência à fadiga, ensaiamos corpos de prova em tensões sucessivamente menores e medimos o número de ciclos de carregamento que estes suportam até se romper. Os resultados são traçados em diagramas tensão versus número de ciclos chamados de diagramas de Wöhler.

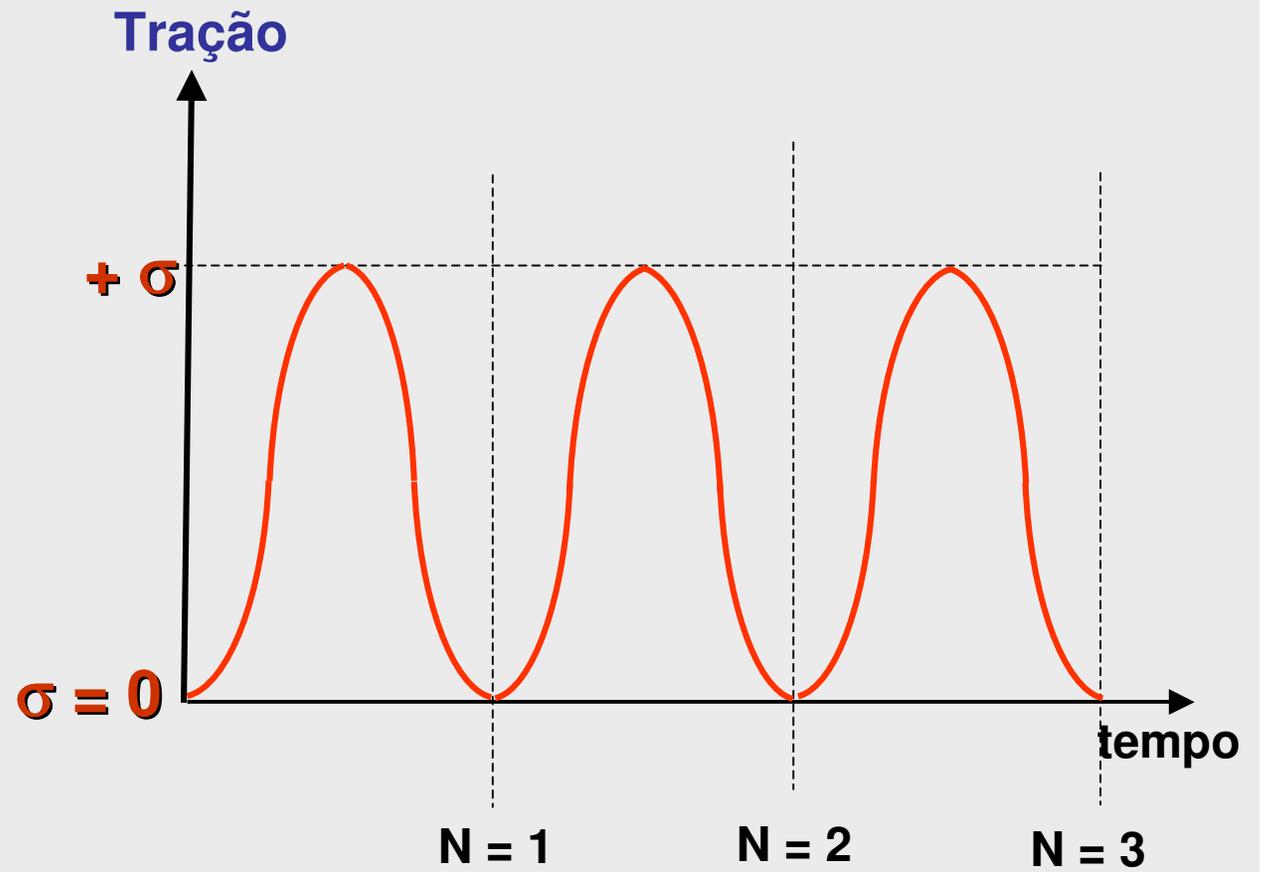
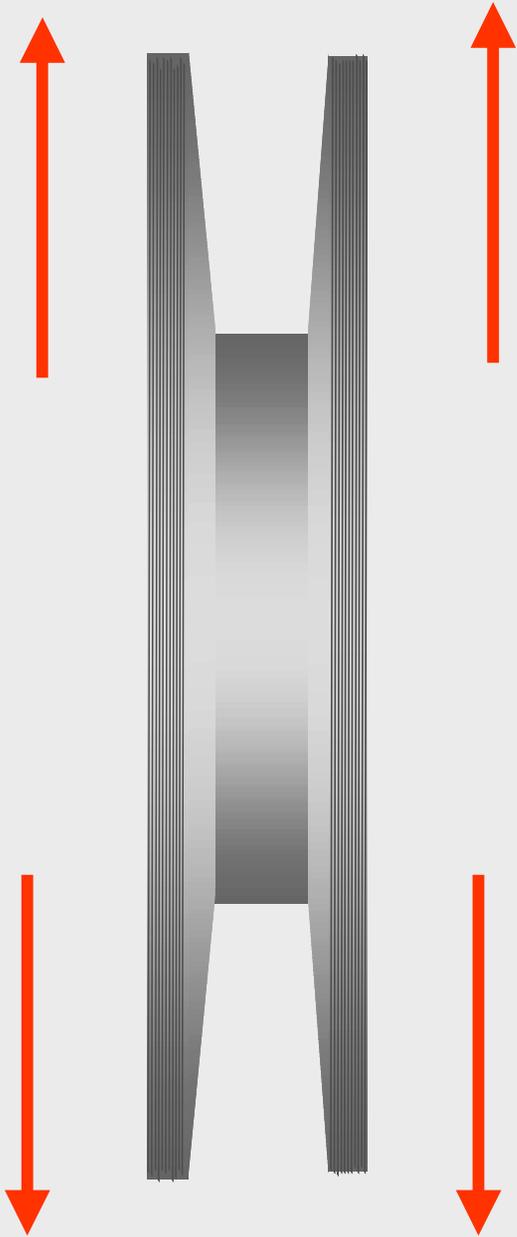


ENSAIO DE FADIGA

Movimento alternado de tração e compressão

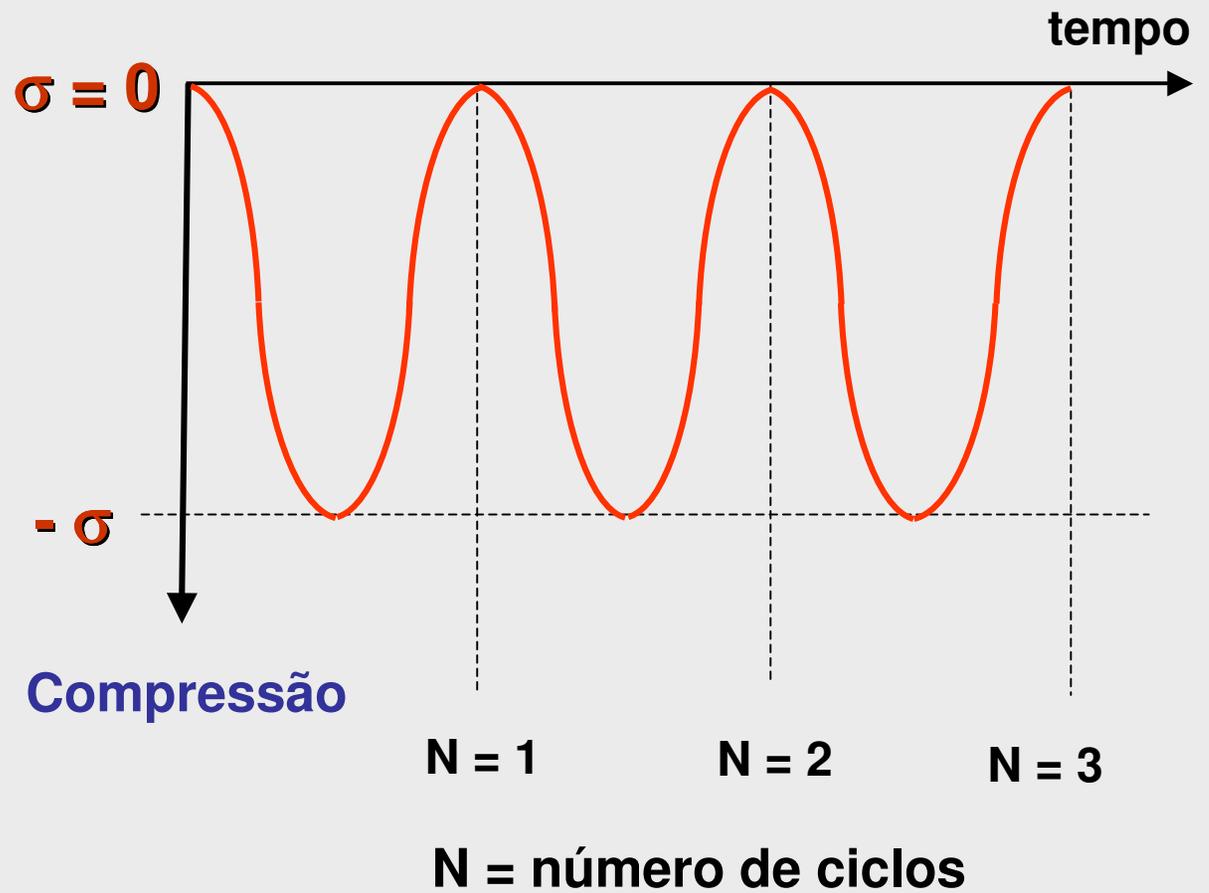
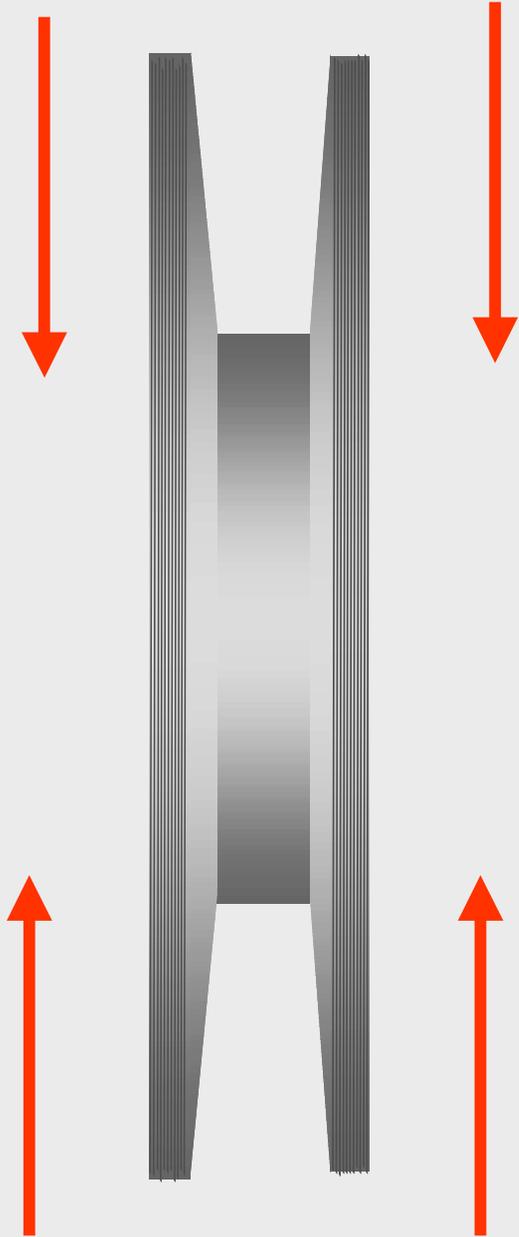


Fadiga em tração



N = número de ciclos

Fadiga em compressão



Limite de Resistência à fadiga

→ é o valor da tensão para a qual o material suporta um número suficientemente elevado de ciclos de carregamento e descarregamento sem se romper (este número depende da aplicação do material !)

▶ Especificamos um número definido de ciclos a suportar (de 10^6 a 10^8) e a tensão para a qual o material suporta este número de ciclos chamamos de resistência à fadiga.

Tensão em N/mm²

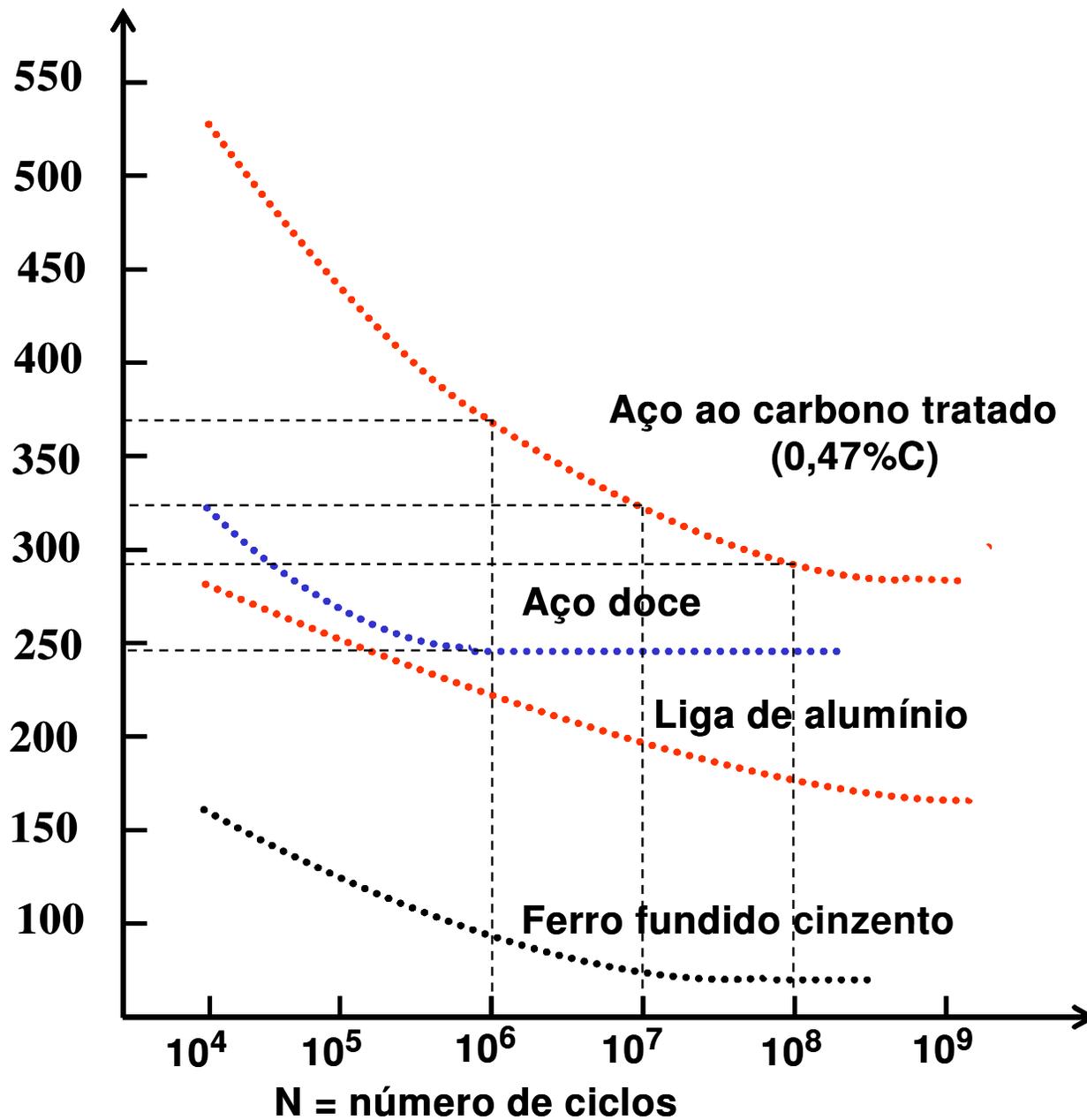
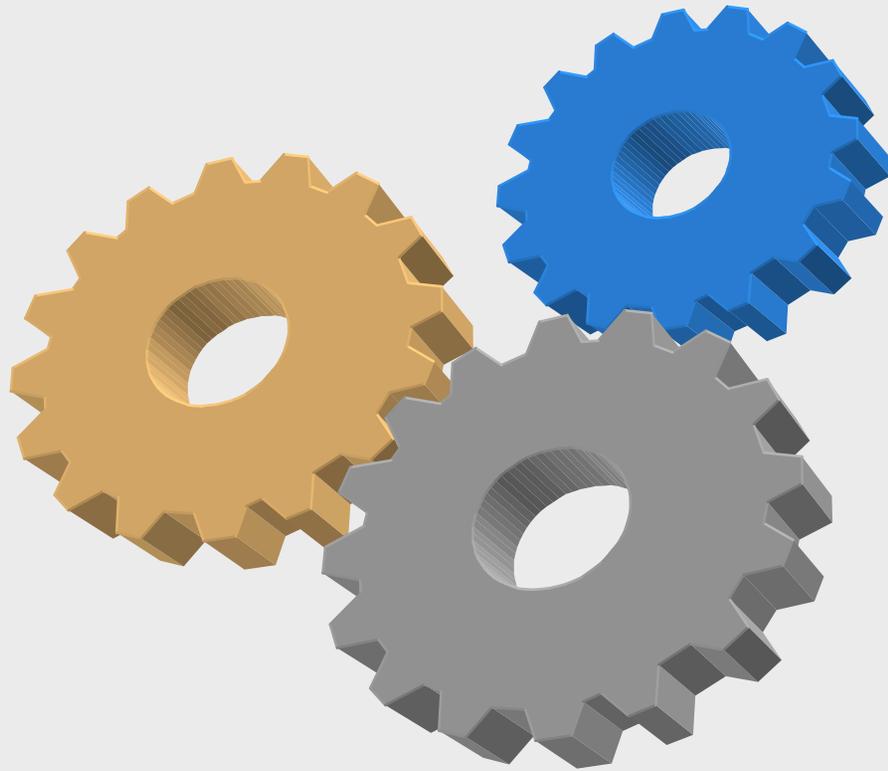
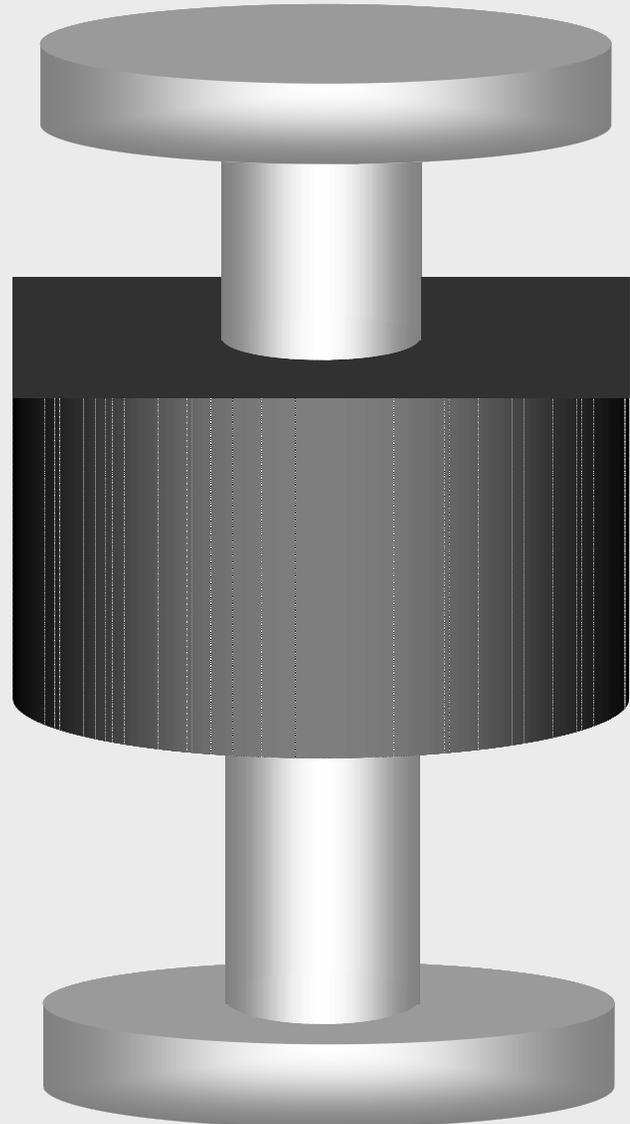
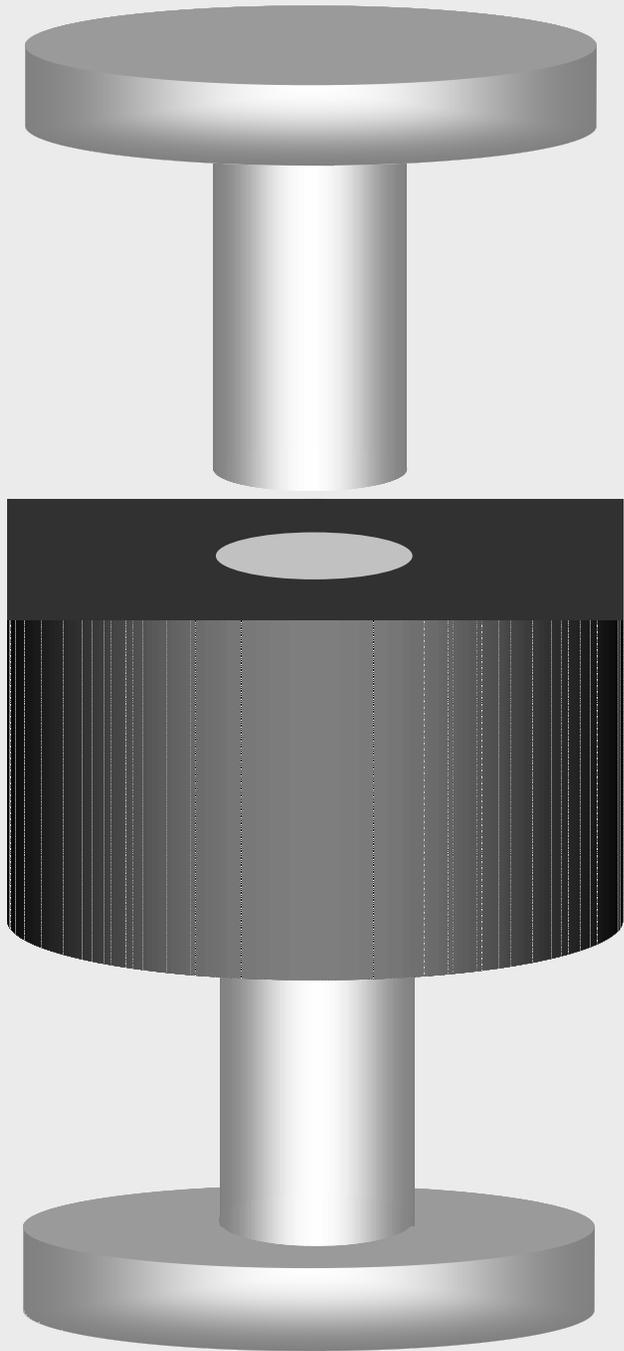


TABLE 7.17**COMPARISON OF FATIGUE STRENGTH (F.S.) AND TENSILE STRENGTH (T.S.) FOR THE ALLOYS OF TABLE 7.10**

Alloy	F.S. (MPa)	T.S. (MPa)
1. 1040 carbon steel	280	750
2. 8630 low-alloy steel	400	800
3. a. 304 stainless steel		515
3. b. 304 stainless steel	170	
7. a. 3003-H14 aluminum	62	150
8. b. AM100A casting magnesium	69	150
9. a. Ti-5Al-2.5Sn	410	862
10. Aluminum bronze, 9% (copper alloy)	200	652
11. Monel 400 (nickel alloy)	290	579
12. AC41A zinc	56	328





Resistência à fluência

- ▶ Fluência pode ser definida como a deformação plástica que ocorre em elevada temperatura sob carga constante ao longo do tempo.
- ▶ A fluência ocorre em tensões inferiores à tensão de escoamento medida no ensaio de tração.
- ▶ A fluência, isto é, a deformação plástica por fluência, depende da temperatura, do tempo e da tensão aplicada.

Materiais resistentes à fluência são aqueles que melhor resistem a deformação plástica na temperatura de trabalho, ou seja, aqueles que sofrem pouca fluência (pouca deformação) na temperatura de trabalho durante a sua vida útil.

São resistentes a fluência:

- *metais refratários* (metais de alto ponto de fusão) como o Tungstênio e o Molibdênio e suas ligas, e *ligas especiais à base de Níquel*.
- *as cerâmicas de engenharia* (cerâmica avançada) via de regra possuem elevada resistência à fluência.

ENSAIO DE FLUÊNCIA

O teste de fluência é realizado em temperaturas da ordem de $1/3$ a $1/2$ da temperatura (na escala kelvin) de fusão do material. O corpo de prova é aquecido por um forno acoplado à máquina de ensaios.

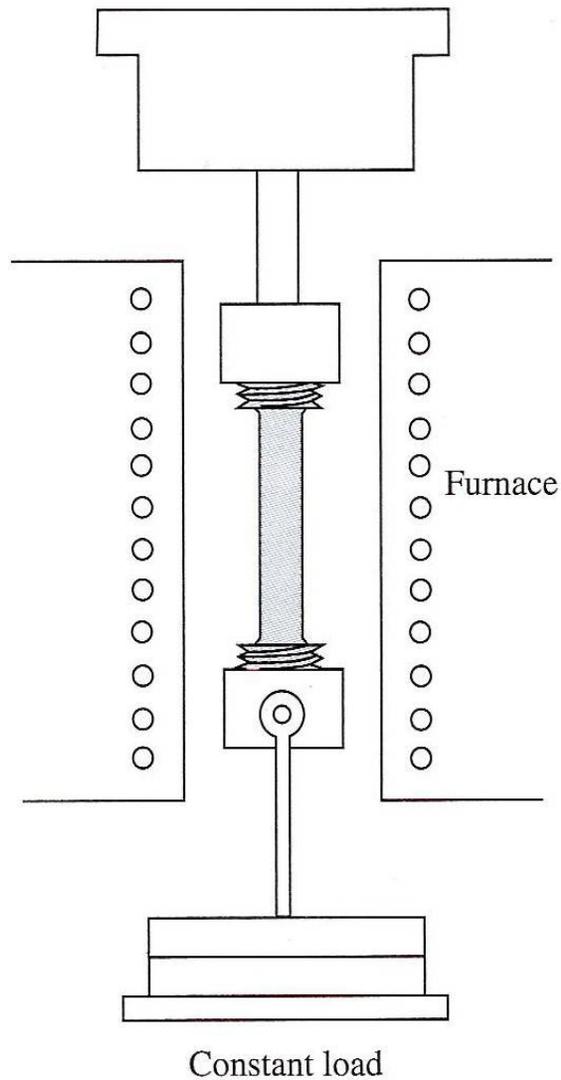


FIGURE 7-32 Typical creep test.

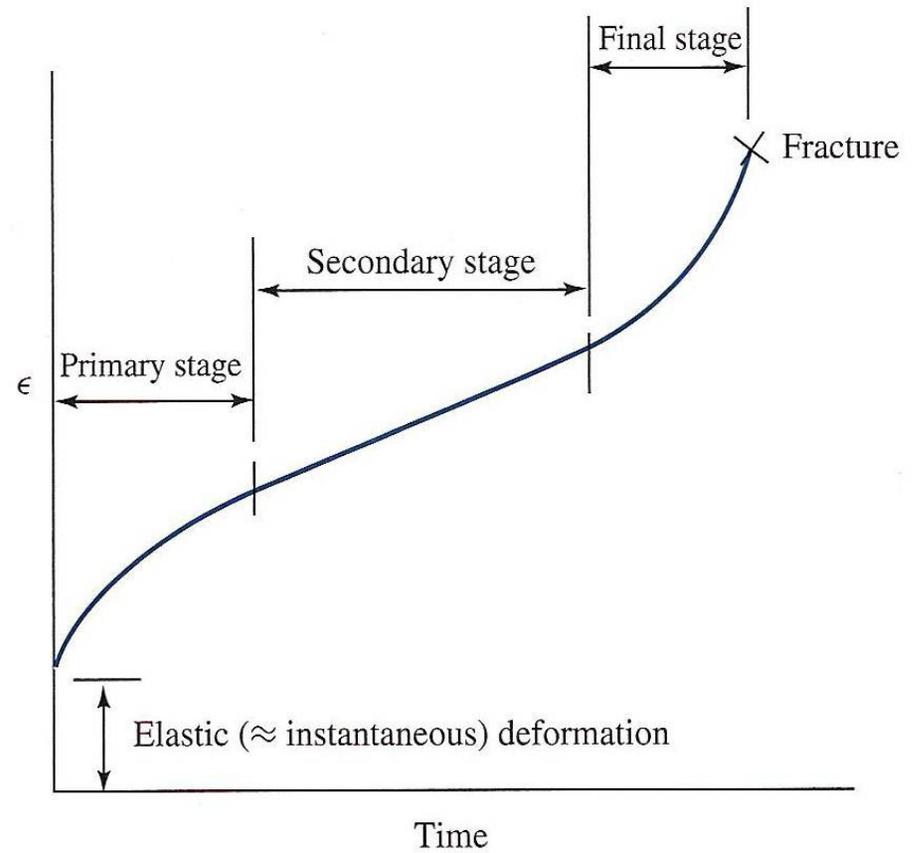


FIGURE 7-33 Creep curve. In contrast to Figure 7-31, plastic strain occurs over time for an alloy stressed at high temperatures (above about one-half the absolute melting point).

Propriedades térmicas

Dilatação térmica

O coeficiente de dilatação térmica linear é dada por:

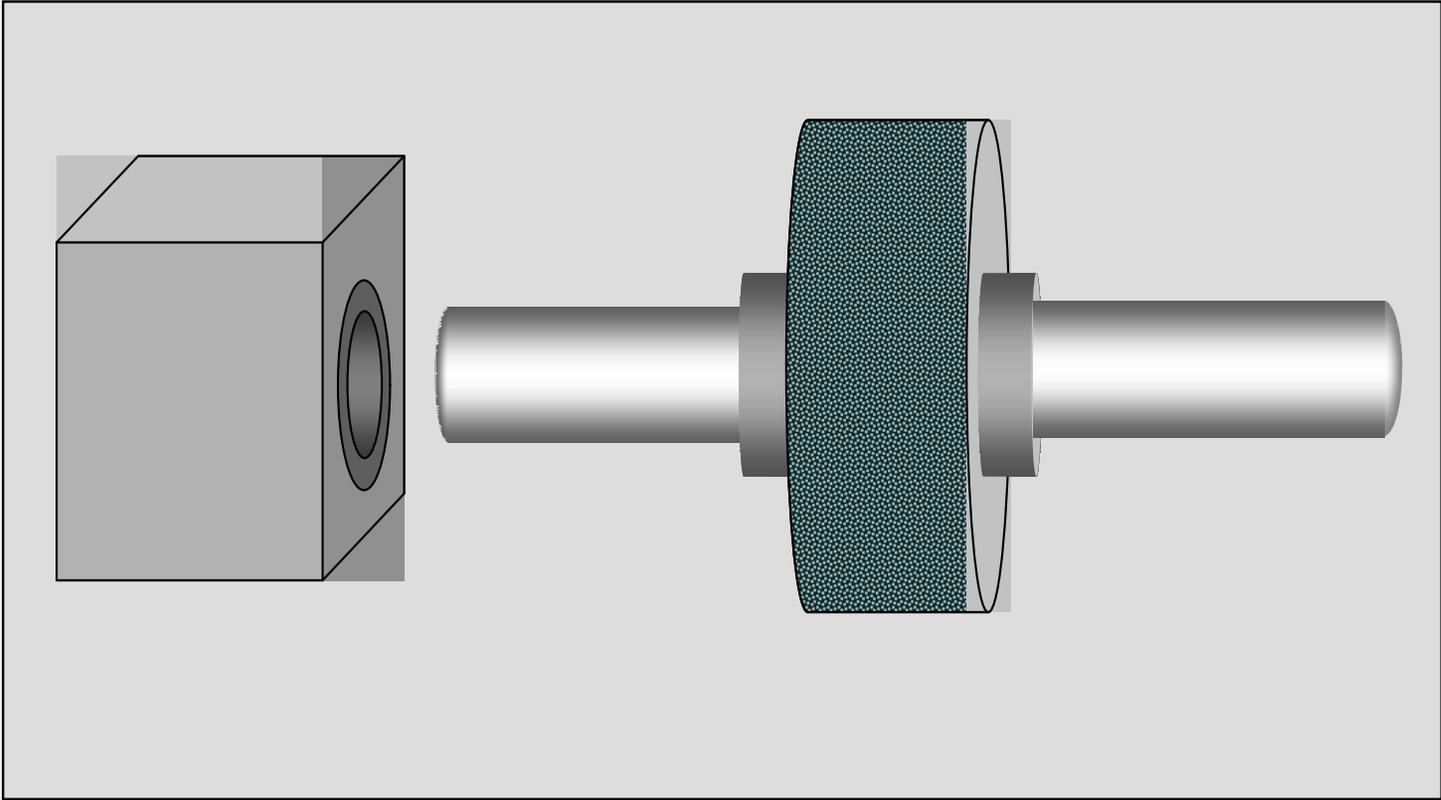
$$\alpha = \Delta L / \Delta T L_0 \qquad \Delta L = \alpha \Delta T L_0$$

O conhecimento da dilatação térmica de um material é muito importante para o design de materiais, de componentes e de estruturas em materiais de engenharia.

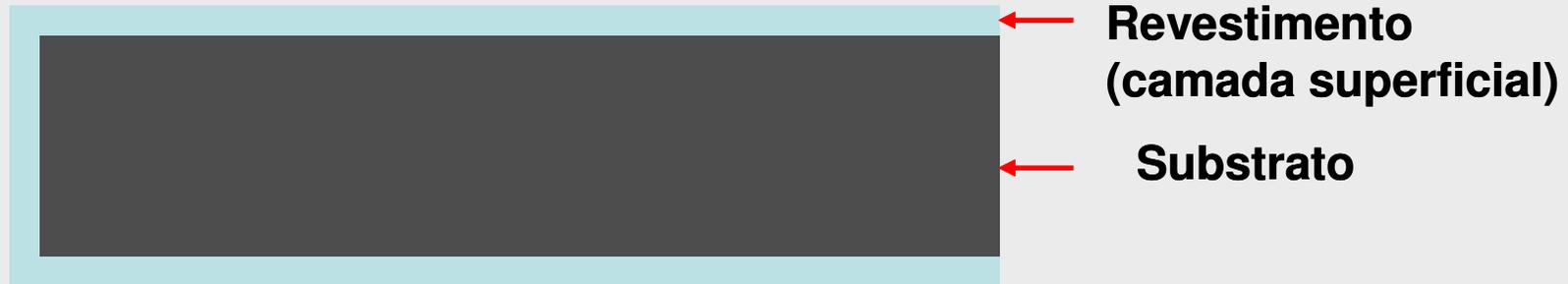
Exemplo 1: Peças em contato que possuem movimento relativo entre si:

Durante o serviço (em funcionamento!) ocorre aquecimento devido ao atrito, ocasionando variações dimensionais nos componentes; um coeficiente de dilatação térmica distinto nas peças em contato acarreta desajuste dimensional.

Resultado: engripamento, vibrações e ruído; desgaste acelerado em pontos específicos.



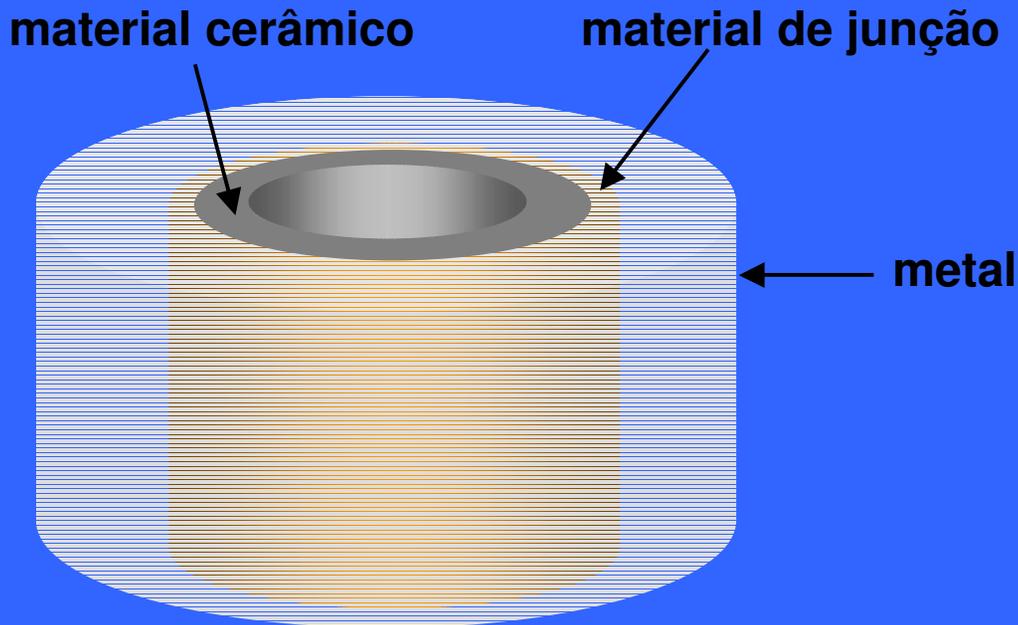
Exemplo 2: Materiais revestidos com camadas ou filmes



Quando o coeficiente de dilatação térmica do substrato for acentuadamente diferente daquele do revestimento, pode ocorrer o deslocamento da camada, ou o seu trincamento.

Exs.: vidrado (esmalte cerâmico) sobre azulejos; Filmes DLC (são filmes de elevada dureza e baixo coeficiente de atrito a base de carbono); Cromagem, zincagem, nitretação, cementação, etc.

3) Junção metal - cerâmica



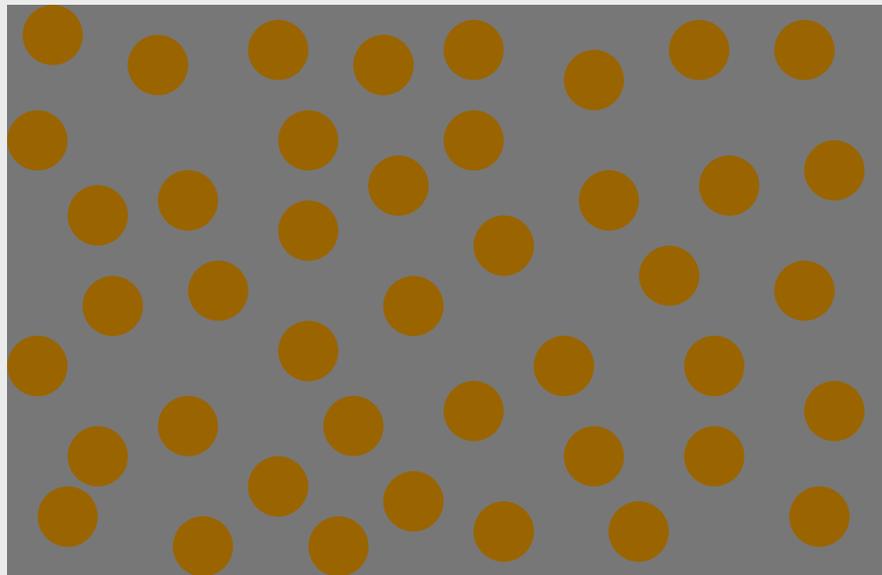
Os materiais metálicos possuem em geral, coeficiente de dilatação térmica muito maior que os materiais cerâmicos. Isto complica a junção de componentes metálicos com componentes cerâmicos, isto é, a brasagem de metal em cerâmica.

4) Materiais compósitos

Matriz metálica + fibras cerâmicas

Matriz metálica + partículas cerâmicas

(arranjo/ mistura tridimensional de fases com distintos coeficientes de dilatação).



Condutividade térmica

É a capacidade que o material tem de conduzir o calor.

Fluxo de calor J_Q :

A Quantidade Q de calor que atravessa o condutor de calor por unidade de área e por unidade de tempo é dado por

$$J_Q = -K \frac{dT}{dx} \quad (\text{em J/m}^2.\text{s})$$

K é uma característica do material chamada condutividade térmica (dada em J/m.s.°K ou W/m.°K)

Alguns valores de condutividade térmica
(em $W/m \cdot ^\circ K = J/m \cdot s \cdot ^\circ K$)

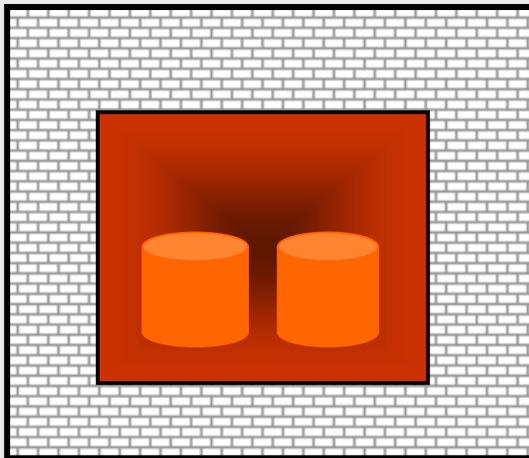
Diamante tipo Ila	$2,3 \times 10^3$	SiO ₂	1,4
SiC	$4,9 \times 10^2$	concreto	$9,3 \times 10^{-1}$
Prata	$4,29 \times 10^2$	vidro	$9,5 \times 10^{-1}$
Cobre	$4,01 \times 10^2$	polietileno	$3,8 \times 10^{-1}$
Aluminio	$2,37 \times 10^2$	teflon	$2,25 \times 10^{-1}$
Ferro	$8,02 \times 10^1$	madeira	$1,6 \times 10^{-1}$
Al ₂ O ₃	$3,5 \times 10^1$	Fibra de vidro	5×10^{-3}

▶ Materiais de elevada condutividade térmica servem para transportar o calor gerado por componentes em serviço para fora do local onde é gerado, impedindo o superaquecimento localizado.

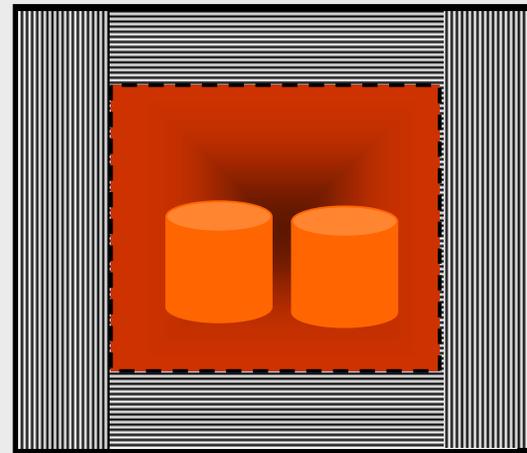
▶ Materiais de baixa condutividade térmica são utilizados para blindagem térmica de fornos (confinamento de calor).

Blindagem térmica

A blindagem térmica de fornos (isolamento térmico) é feita com blocos (tijolos refratários) de cerâmica com elevada porosidade ou com mantas feitas de fibras cerâmicas, sendo que as fibras devem ficar ordenadas perpendicularmente à direção de propagação do calor.



a) Blindagem térmica com tijolo porosos de cerâmica



b) Blindagem térmica com mantas de cerâmica

Propriedades magnéticas

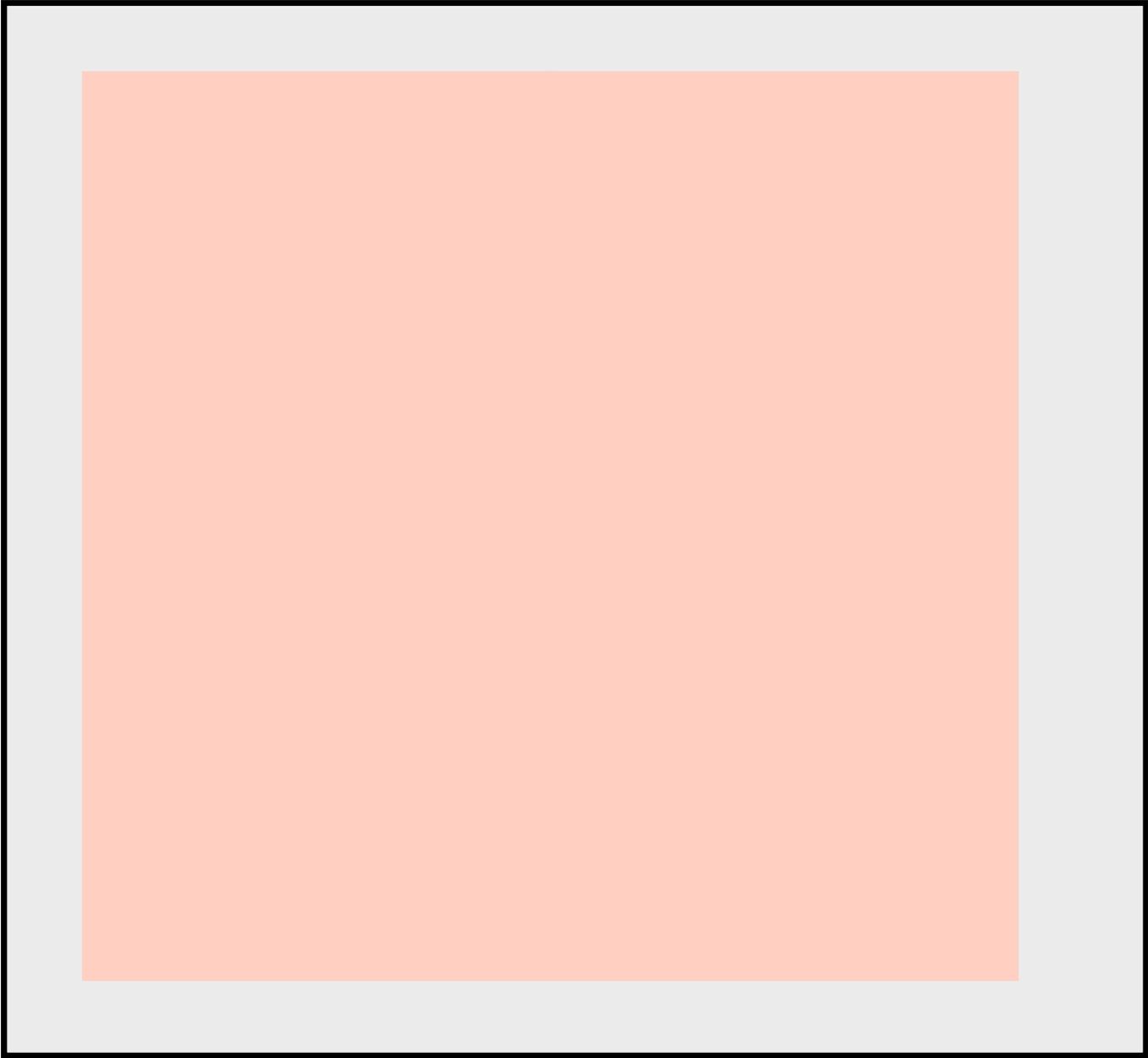
Sempre que uma carga elétrica encontra-se em movimento gera-se um campo magnético. Um dos conceitos mais fundamentais em magnetismo é a idéia do campo magnético.



Quando é gerado um campo magnético em um dado volume do espaço:

→ há uma variação da energia neste espaço (gradiente de energia) que gera força magnética

→ a força magnética se manifesta sobre uma carga elétrica que esteja dentro deste campo. Esta força acelera a carga elétrica.



→ Quando um condutor (p. ex. um fio metálico) encontra-se dentro do espaço onde existe o campo magnético, este induz uma corrente elétrica no condutor.

De forma resumida:

Cargas elétricas em movimento geram um campo magnético e, por outro lado, um campo magnético induz corrente elétrica em condutores, ou seja, acelera cargas elétricas.

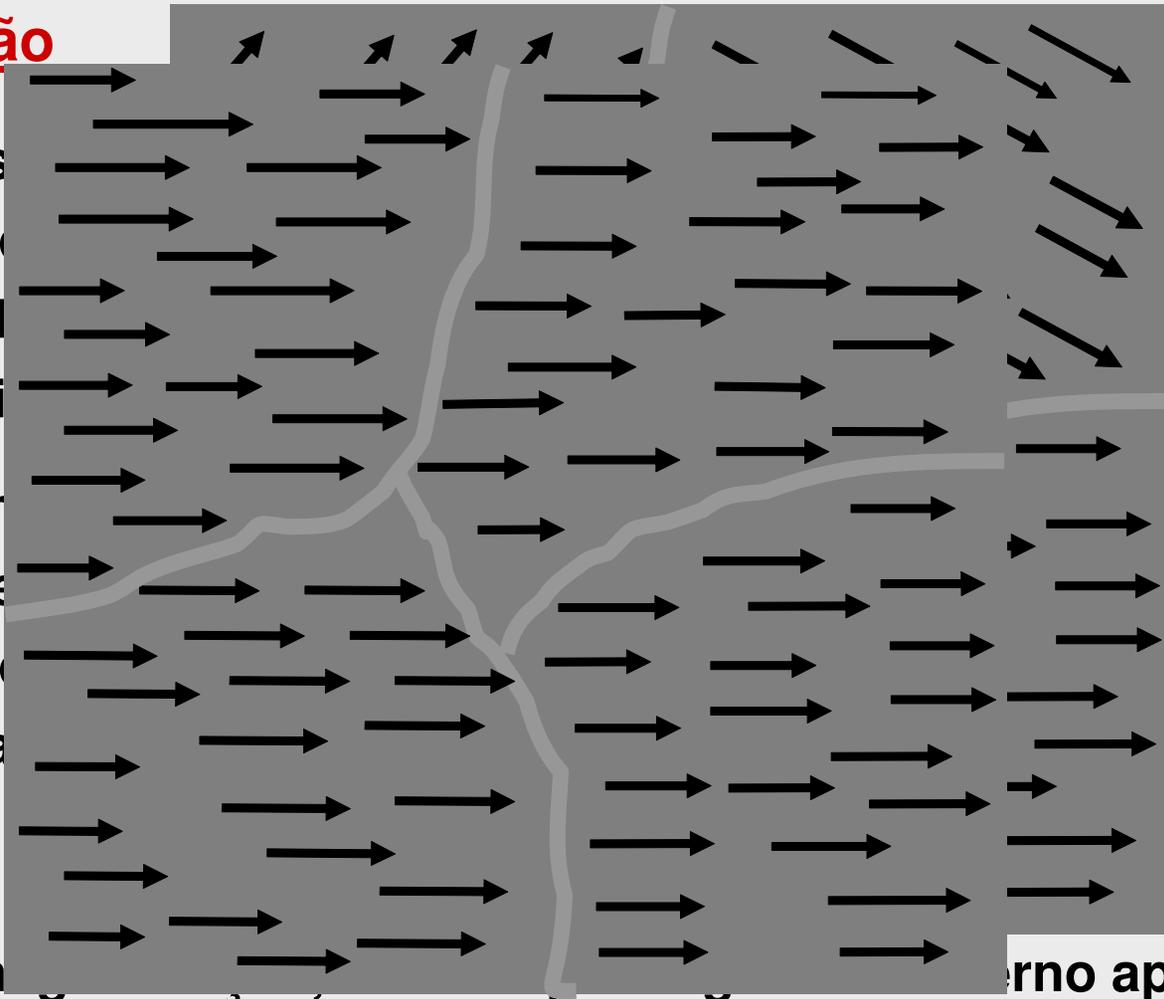
Magnetização

→ Os átomos (ou íons magnéticos) possuem um momento magnético (momento orbital e momento de spin do elétron). Assim, eles se comportam como pequenos ímãs.

→ Quando um campo magnético externo é aplicado, os momentos magnéticos tendem a se alinhar com a direção do campo magnético.

onde M é a magnetização, H é o campo magnético externo aplicado e χ é a susceptibilidade magnética.

A magnetização é uma propriedade macroscópica que representa a soma dos momentos magnéticos dos átomos no material.



ao
éticos.

r o
ireção
ação:

erno aplicado

A susceptibilidade magnética χ é um parâmetro característico de cada material e representa a resposta deste ao campo magnético aplicado.

De acordo com o valor obtido para a susceptibilidade, pode-se classificar os materiais em:

- diamagnéticos,**
- paramagnéticos,**
- ferromagnéticos,**
- antiferromagnéticos e**
- ferrimagnéticos.**

Os materiais diamagnéticos ($\chi < 0$)

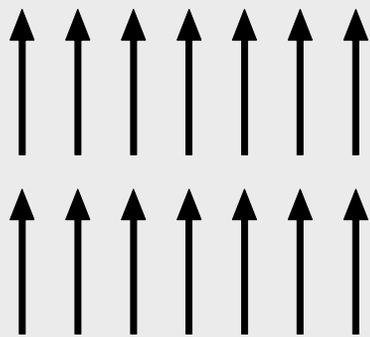
Apresentam uma baixa magnetização quando submetidos a um campo magnético e em sentido contrário ao campo aplicado (antiparalelo).

Essas substâncias não possuem dipolos magnéticos intrínsecos, ou seja, são constituídos de átomos ou íons que possuem as camadas eletrônicas completas. Exemplos são os gases nobres, He, Ne, Ar, Kr, Xe e os sólidos que formam ligação iônica, como NaCl, KBr, LiF e CaF₂, cujos átomos trocam elétrons para completar suas camadas. Esses materiais não apresentam dependência da magnetização com a temperatura ou com o campo aplicado.

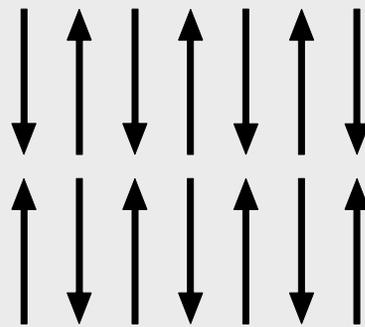
Os materiais paramagnéticos ($\chi > 0$)

Possuem magnetização nula na ausência de campos magnéticos externos, isto é, os momentos magnéticos dos átomos estão distribuídos aleatoriamente. No entanto, em presença de campo externo, produzem uma pequena magnetização na mesma direção e sentido (paralela) do campo aplicado. Os principais materiais paramagnéticos são os metais não magnéticos e os materiais que contêm átomos ou íons de elementos do grupo de transição do ferro, terras raras e dos actinídeos. Existe uma fraca dependência da magnetização em relação à temperatura nestes materiais.

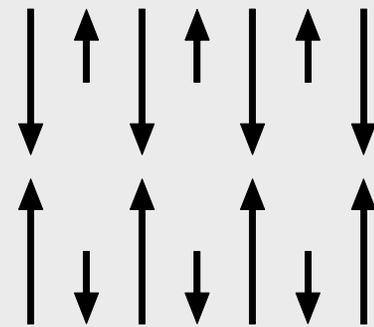
Os materiais **ferromagnéticos**, **antiferromagnéticos** e **ferrimagnéticos** têm característica semelhantes. Enquanto nos ferromagnéticos os dipolos magnéticos (momentos magnéticos) tendem a se alinhar aos seus vizinhos, nos antiferromagnéticos e ferrimagnéticos os dipolos tendem a se alinhar no sentido contrário, conforme figura.



a) ferromagnético

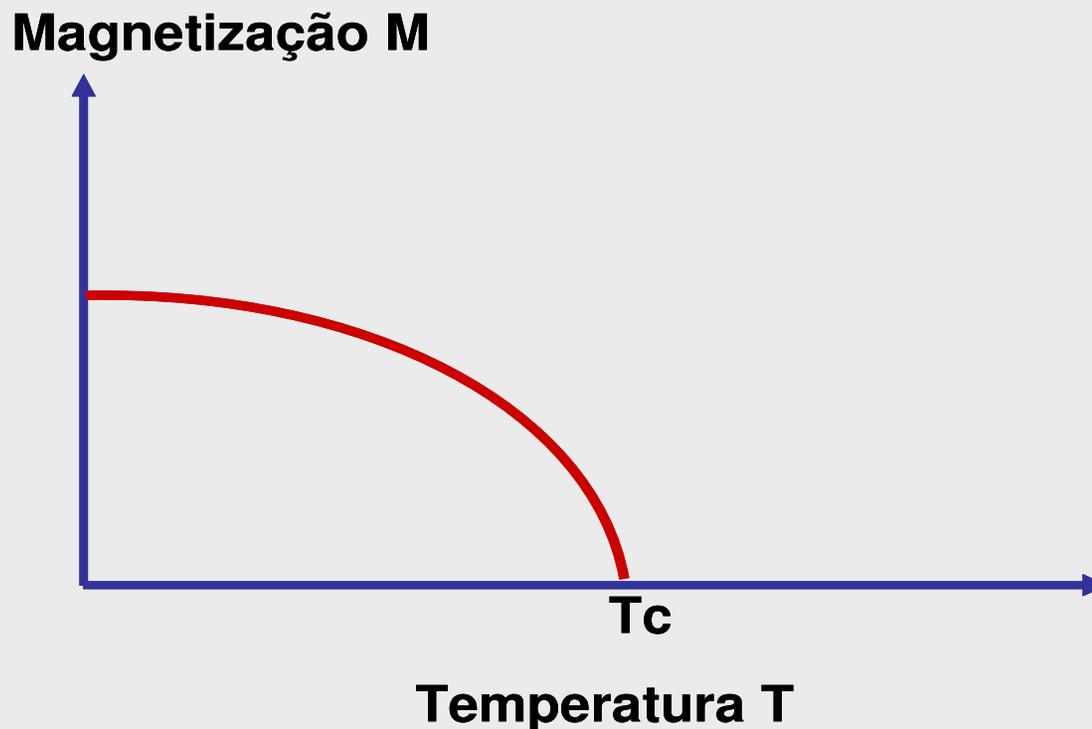


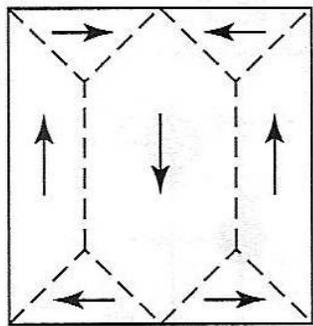
b) antiferromagnético



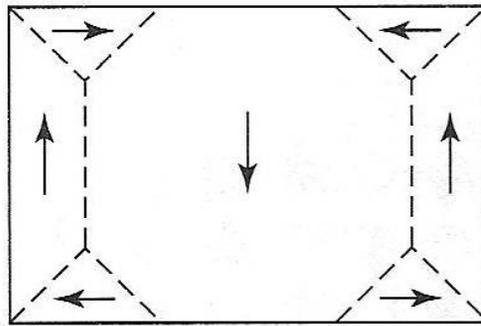
c) ferrimagnético

A magnetização diminui à medida que a temperatura aumenta até um valor de temperatura chamada **temperatura crítica ou temperatura de Curie (T_c)**. A partir desta temperatura a magnetização é nula, o que decorre do fato que a elevação da temperatura provoca uma distribuição aleatória dos dipolos magnéticos. Para temperaturas acima de T_c o material passa a ter um comportamento paramagnético.

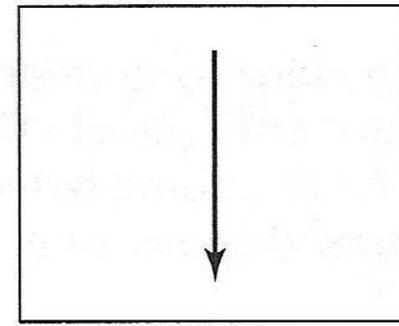




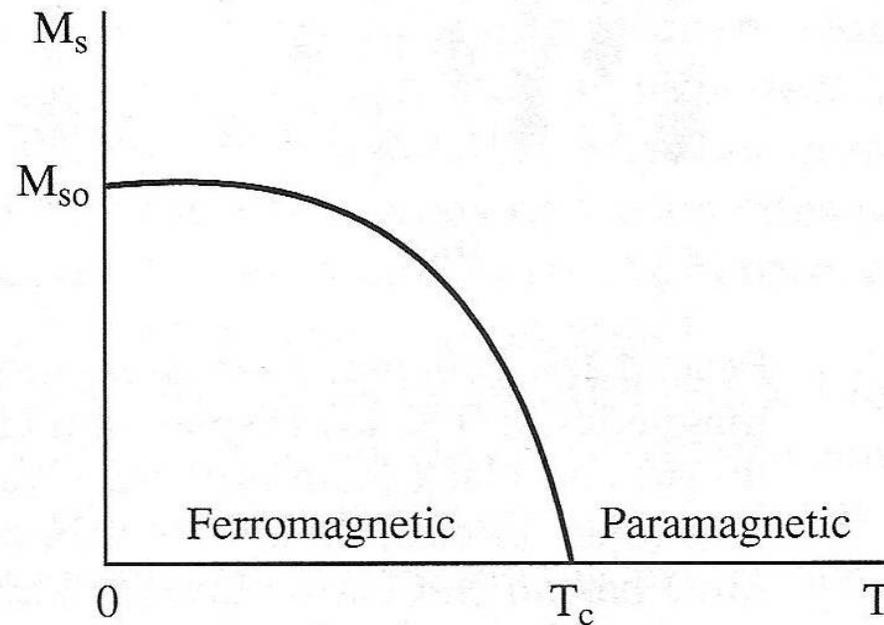
(a)



(b)



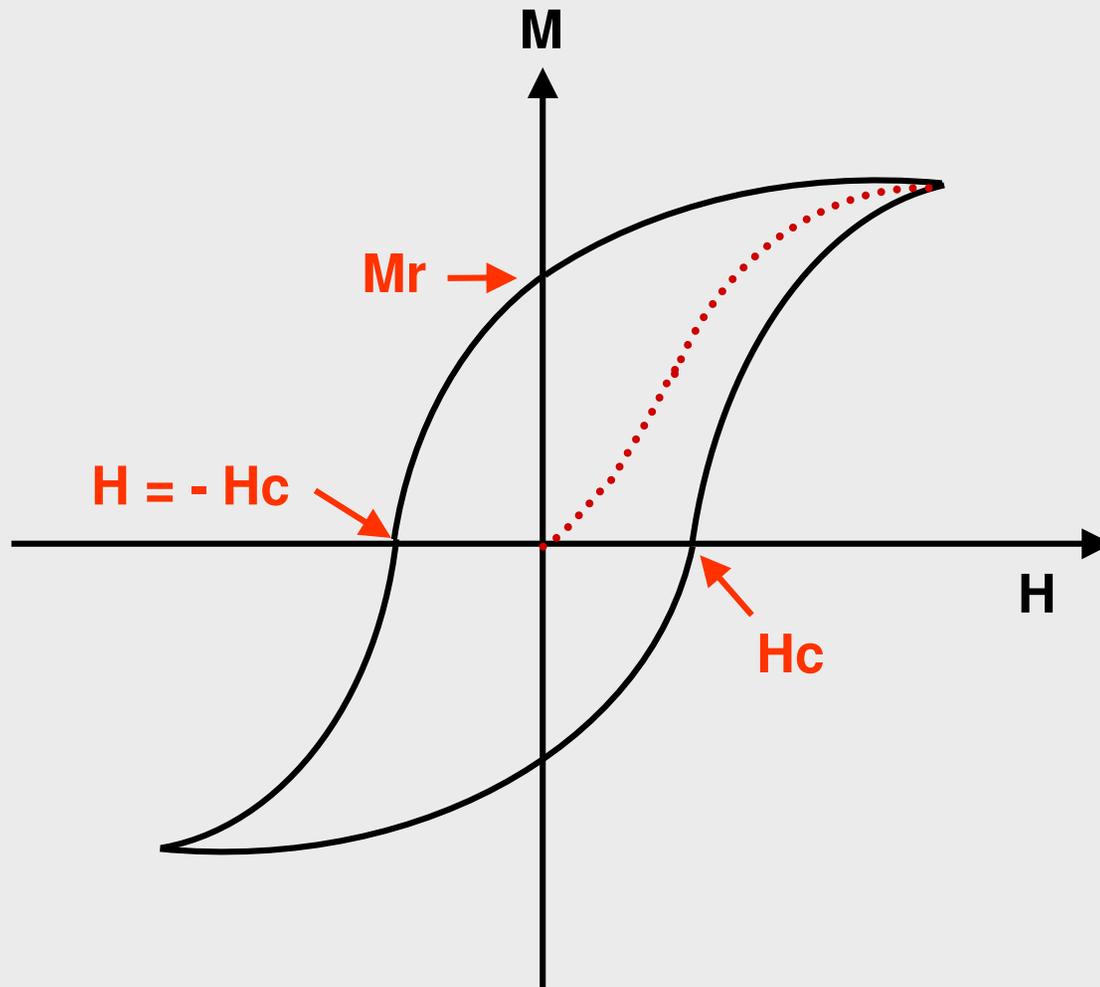
(c)



(d)

Fig 12.8- (R.E.Hummel)
 a) Representação esquemática de domínios magnéticos individuais cujos spins estão orientados espontaneamente; b) e c) após aplicação de campo magnético crescente. d) Saturação magnética de materiais ferrosos em função da temperatura de

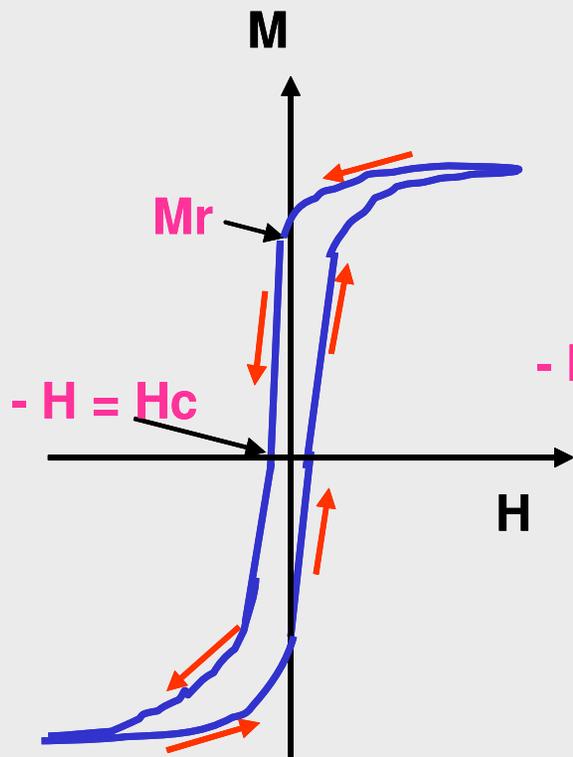
A variação da magnetização de um material em função do campo magnético externo aplicado (ver figura) denomina-se **curva de histerese magnética**.



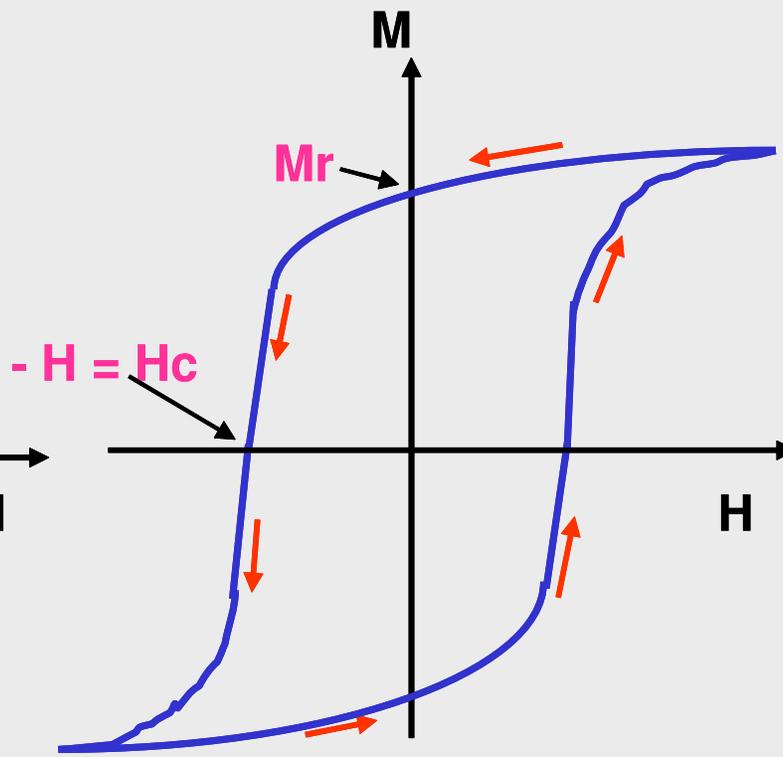
Em uma curva de histerese típica contata-se que com o aumento da intensidade de campo magnético, a magnetização cresce continuamente até atingir um valor de saturação.

A partir da curva de histerese pode-se determinar, por exemplo, a magnetização remanente M_r (magnetização que resta no material quando o campo externo volta a ser nulo) e o campo coercivo H_c (campo necessário para remover a magnetização remanente do material).

Pela análise da curva de histerese pode-se classificar os materiais em materiais magnéticos moles (soft magnetic materials) e materiais magnéticos duros (ímãs permanentes ou hard magnetic materials), dependendo do valor do campo coercivo a ele associado.



a) material magnético mole



b) material magnético duro

As unidades físicas utilizadas em magnetismo:

Para campo magnético: Tesla (T) e Gauss (G), sendo
 $1\text{T(Tesla)}=10000\text{ G (Gauss)}$

Para campo coercivo usa se predominantemente o Oersted (Oe), sendo que 1 Tesla equivale a 6000 Oersted.

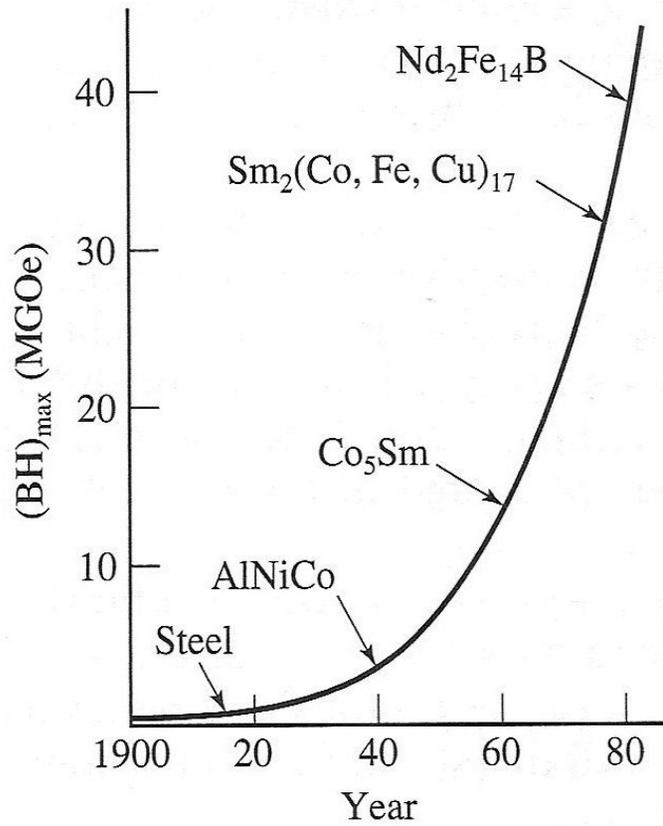
Principais materiais magnéticos soft:

- Ferro puro, Fe + 3 a 4% de Si, Fe + 0,4 a 0,6%P
- Ferrites de Níquel e Manganês (ferrites soft)
- Ligas Fe-Ni-Co, etc.

Principais materiais magnéticos Hard (ímãs):

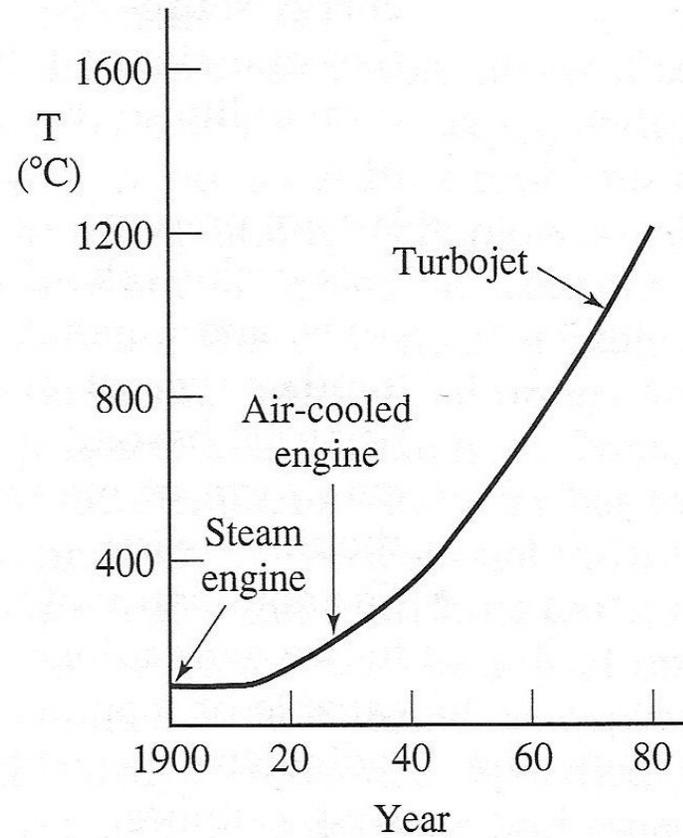
- Alnico (liga a base de Alumínio Níquel e cobalto);
- Ferrites de Estrôncio e de Bário;
- Ligas SmCo_5 ; Nd-Fe-B e Sm-Fe-N

Strength of permanent magnets



(a)

Operating temperatures of engines



(b)

RESISTÊNCIA À CORROSÃO

- Corrosão é o resultado destrutivo de reações químicas entre o metal ou ligas metálicas e o meio ambiente.
- Com exceção de poucos como o ouro, os metais são sempre encontrados na natureza na forma de compostos: óxidos, sulfetos, etc. Isto significa que tais compostos são as formas mais estáveis para os mesmos.
- A corrosão pode ser vista como nada mais do que a tendência para o retorno a um composto estável. Assim, por exemplo, quando uma peça de aço enferruja, o ferro, principal componente, está retornando à forma de óxido que é o composto original do minério.

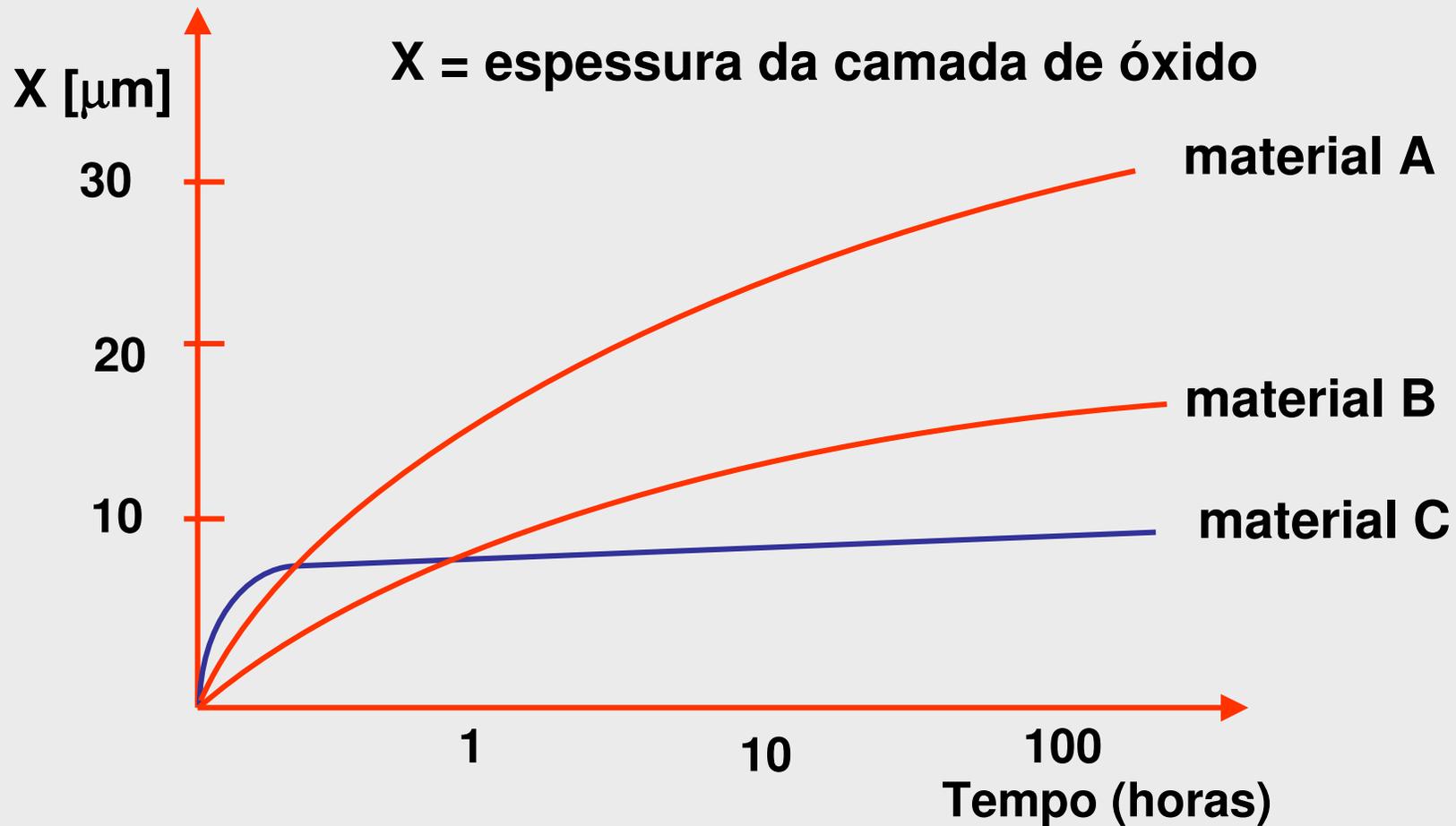
PRINCIPAIS FORMAS DE CORROSÃO

- **Corrosão ao ar ou oxidação**
- **Corrosão por ação direta**
- **Corrosão biológica**
- **Corrosão galvânica**
- **Corrosão Eletrolítica**

1) Corrosão ao ar ou oxidação

- Materiais que são utilizados em condições de trabalho onde ocorrem temperaturas elevadas necessitam resistência especial à oxidação.
- Na oxidação são desfeitas as ligações metálicas e formam-se ligações iônicas entre o átomo metálico e o oxigênio, ou seja, forma-se o óxido do metal, que é um composto (**Ex.: Mn → MnO**).
- A cinética do processo de oxidação cresce com a temperatura, isto é, quanto mais alta a temperatura, mais rapidamente o metal se oxida ao longo da sua seção.

Cinética da oxidação em temperatura elevada



O material C forma uma camada estável e impermeável ao oxigênio, evitando a progressão da oxidação

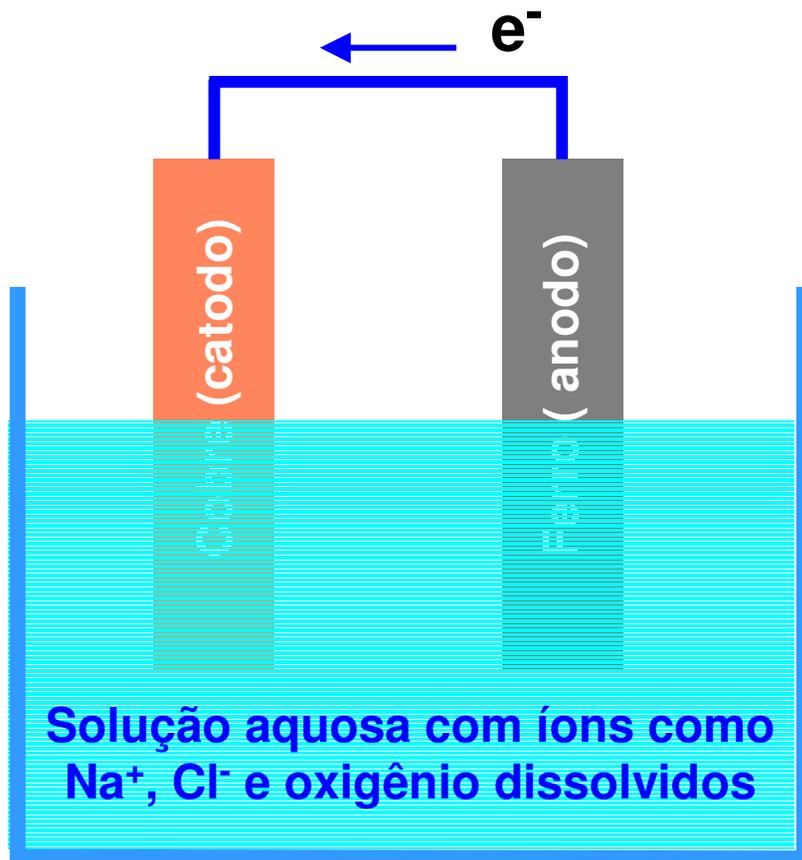
2) Corrosão por ação direta

Podemos incluir neste item os casos em que o metal está diretamente em contato com substâncias que o atacam. É comum em processos industriais. Podemos citar como exemplos: soluções químicas, sais ou outros metais fundidos, atmosferas agressivas em fornos, etc. A prevenção e controle são específicos para cada caso.

3) Corrosão biológica

Microorganismos também podem provocar corrosão em metais. Isto é particularmente importante em indústrias alimentícias e similares.

4) Corrosão galvânica



Célula galvânica

Nestas condições, as reações serão:



Assim, no anodo ocorre uma reação de oxidação (corrosão do material) e no catodo, uma reação de redução.

A corrosão galvânica, provavelmente, é o tipo mais comum. Isto porque a corrosão devido à presença de água quase sempre se deve ao processo galvânico. Seja um metal exposto ao tempo e, portanto, sujeito à ação da umidade e da chuva ou submerso ou, ainda, sob o solo. É o caso típico de reservatórios, tubulações, estruturas, etc.

5. Corrosão Eletrolítica

A corrosão eletrolítica acontece quando a corrente elétrica causadora da corrosão origina-se em fontes que não pertencem à estrutura que está se corroendo.

Tubulações enterradas, como oleodutos, gasodutos, adutoras, minerodutos e cabos telefônicos, estão freqüentemente sujeitos a esses casos devido às correntes elétricas de interferência que abandonam o seu circuito normal para fluir pelo solo ou pela água.

FIM DO CAPITULO

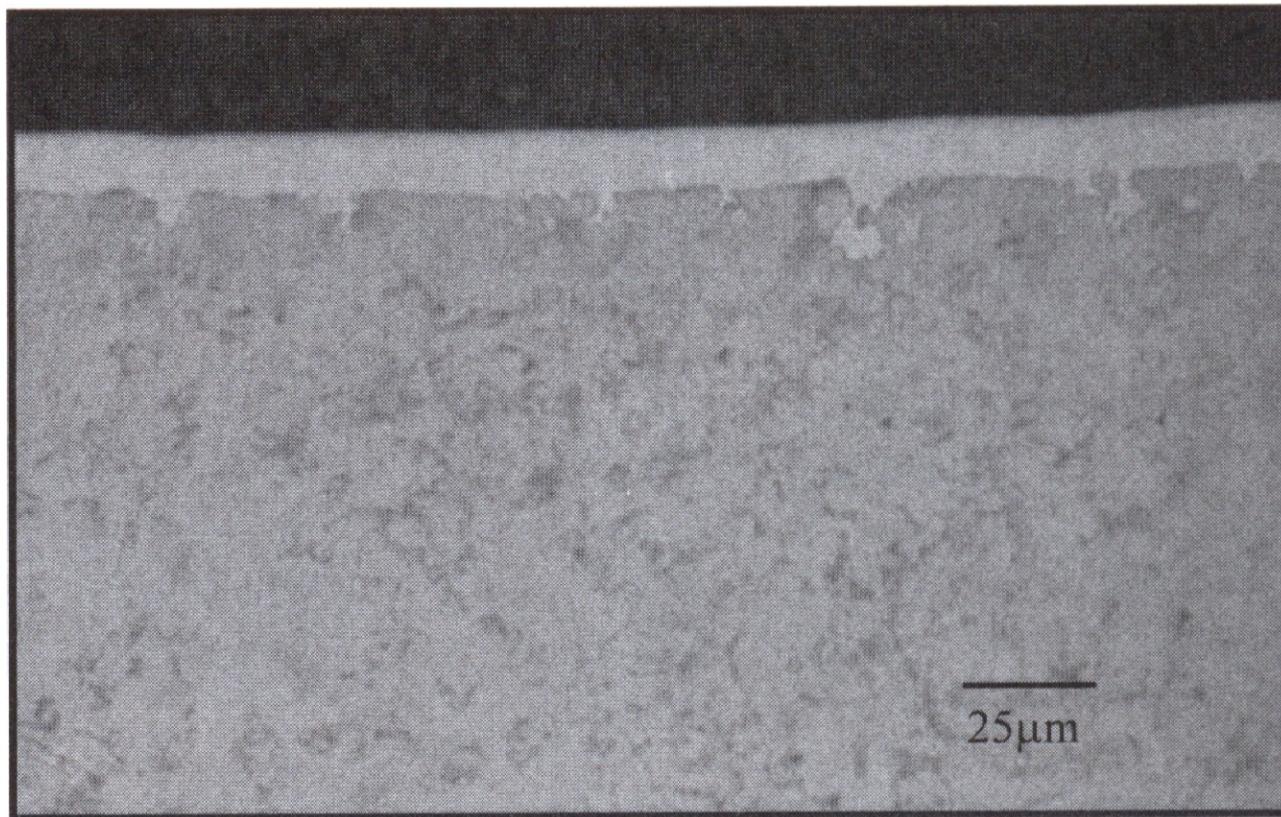
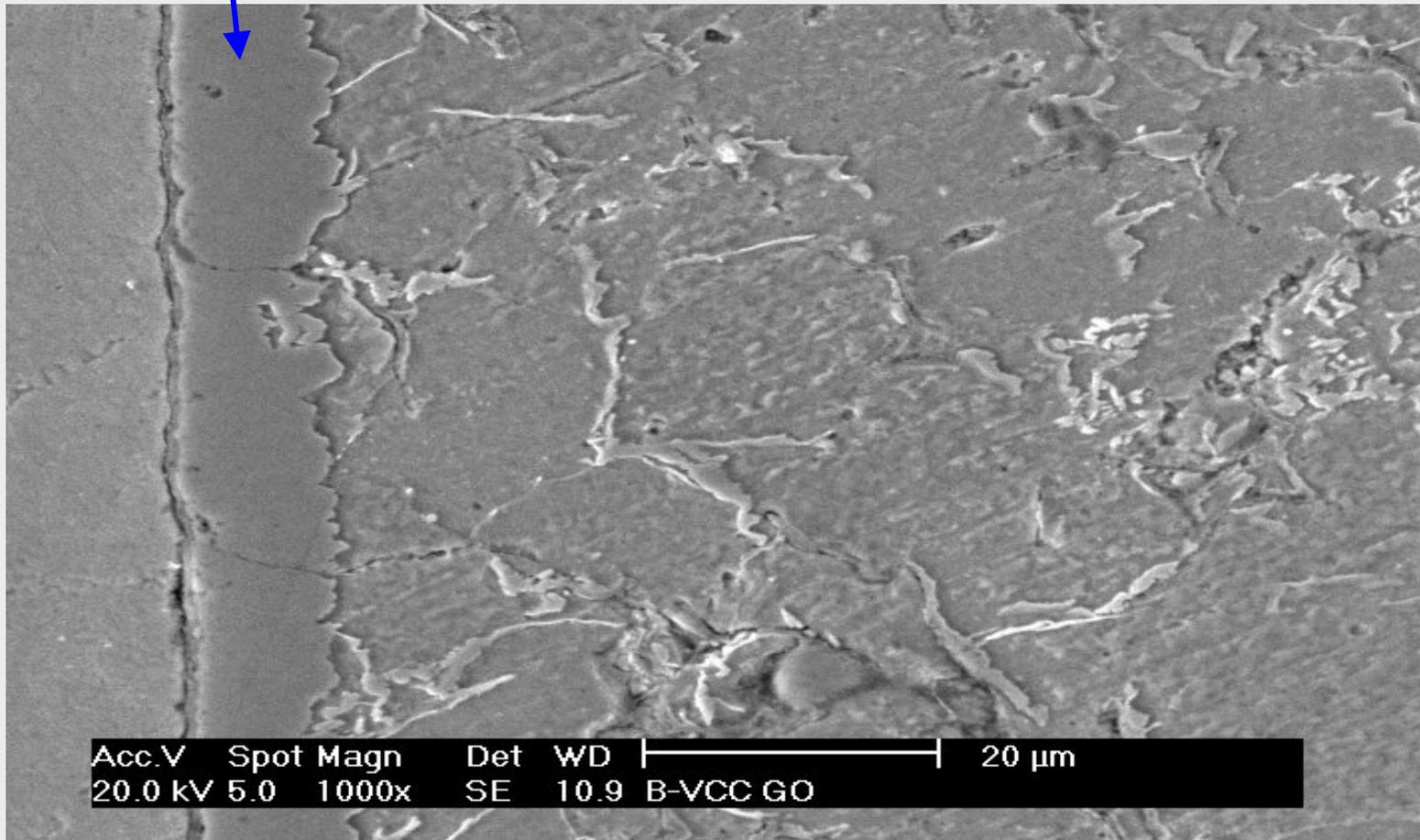
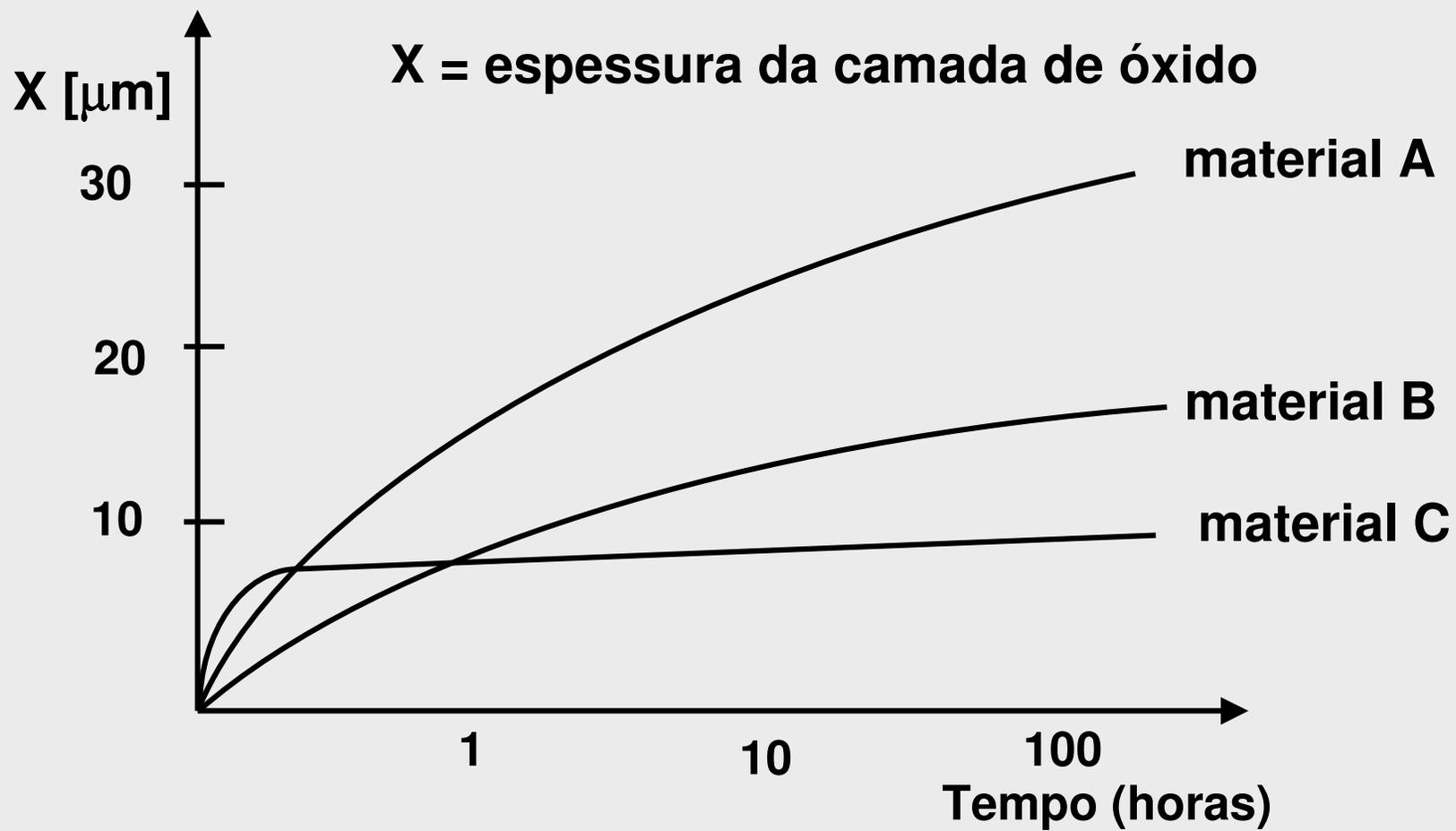


Figure 5. Cross-section of sample with electrodeposited nickel coating—no resin impregnation (β). OM

Camada de nitretos = 10 μ m

Tipo de fase: fase ϵ





Cinética da oxidação em temperatura elevada

