

Resumo

- tensão e deformação em materiais sólidos
- ensaios de tracção e dureza
- deformação plástica de materiais metálicos
- recristalização de metais encruados
- fractura
- fadiga
- fluência

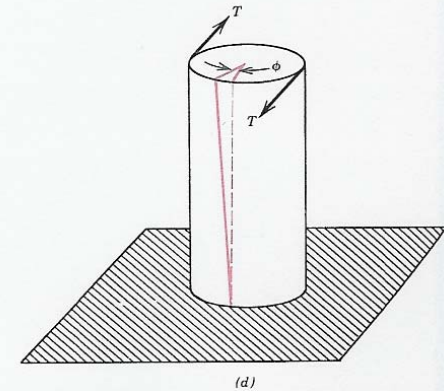
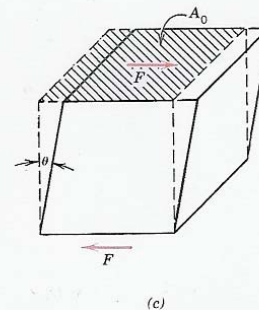
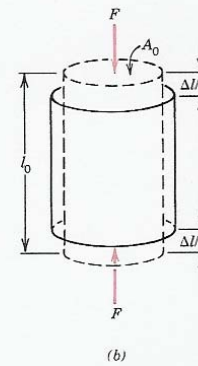
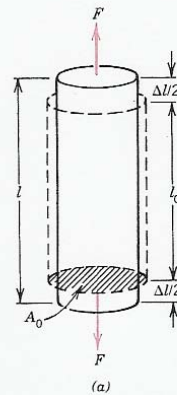
Propriedades mecânicas e ensaios

as propriedades mecânicas medem-se através de ensaios laboratoriais em condições próximas das reais

- a aplicação lenta da tensão é estudada no ensaio de tracção (ou compressão)
- a aplicação rápida da tensão é estudada no ensaio de impacto (mede a capacidade do material absorver energia na fractura)
- a resposta do material a fissuras e entalhes, que actuam como concentradores de tensão, é estudada pela mecânica da fractura
- aplicações cíclicas de tensão características do domínio elástico são estudadas nos ensaios de fadiga
- deformações dos materiais submetidos a tensão e altas temperaturas são estudadas nos ensaios de fluência

Forças e deformações

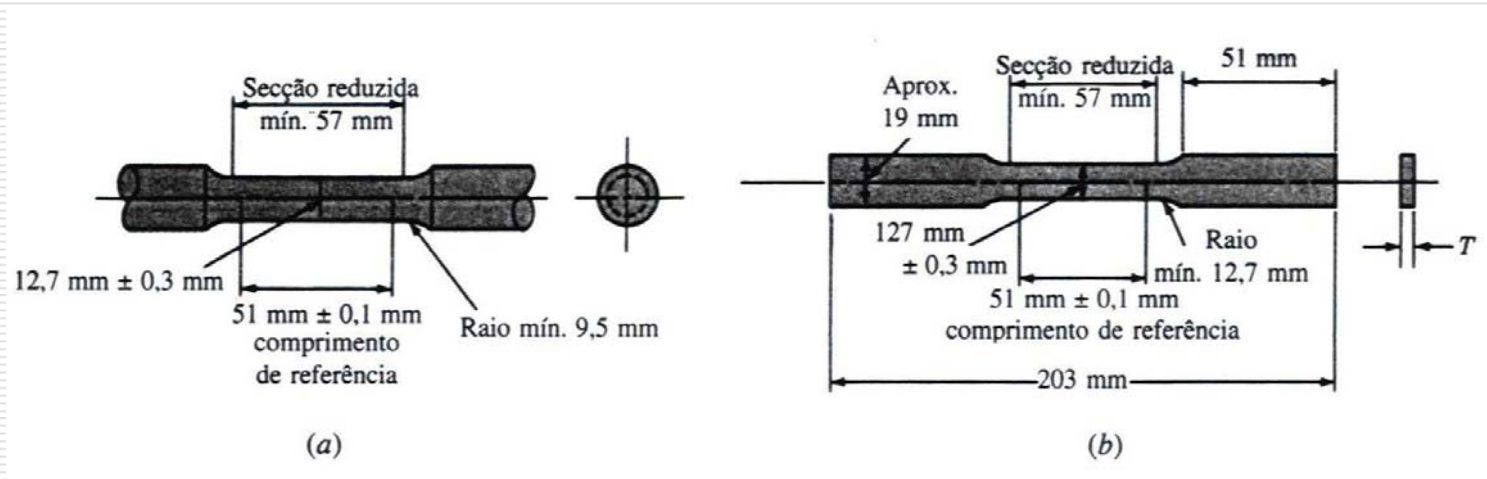
esquema mostrando o resultado da aplicação de uma força de tracção (a) de compressão (b) de corte (c) de torção (d)



Tracção

- o ensaio de tracção é o mais universal de todos os ensaios mecânicos e determina a resistência de um material quando sujeito a um esforço de tracção
- amostras com dimensões padrão (conforme especificado p. ex. na NP EN 10 002-1, 1990, Ensaio de tracção em materiais metálicos) são traccionadas lentamente, a uma taxa de deformação constante
- a força aplicada e a deformação da amostra são medidas e registadas graficamente

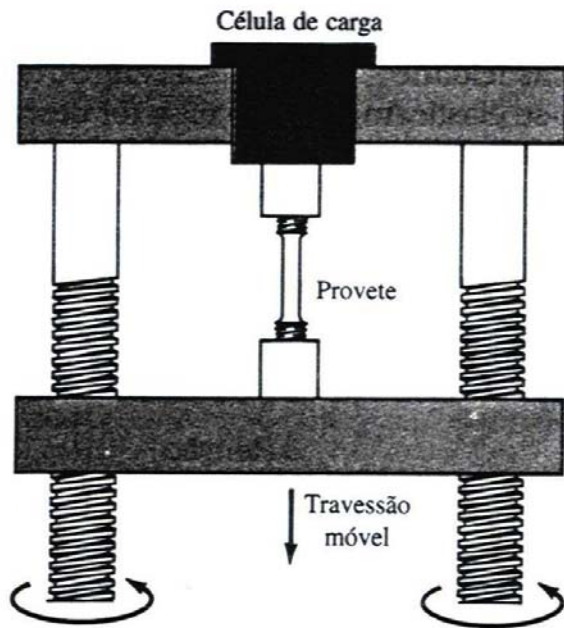
Tracção



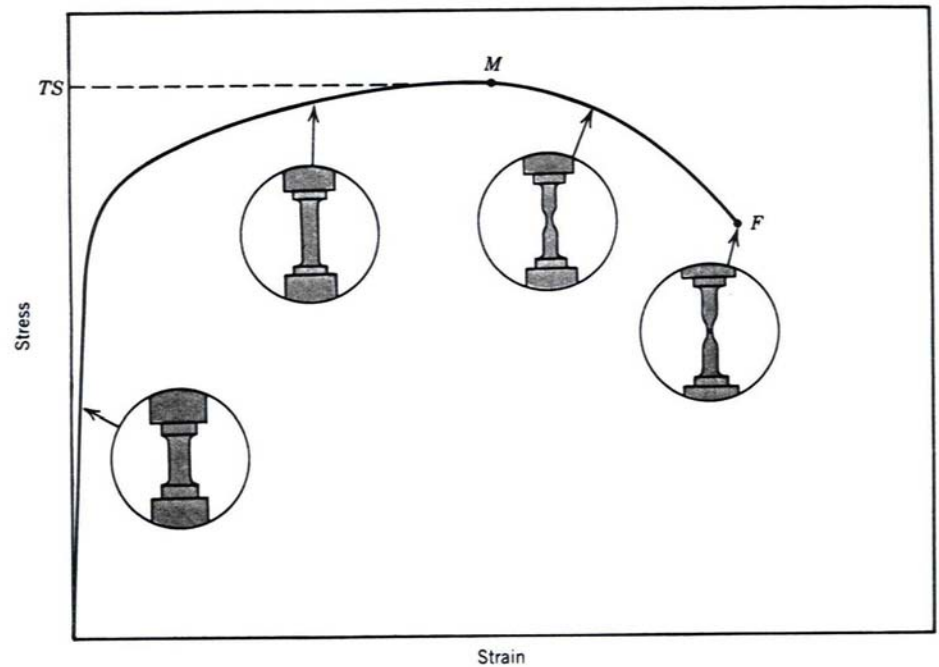
desenho de provetes de tracção com 51 mm de comprimento de referência

(a) provete redondo; (b) provete rectangular

Tracção



esquema de máquina de tracção



curva típica tensão versus deformação

Forças e deformações

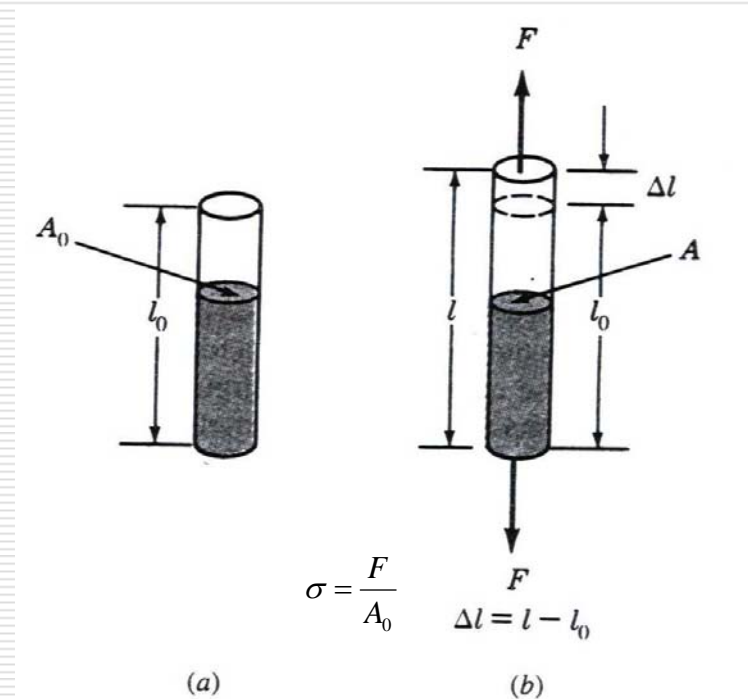
$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \text{tensão nominal}$$

$$\sigma_r = \frac{F}{A_i} \quad \text{tensão real}$$

A_0 = área inicial

A_i = área instantânea

unidades da tensão – Pa (N.m⁻²)



Forças e deformações

extensão nominal e

$$e = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l \text{ (variação de comprimento da amostra)}}{l_0 \text{ (comprimento inicial da amostra)}}$$

extensão real ε

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

módulo (coeficiente) de Poisson ν

$$\nu = -\frac{e \text{ (lateral)}}{e \text{ (longitudinal)}} = -\frac{e_x}{e_z} = -\frac{e_y}{e_z}$$

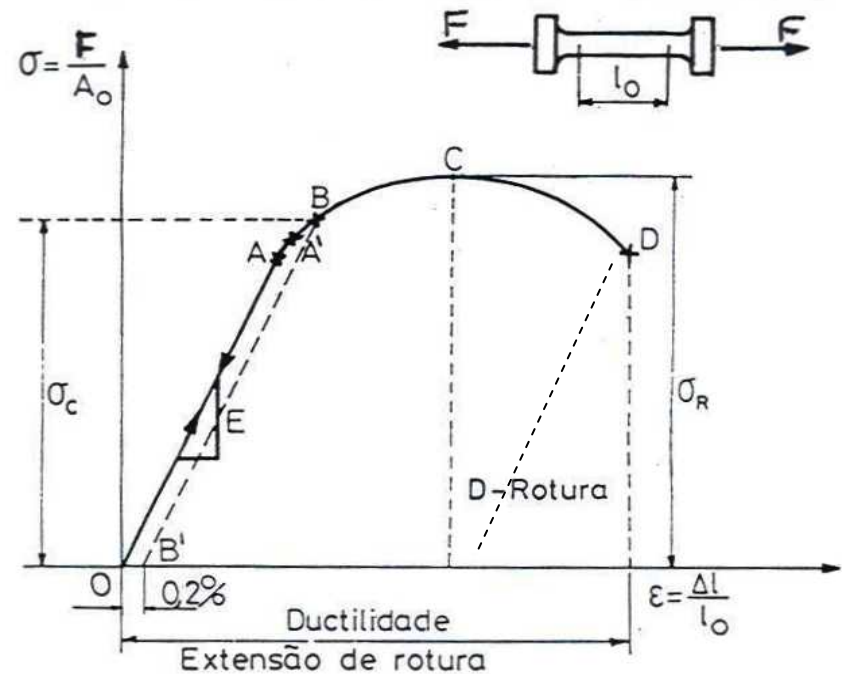
em materiais ideais
 ν vale 0,5

em materiais reais
 ν vale 0,25 a 0,4

Tracção

parâmetros mais relevantes num ensaio de tracção

1. (módulo de Young)
2. tensão limite de proporcionalidade
3. tensão de rotura ou resistência à tracção
4. extensão após rotura (alongamento)
5. coeficiente de estrição (redução de área)

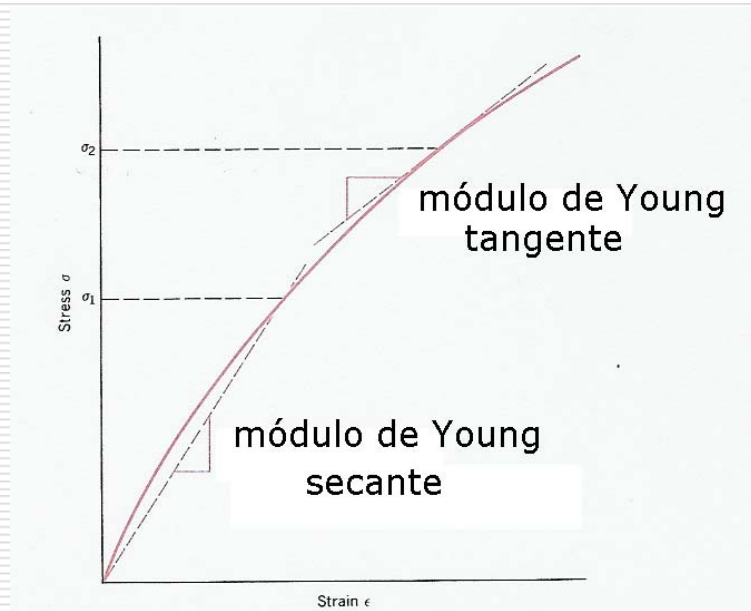
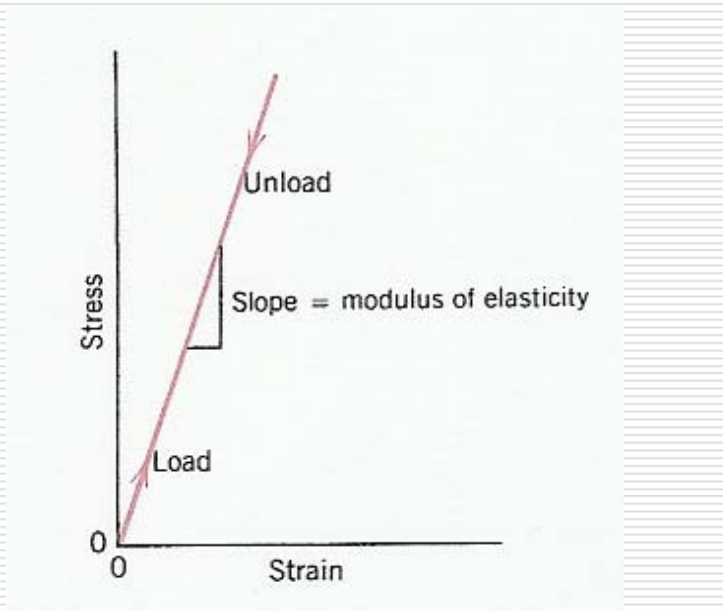


curva tensão-deformação

Tracção

lei de Hooke (no domínio elástico)

$$\sigma = E \cdot e$$

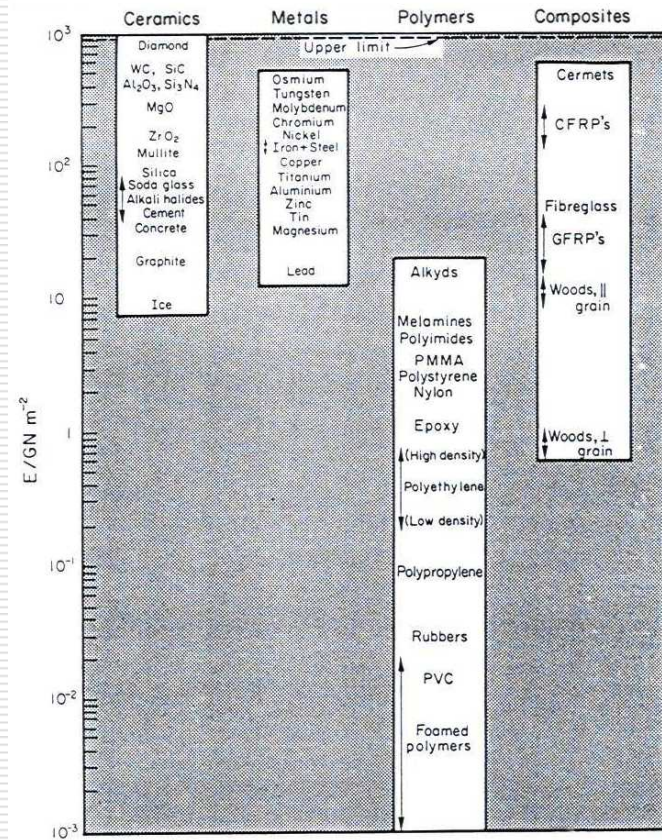


comportamento elástico linear (esquerda) e não linear (direita)

Tracção

Material	Módulo de elasticidade (GPa)	Módulo de distorção (GPa)	Coefficiente de Poisson
Ligas de alumínio	72,4	27,5	0,31
Cobre	110	41,4	0,33
Aço (carbono e de baixa liga)	200	75,8	0,33
Aço inoxidável (18-8)	193	65,6	0,28
Titânio	117	44,8	0,31
Tungsténio	400	157	0,27

constantes elásticas de metais e módulos de Young de vários tipos de materiais



Aplicação da lei de Hooke

Um cabo de aço ($E = 200 \text{ GPa}$) com 20 m de comprimento é sujeito em serviço a uma carga máxima de 1,5 toneladas;

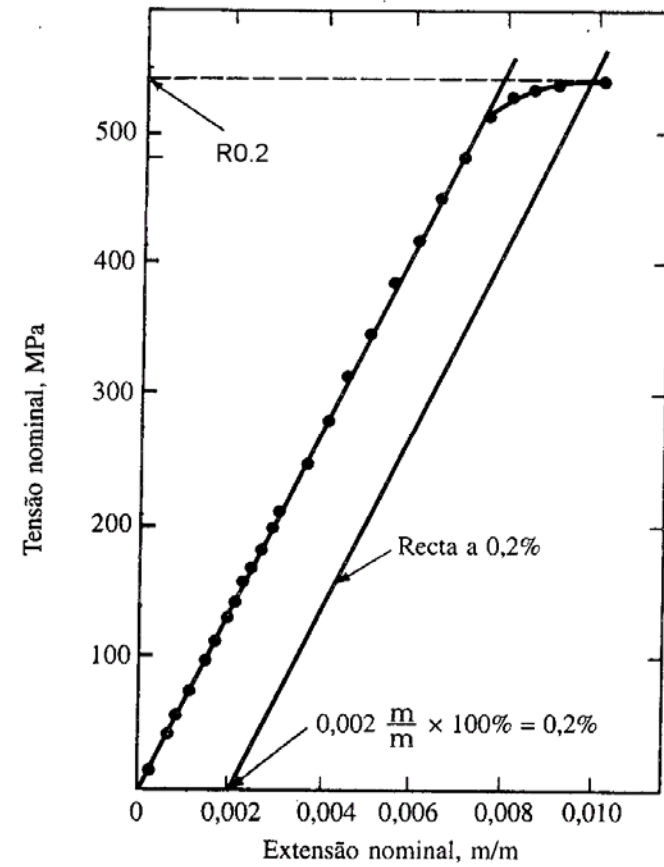
- i) dimensione o diâmetro do cabo (**D**) para que a sua deformação elástica não exceda 5 mm;
- ii) calcule a tensão máxima (σ) aplicada ao cabo

- i) **D** = 19 mm
- ii) σ = 50 MPa

Tracção

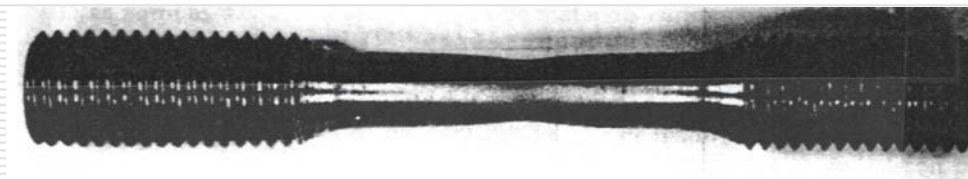
transição do domínio elástico para o plástico

- tensão limite convencional de proporcionalidade a n%



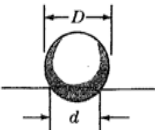
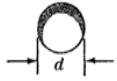
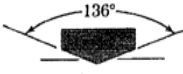


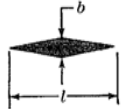
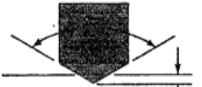



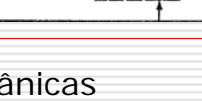

Tracção

- a extensão após rotura e o coeficiente de estricção fornecem informação sobre a ductilidade do material e são um indicador de qualidade (porosidade, inclusões e outros defeitos diminuem a ductilidade do material)



Dureza

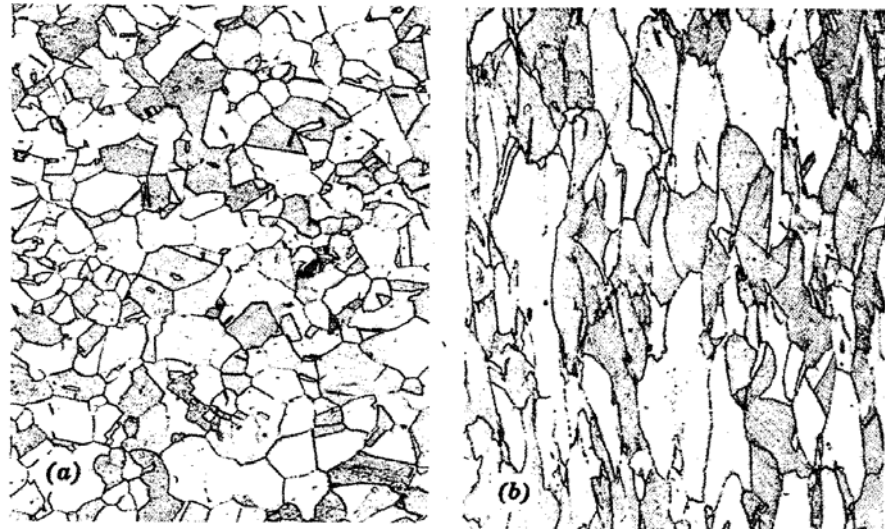
tabela-resumo
de ensaios de
dureza

Ensaio de dureza						
Ensaio	Indentador	Forma da indentação		Carga	Fórmula do número de dureza	
		Vista lateral	Vista de topo			
Brinell	Esfera de aço ou carboneto de tungstênio, com 10 mm de diâmetro			P	$NDB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	
Vickers	Pirâmide de diamante			P	$NDV = \frac{1,72 P}{d_1^2}$	
Microdureza Knoop	Pirâmide de diamante			P	$NDK = \frac{14,2 P}{l^2}$	
Rockwell						
A } C } D }	Cone de diamante			60 kg } 150 kg } 100 kg }	R_A } R_C } R_D }	100-500t
B } F } G }	Esfera de aço com 1,6 mm de diâmetro			100 kg } 60 kg } 150 kg }	R_B } R_F } R_G }	
E	Esfera de aço, com 3,2 mm de diâmetro			100 kg }	R_E }	130-500t

Deformação plástica e recristalização

- a deformação plástica a frio (a temperaturas baixas relativamente à temperatura absoluta de fusão do metal) provoca
- mudança na forma dos grãos (alteração ao nível da micro-estrutura)
- aumento da resistência mecânica e diminuição da ductilidade (alteração ao nível das características macroscópicas)
- estas alterações podem ser neutralizadas por efeito do calor, pelo tratamento térmico de recristalização

Deformação plástica e recristalização



alteração da microestrutura de um
policristal metálico por
deformação plástica

Deformação plástica e recristalização

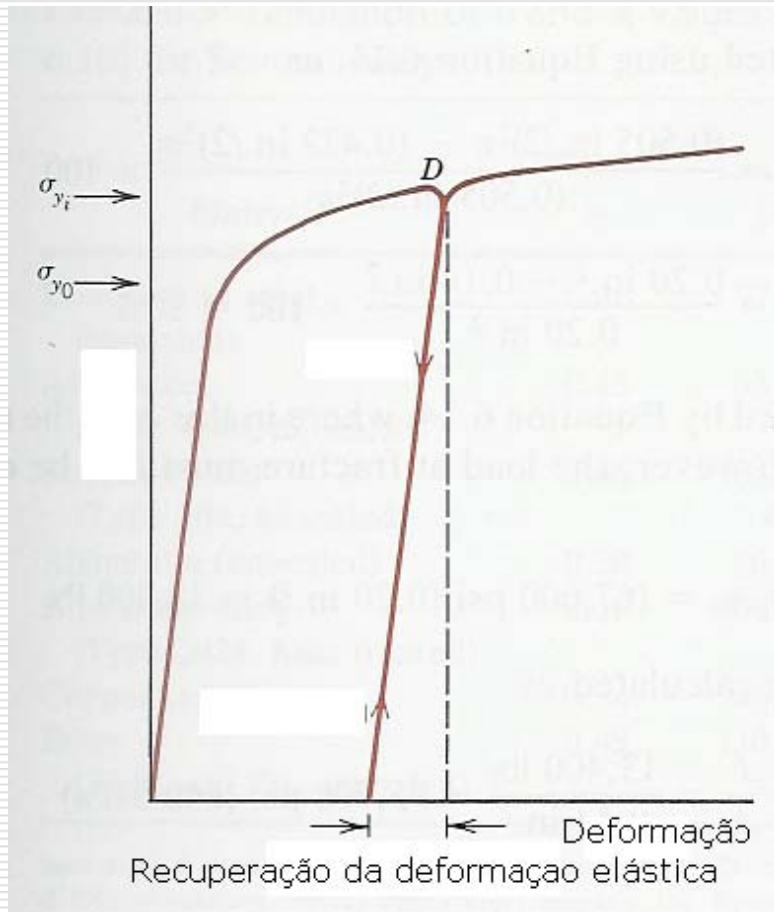
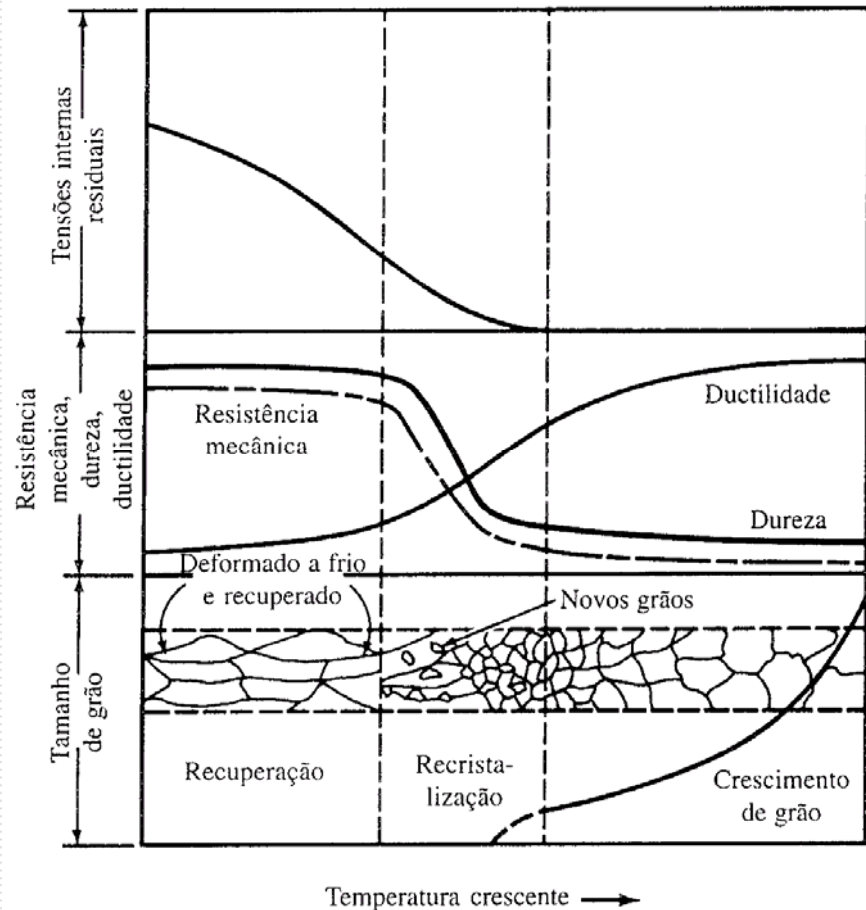


Diagrama tensão vs deformação mostrando a recuperação da deformação elástica e o encruamento por deformação plástica

Deformação plástica e recristalização

evolução de algumas características do metal deformado durante a recristalização

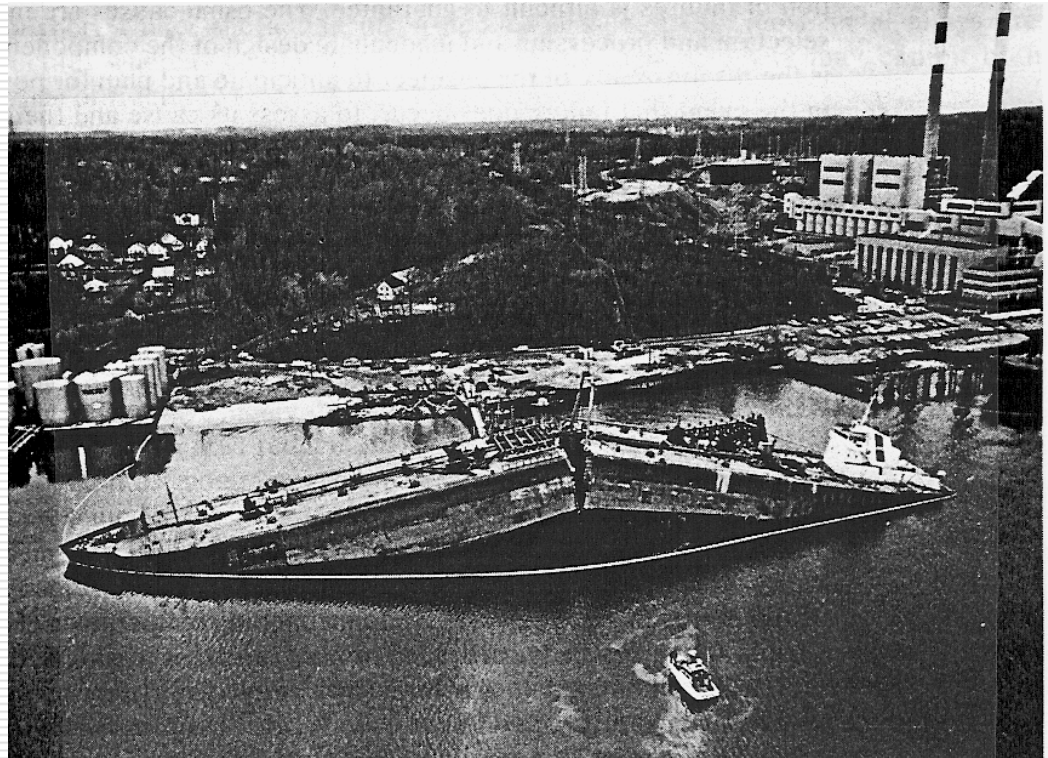


Deformação plástica e recristalização

Metal	T rec. (°C)	T fus. (°C)
Pb	-4	327
Sn	-4	232
Zn	10	420
Al (99.999%)	80	660
Cu (99.999%)	120	1085
Latão (60Cu-40Zn)	475	900
Ni (99.99%)	370	1455
Fe	450	1538
W	1200	3410

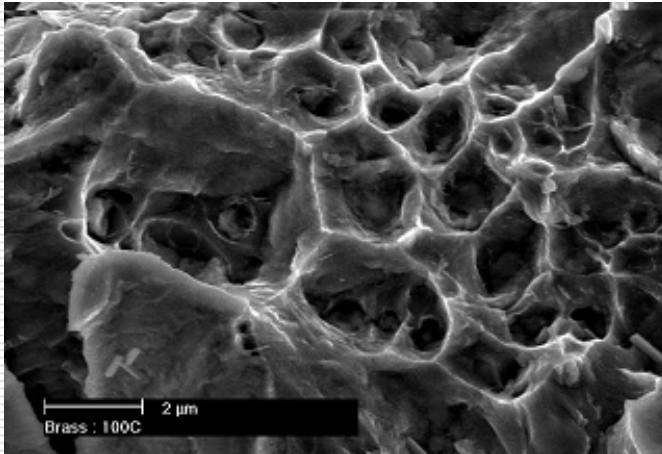
Fractura, fadiga e fluência

- fractura é a separação de um corpo sólido em duas ou mais partes em resposta a uma tensão estática aplicada a frio

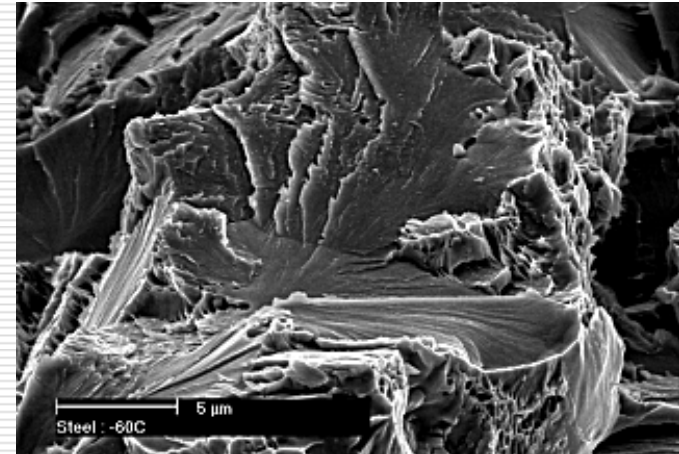


fractura frágil de um navio

Fractura, fadiga e fluência

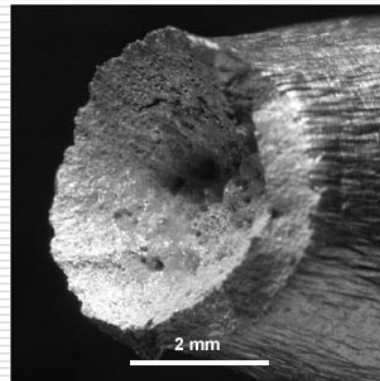
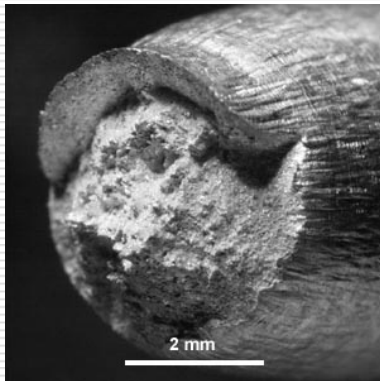


fractura dúctil –
deformação plástica
significativa e propagação
lenta de fissuras

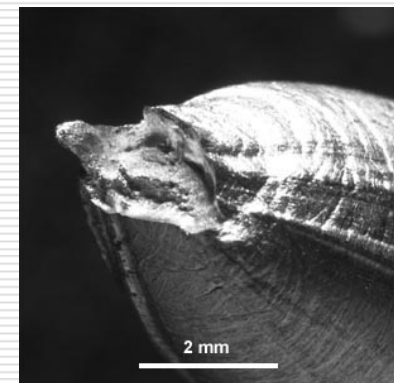
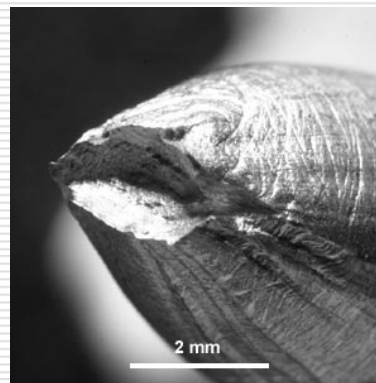


fractura frágil – deformação
plástica reduzida,
propagação rápida de
fissuras em certos planos
cristalográficos (clivagem)

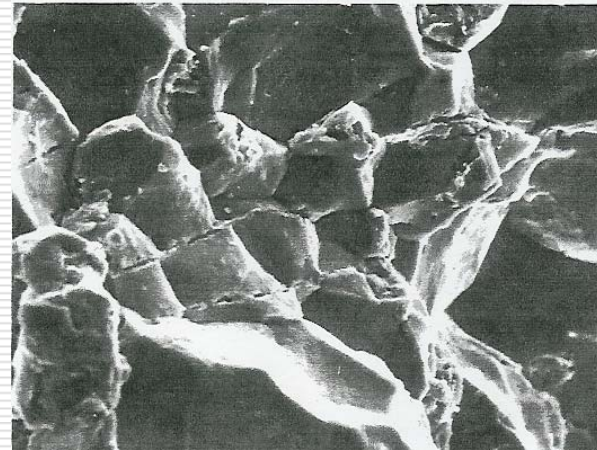
Fractura, fadiga e fluência



superfícies de
fractura dúctil de
dois provetes de
tracção



Fractura, fadiga e fluência



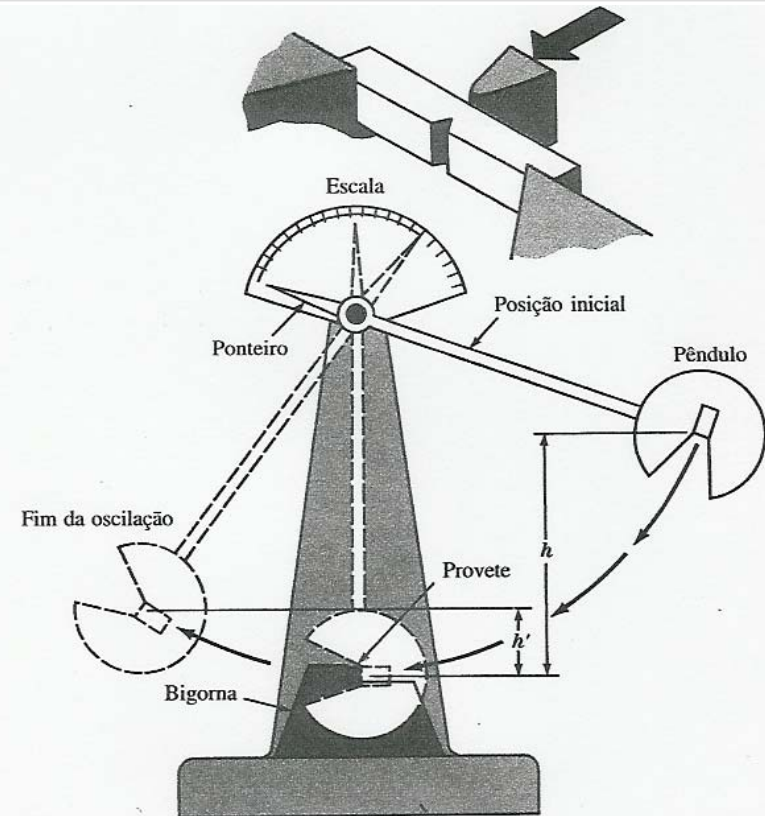
superfícies de fractura frágil em MEV

- transgranular ou por clivagem (esquerda) e
- intergranular (direita)

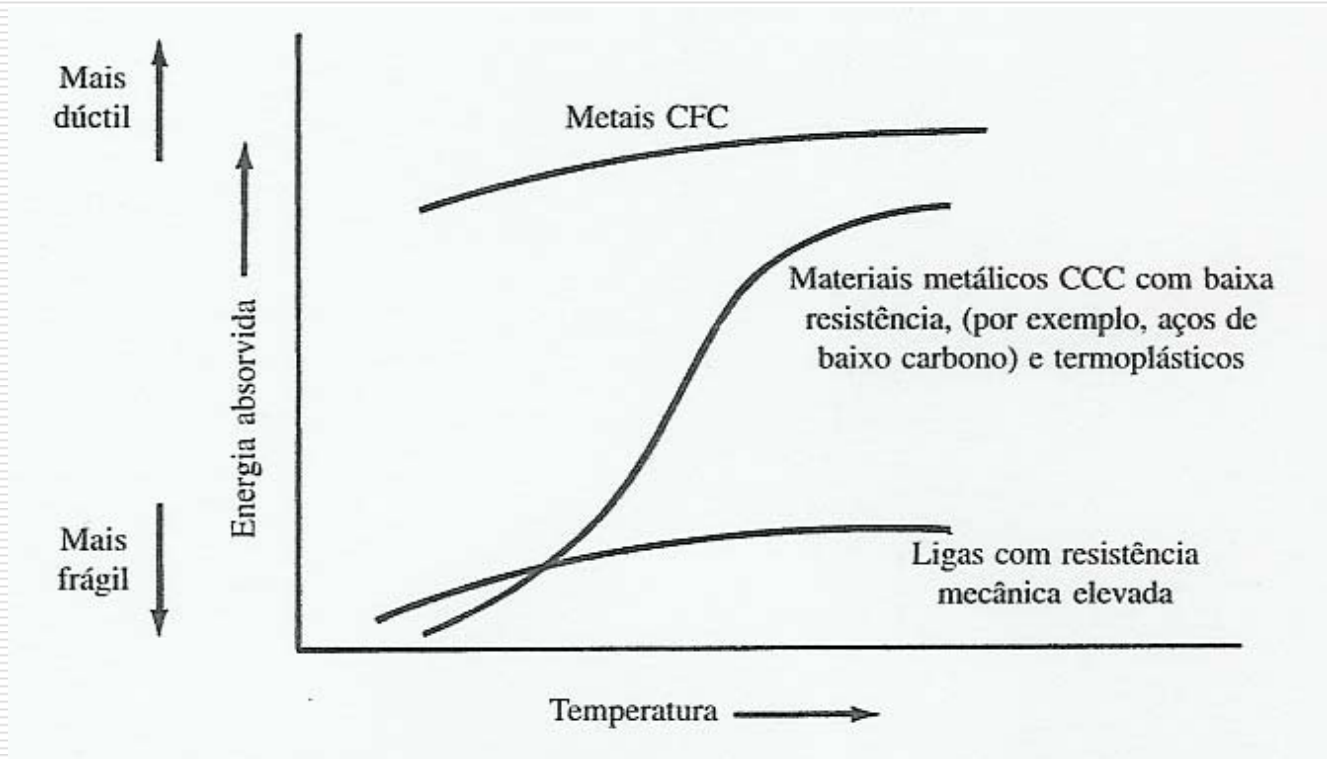
Fractura, fadiga e fluência



o ensaio de choque mede a energia absorvida na fractura por impacto



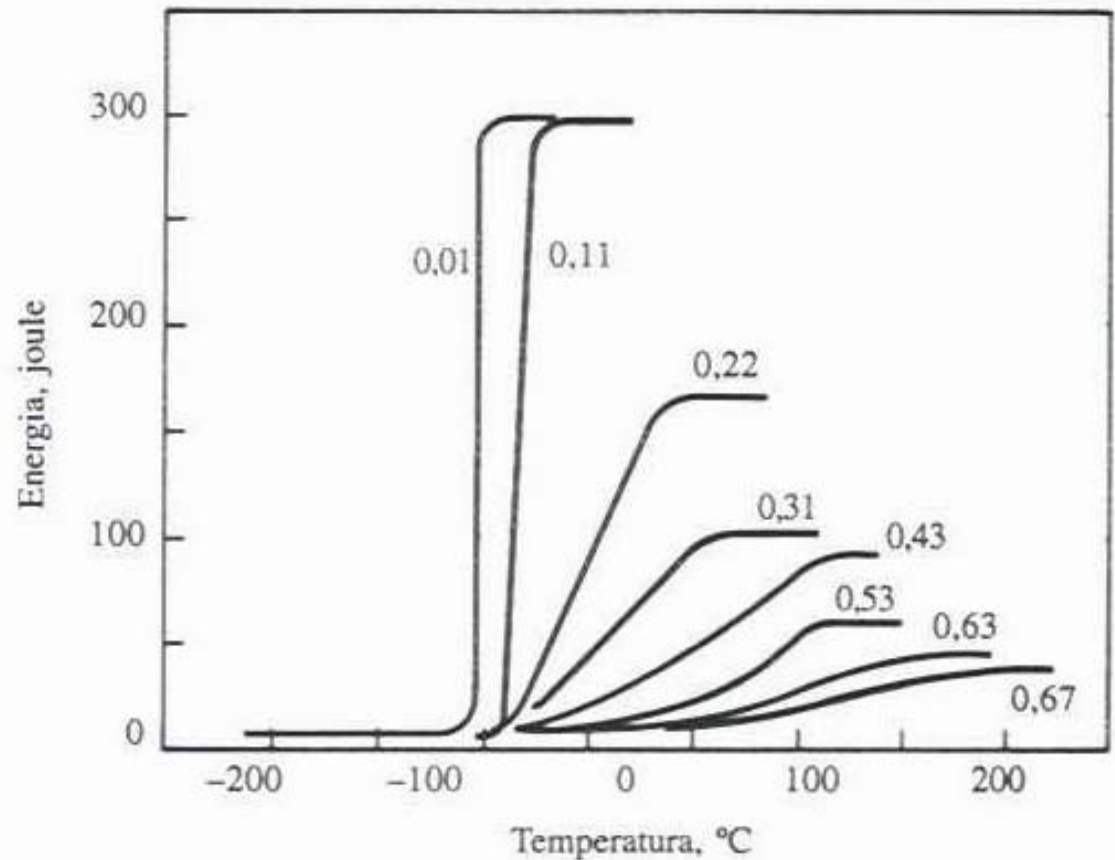
Fractura, fadiga e fluência



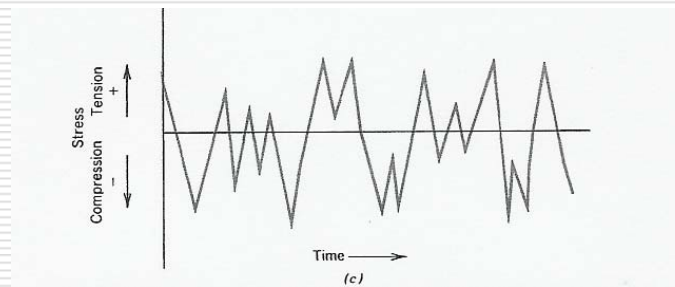
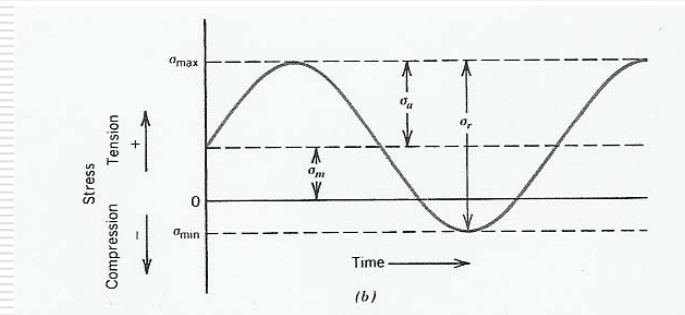
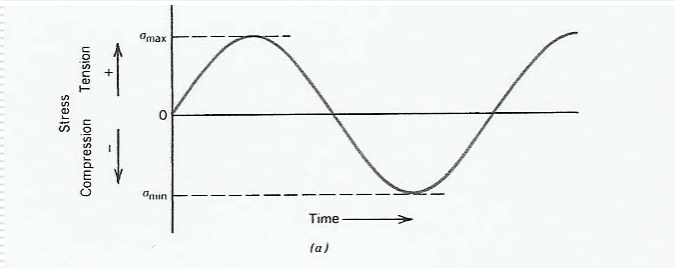
efeito da temperatura na energia absorvida no ensaio de choque

Fractura, fadiga e fluência

efeito do teor em carbono de aços na temperatura de transição dúctil-frágil

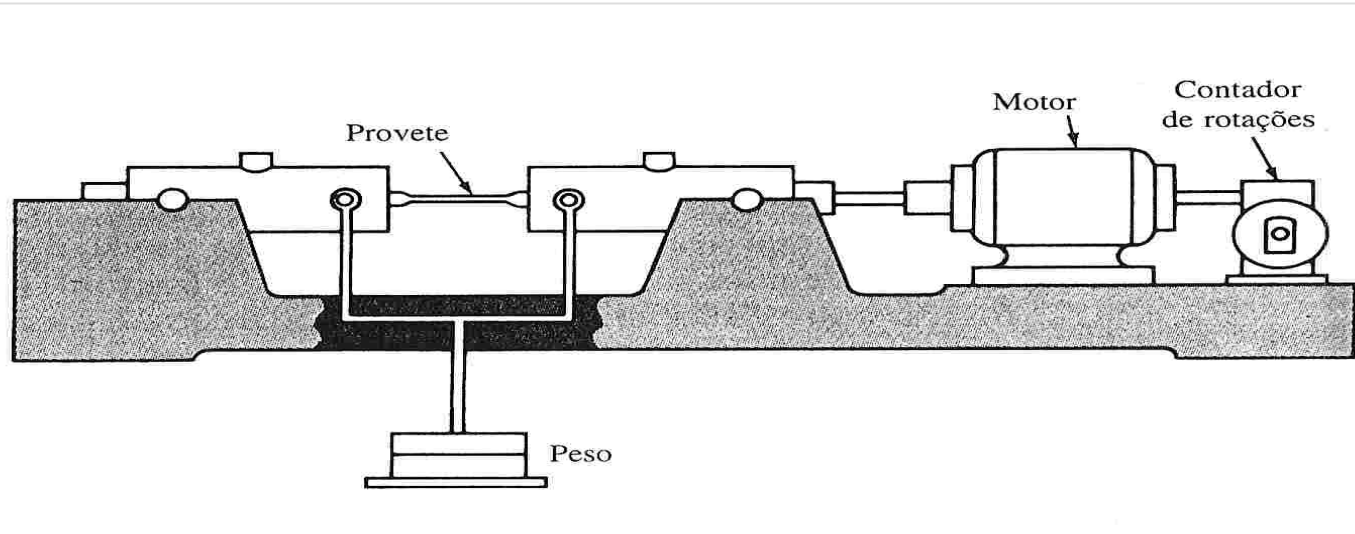


Fractura, fadiga e fluência



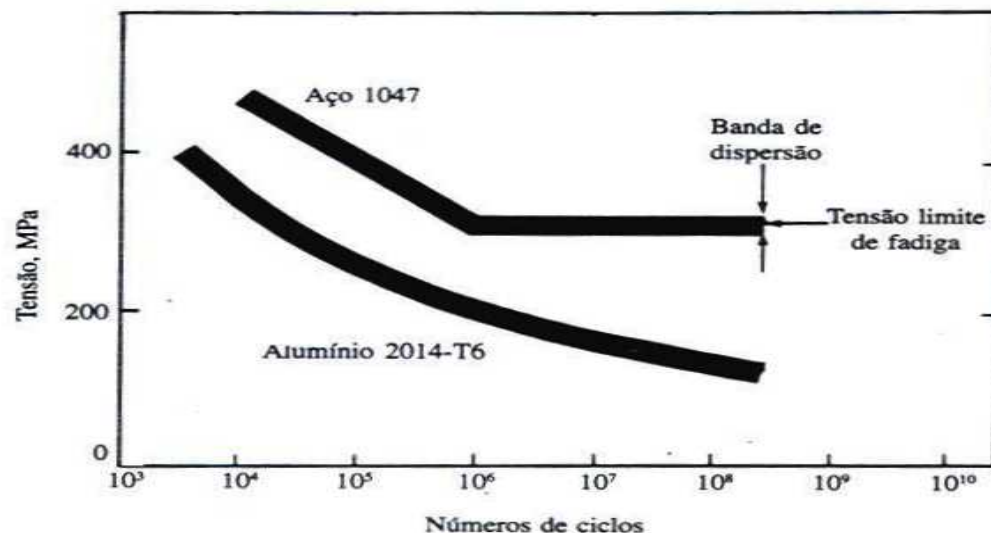
curvas de variação da tensão com o tempo
para solicitações de fadiga

Fractura, fadiga e fluência



esquema de máquina de ensaios de fadiga em flexão rotativa

Fractura, fadiga e fluência



- curvas de fadiga S-N (amplitude de tensão versus logaritmo do número de ciclos) para aço (com limite de fadiga, 35 a 60% da tensão de rotura) e liga de alumínio (sem limite de fadiga)
- o resultado dos ensaios de fadiga apresenta elevada dispersão

Fractura, fadiga e fluência

- uma fissura de fadiga é nucleada num ponto de concentração de tensões (defeito geométrico ou metalúrgico) e cresce na peça sujeita a esforço
- a secção resistente da peça vai diminuindo (a tensão vai crescendo) até que a peça deixa de suportar a tensão aplicada e sofre fractura

Fractura, fadiga e fluência

superfície de fractura por fadiga em flexão rotativa

- a região plana no lado esquerdo da imagem corresponde à área de propagação lenta da fissura
- a rotura rápida ocorreu na região rugosa da direita



Fractura, fadiga e fluência

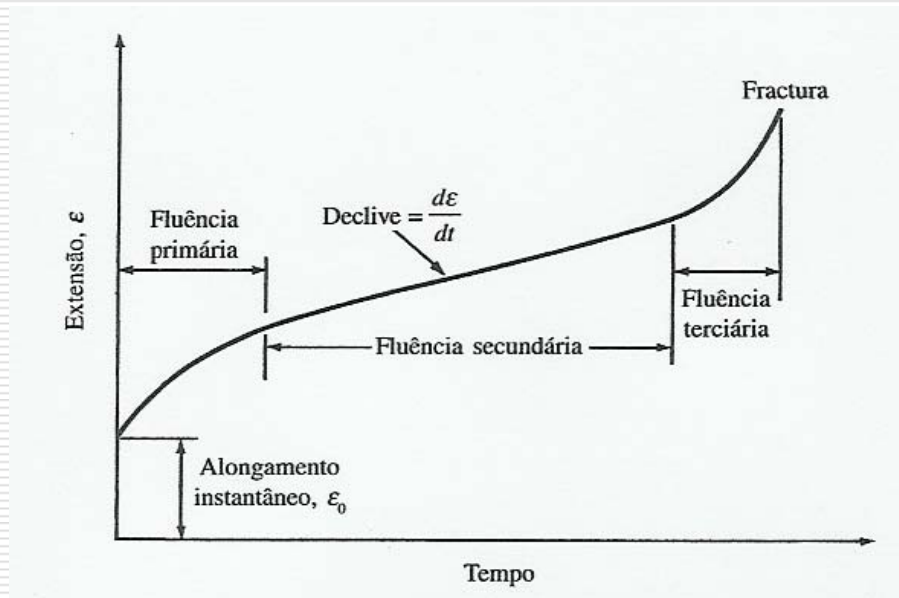
factores mais importantes na resistência à fadiga

- intensidade da tensão aplicada (amplitude de tensão e tensão média)
- rugosidade superficial
- estado da superfície (estados de compressão aumentam a resistência à fadiga, ex. tratamento termoquímicos e mecânicos)
- ambiente (fadiga com corrosão e fadiga térmica)

Fractura, fadiga e fluência

- fluência - deformação plástica ao longo do tempo de materiais sujeitos a uma carga ou tensão constante
- a fluência é particularmente importante em aplicações que envolvem temperaturas elevadas (superiores a $0,4T_m$, sendo T_m a temperatura absoluta de fusão do material)

Fractura, fadiga e fluência



curva típica de fluência de um metal

- fluência primária - o metal encrua (taxa de fluência decrescente)
- fluência secundária - os processos de restauração equilibram o encruamento (taxa de fluência quase constante)
- fluência terciária - o metal sofre estricção e forma vazios nas juntas de grão (taxa de fluência crescente)