



Introdução a Ciência dos Materiais

Propriedades Mecânicas II

Professora: Maria Ismenia Sodero

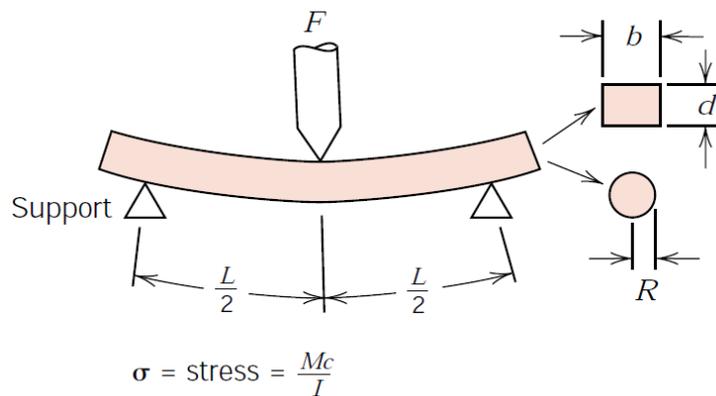
maria.ismenia@usp.br



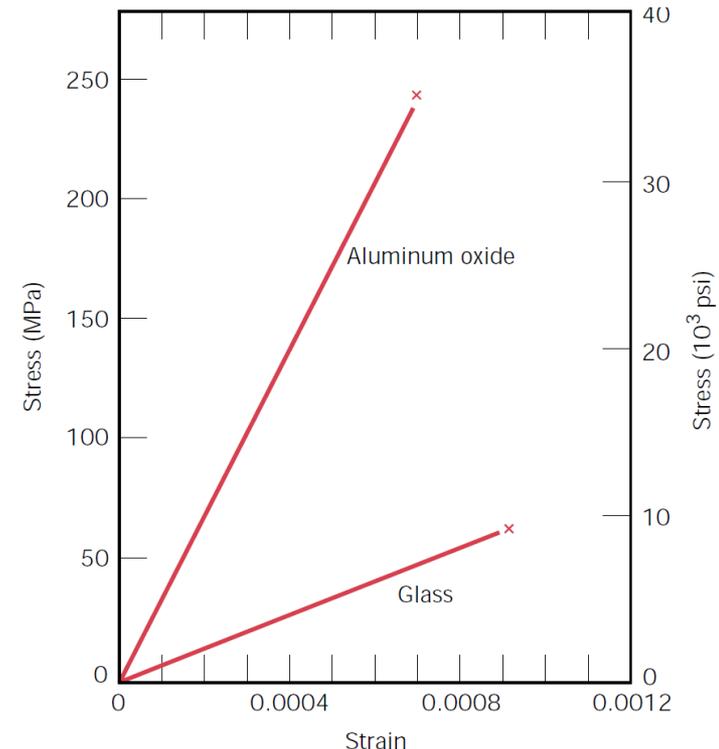
Comportamento mecânico

Materiais cerâmicos

- Resistência à flexão mais comum;
- Ensaio de tração não é muito comum para materiais frágeis;
- Comportamento é usualmente elástico com fratura frágil.



Onde M= momento fletor máximo
c= distância do centro do corpo de prova até as fibras mais externas.
I= momento de Inércia da seção reta
F=Carga aplicada.



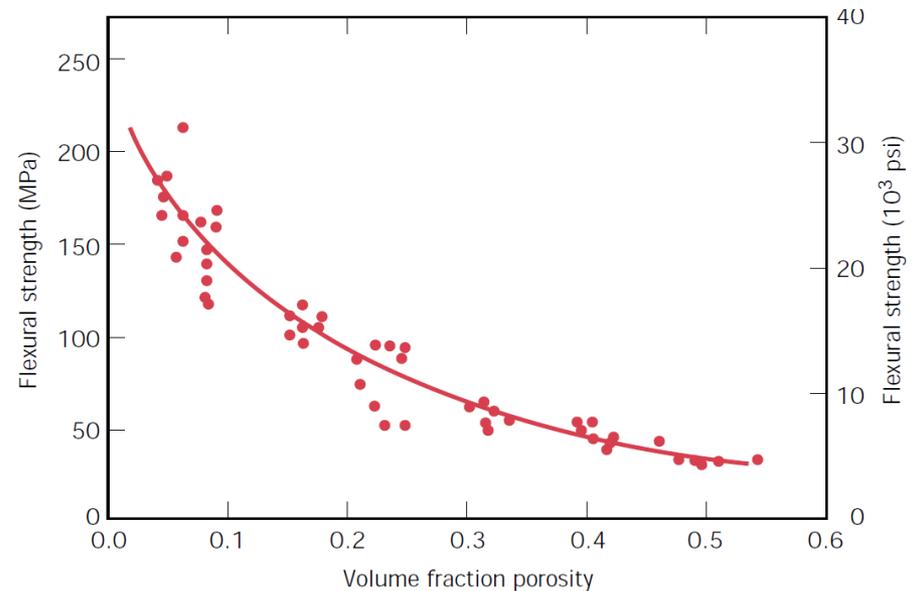
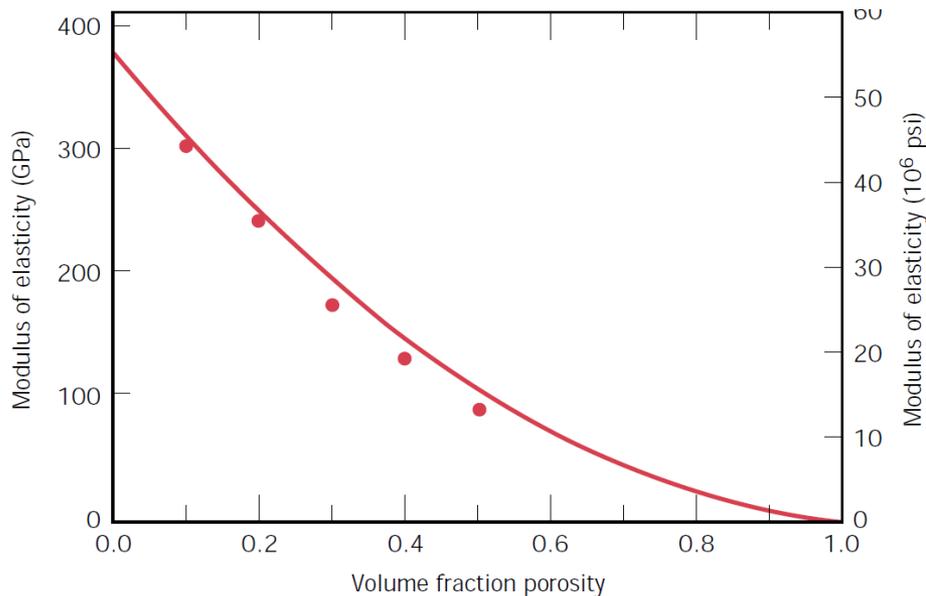
Comportamento tensão-deformação típico até o momento da fratura de óxido de alumínio e vidro.



Comportamento mecânico

Materiais cerâmicos

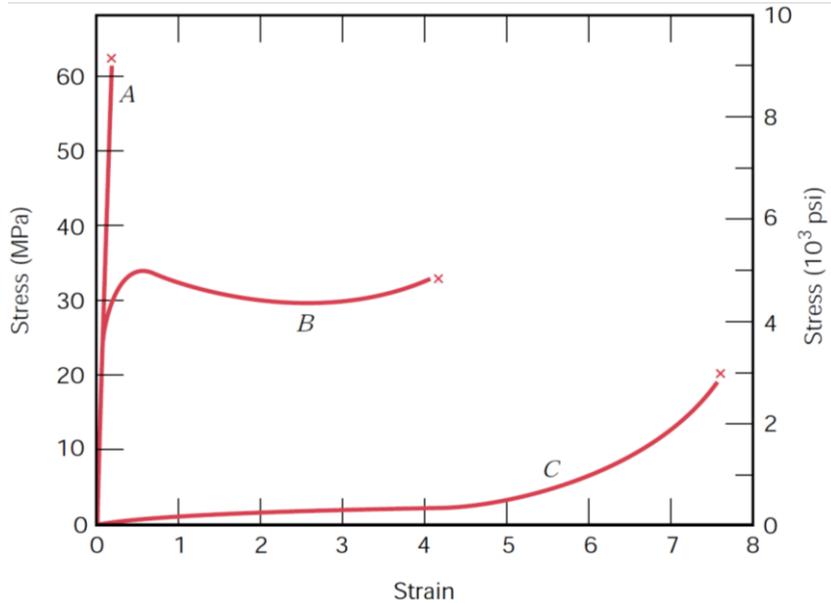
- Porosidade tem influência sobre as propriedades elásticas como sobre a resistência.
- E diminui em função da fração volumétrica da porosidade;
- A porosidade exerce influência negativa sobre a resistência à flexão: poros reduzem a área da seção reta e atuam como concentradores de tensão;



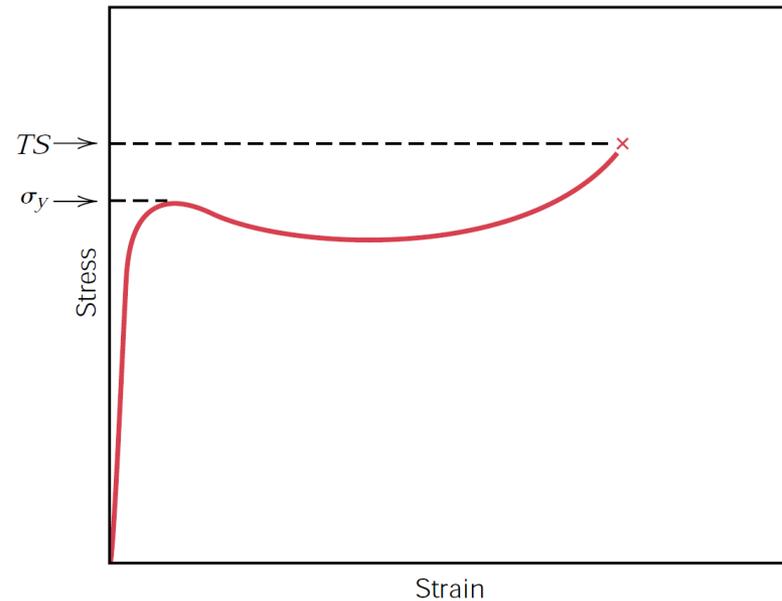


Comportamento mecânico

Materiais poliméricos



Comportamento tensão-deformação para polímeros:
A: fratura frágil
B: início elástico e depois deformação plástica
C: totalmente elástica - elastômeros



Curva tensão deformação esquemática para um polímero plástico, mostrando os limites de escoamento e o limite de resistência a tração.



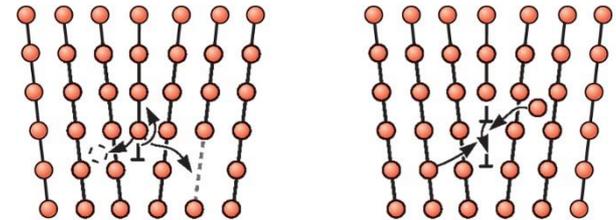
Influência da Temperatura na resistência dos metais

A resistência dos metais ↓ com o ↑ T:

↑ T - > mobilidade das discordâncias, devido ao mecanismo da escalagem (que permite às discordâncias moverem-se para outros planos quando um obstáculo é encontrado) - > concentração de lacunas em equilíbrio;

Pode ocorrer mudança no sistema de deslizamento ou são introduzidos sistemas de deslizamento adicionais;

Sabemos também que os metais trabalhados a frio irão se recristalizar e podem experimentar crescimento de grão e perder resistência mecânica



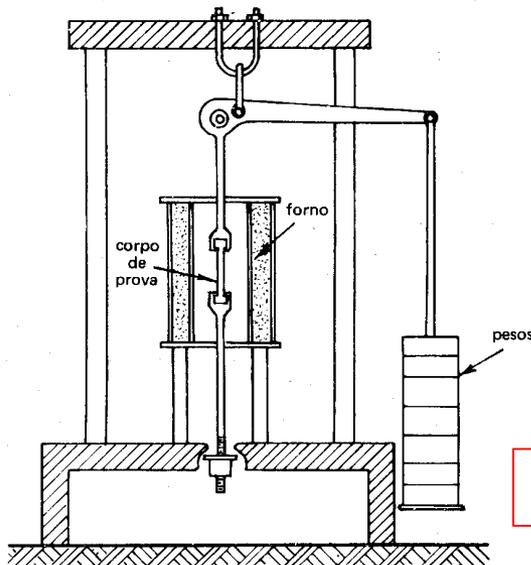
Escalagem de discordâncias (a) ocorre quando átomos da rede deixam a linha de discordância para preencher lacunas ou para ocupar locais intersticiais, (b) quando átomos são atraídos para a linha de discordância, mediante a criação de lacunas ou com a saída de átomos intersticiais.

A elevadas temperaturas, a resistência torna-se muito dependente da taxa de deformação, como do tempo de exposição.



Fluência

- Fluência (creep) é a **deformação plástica** que ocorre em um material sob **tensão ou carga constante** em **função do tempo (ocorre gradualmente ao longo do tempo)**, a uma temperatura constante.
- Deformação progressiva de uma material sob tensão constante.
- Para os metais se torna importante para $T > 0,4T_f$ - Existem metais que exibem o fenômeno de fluência mesmo à temperatura ambiente, enquanto outros resistem a essa deformação mesmo a temperatura elevadas.



Ensaio de fluência

Mecanismos teóricos:

- Difusão de lacunas induzida por deformação;
- Difusão do contorno de grão;
- Movimento de discordâncias
- Escorregamento do contorno de grão;

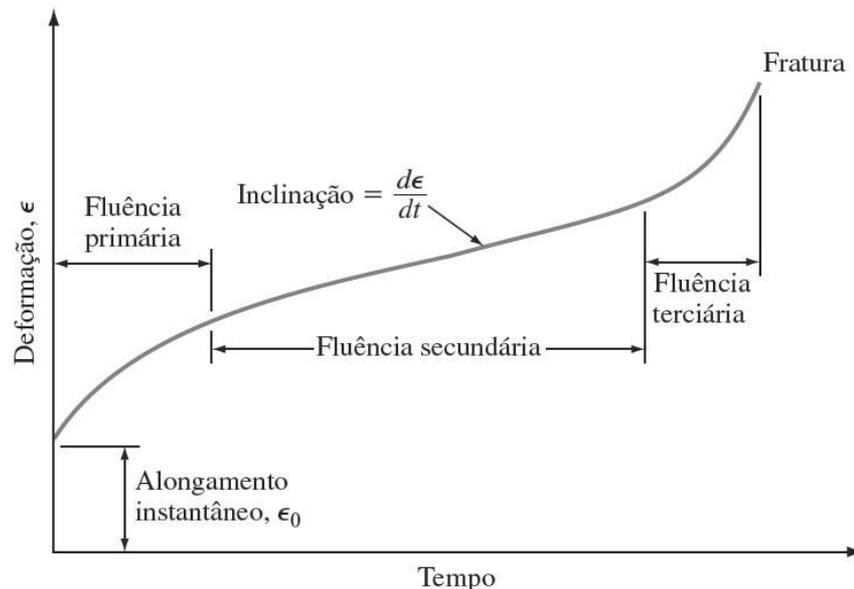


Curva típica de fluência

Fluência primária: representa uma região de taxa de deformação decrescente. Neste estágio, a resistência do material à fluência aumenta devido à sua própria deformação.

Fluência secundária: taxa de fluência aproximadamente constante, que resulta de um processo competitivo entre mecanismos de encruamento e de recuperação. Fluência em estado de equilíbrio e o valor médio da taxa de fluência neste estágio é denominado taxa de fluência mínima.

Fluência terciária: ocorre para altas tensões e altas temperaturas. $d\epsilon/dt$ crescente desenvolvimento de cavidades (poros), formação de trincas e vazios, que levam à ruptura do material.



$$\dot{\epsilon}_M = \text{taxa mínima de fluência} = \frac{d\epsilon}{dt}$$

$$\dot{\epsilon}_M = K \sigma^n \exp\left(\frac{-Q_c}{RT}\right)$$

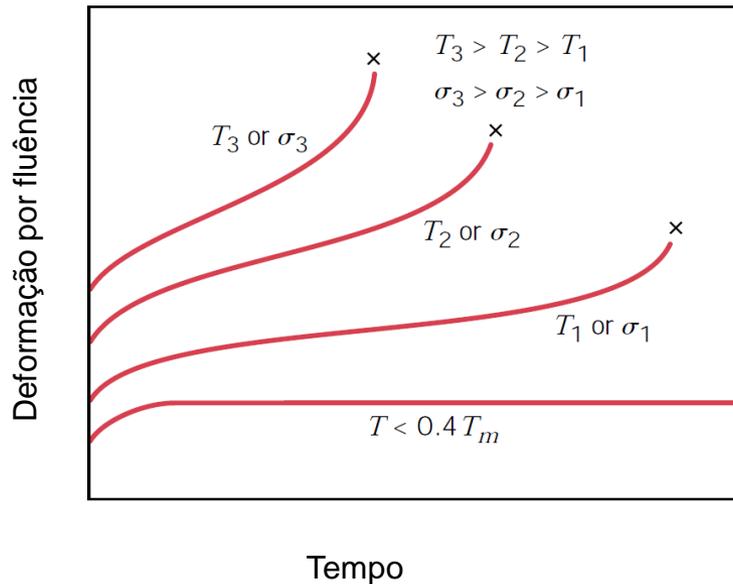
$$\ln \dot{\epsilon}_M = \ln k + n \ln \sigma - \frac{-Q_c}{RT}$$

Onde K e n são constantes de pendentes do material
 Q_c é a energia de ativação para a fluência
R é a constante universal dos gases
T é temperatura

Curva de fluência típica do metal. Representa a deformação do metal ou da liga em questão em função do tempo sob a ação de uma carga constante em uma temperatura também constante.

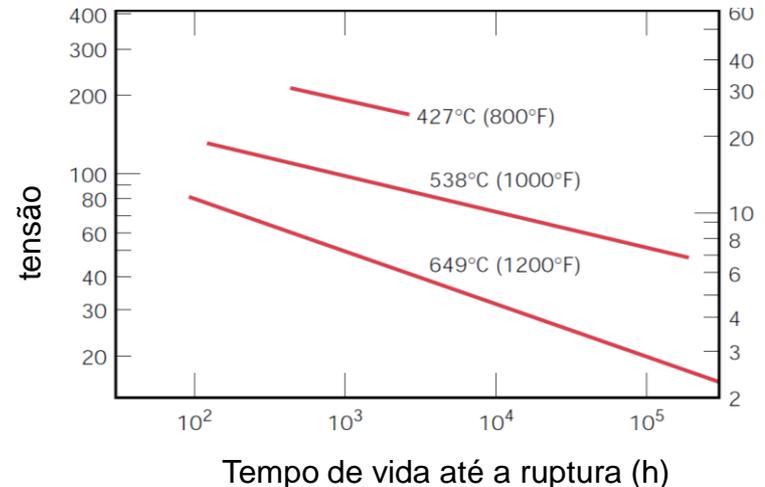


Efeito da Temperatura e Tensão



$$\dot{\epsilon}_M = K \sigma^n \exp\left(\frac{-Q_c}{RT}\right)$$

$$\ln \dot{\epsilon}_M = \ln k + n \ln \sigma - \frac{-Q_c}{RT}$$



Tempo de vida diminui: $t_{f,4} < t_{f,3} < t_{f,2}$

Taxa de fluência aumenta: $(\dot{\epsilon}_{min})_1 < (\dot{\epsilon}_{min})_2 < (\dot{\epsilon}_{min})_3 < (\dot{\epsilon}_{min})_4$

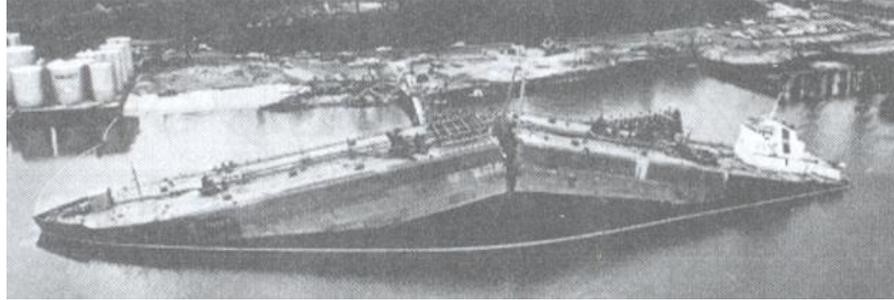
Obs: no caso 1 o material não rompe neste intervalo e poderia permanecer por todo o tempo de operação sem quebrar.

Os resultados de ensaio de ruptura por fluência são comumente apresentados na forma do logaritmo da tensão em função do logaritmo do tempo de vida até a ruptura.

Contornos de grão: \uparrow tamanho de grão $\Rightarrow \uparrow$ resistência à fluência



Comportamento sob Impacto



“Liberty ships” = navios que rompiam ao meio durante a fabricação por soldagem. Os navios foram fabricados para transportar alimentos, remédios e vestimentas para os aliados dos EUA na Europa. Alguns navios romperam ao meio durante a fabricação, outros durante a viagem e outros chegaram intactos.

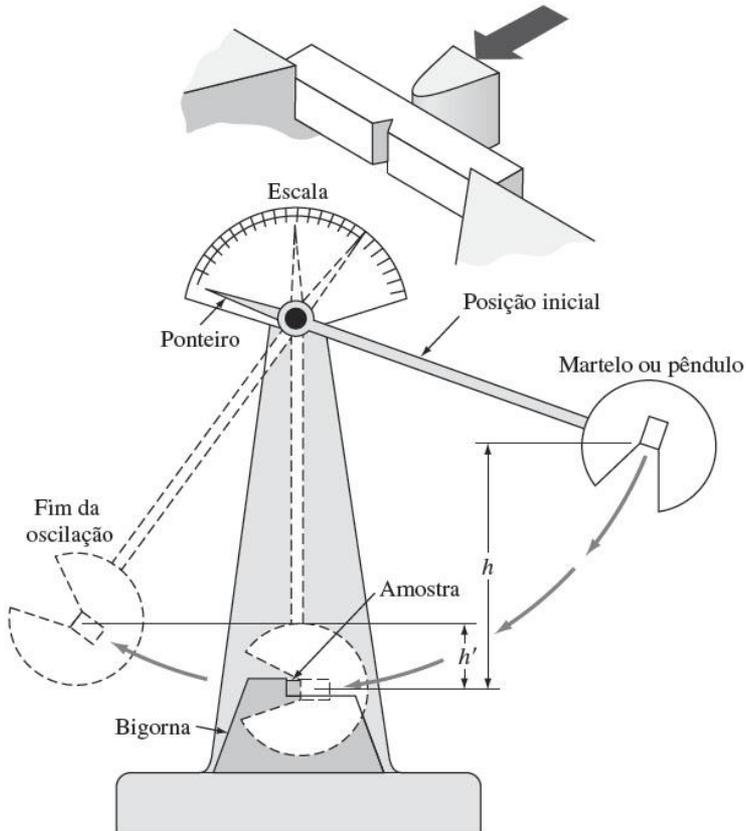
Em algumas ocasiões, metais que são normalmente dúcteis, fraturam abruptamente e com muito pouca deformação plástica:

- Deformação a uma temperatura relativamente baixa;
- Elevada taxa de deformação (velocidade de aplicação da carga);
- Estado de tensão triaxial (introduzido pela presença do entalhe);

Exemplo: polietileno for estirado lentamente, as moléculas poliméricas terão condições de desembaraçar-se ou as cadeias poderão deslizar uma sobre as outras e resultar em grandes deformações plásticas. Porém, se uma carga de impacto for aplicada, não haverá tempo para ocorrência de tais fenômenos e o material se romperá de forma frágil.

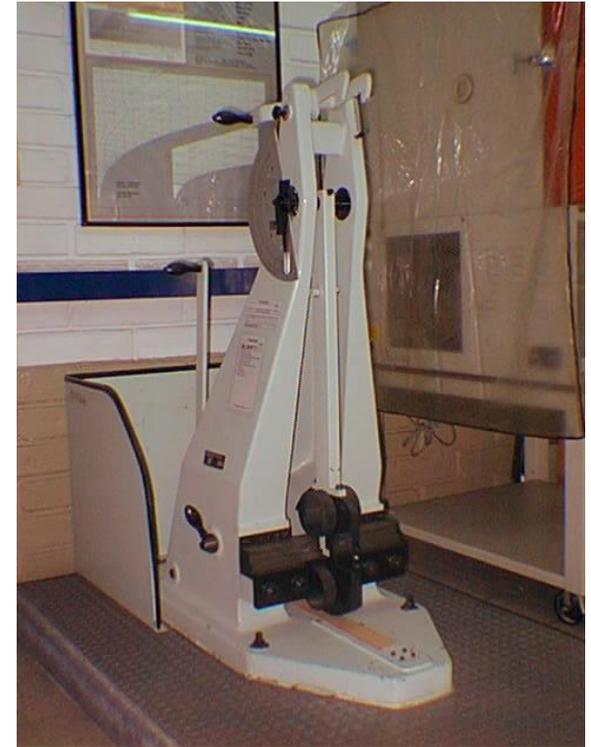
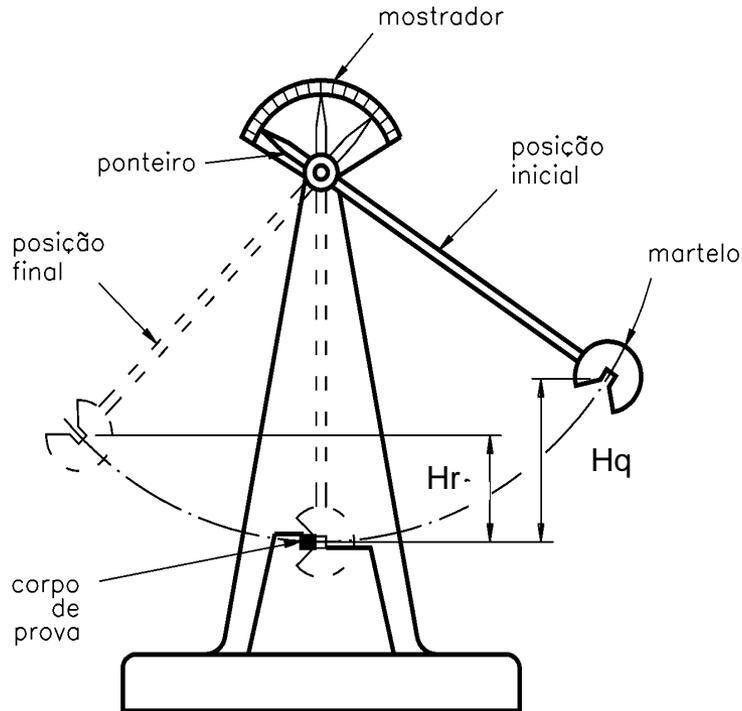
Ensaio de Impacto

- Estuda os efeitos das cargas dinâmicas.
- É usado para medir a tendência de um metal de se comportar de maneira frágil.
- Consiste em medir a **quantidade de energia absorvida** por uma amostra do material, quando submetida à ação de um esforço de choque de valor conhecido.
- O corpo de prova é padronizado e provido de um entalhe para localizar a sua ruptura e produzir um estado triaxial de tensões;
- Não se pode medir satisfatoriamente os componentes das tensões existentes, que podem variar conforme o material utilizado/estrutura interna do material – comparação de materiais usados nas mesmas condições





O Ensaio



$$\Delta E = E1_{\text{potencial}} - E2_{\text{potencial}}$$

$$\Delta E = M \cdot g \cdot h_1 - M \cdot g \cdot h_2$$

Resultado: medida de energia absorvida

$$E_{\text{impacto}} = M \cdot g \cdot (H_q - h_r)$$

Onde:

E – energia absorvida no impacto (j);

M – massa

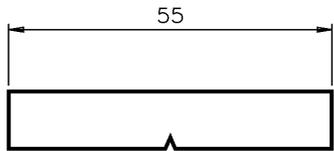
g – aceleração da gravidade (9,81 m/s²)

H_q – altura de liberação do pêndulo (posição inicial);

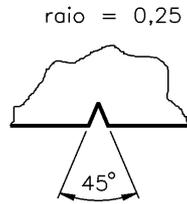
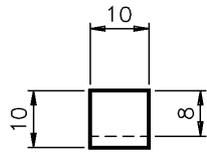
h_r – altura de rebote (posição final).



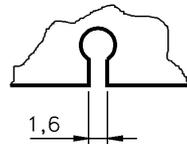
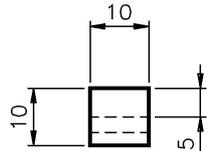
Ensaio Charpy



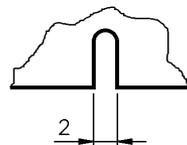
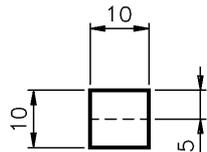
charpy tipo A



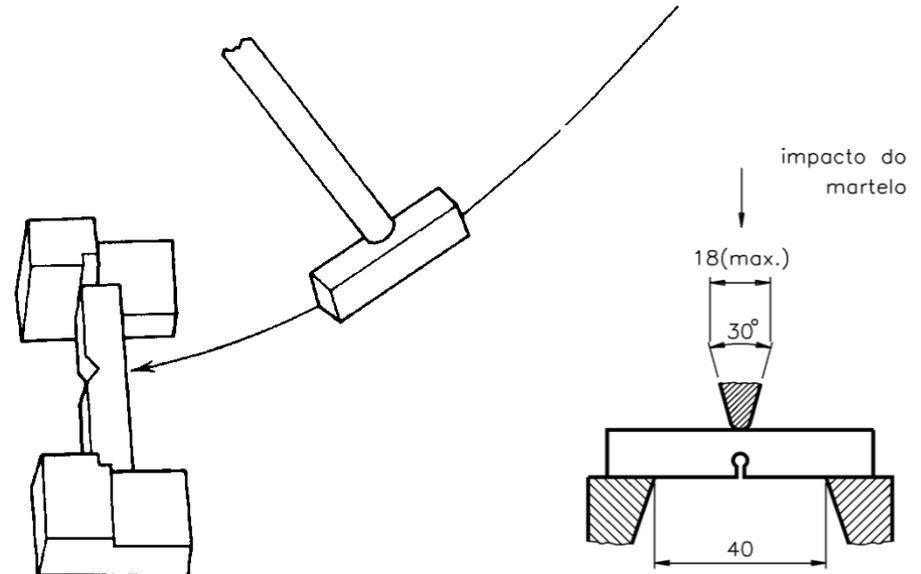
charpy tipo B



charpy tipo C

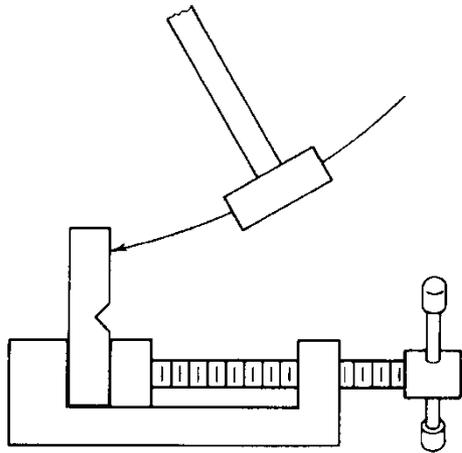
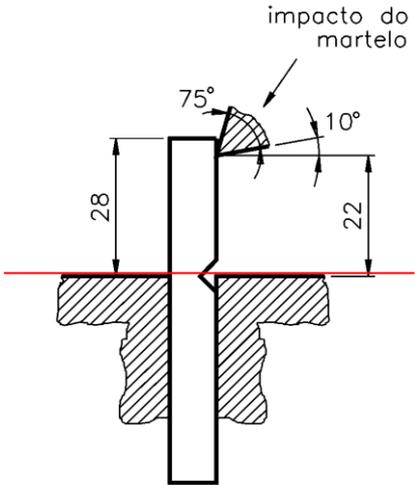


- Os corpos de prova Charpy compreendem três subtipos (A, B e C), de acordo com a forma do entalhe.
- Posição horizontal de montagem dos cdp Charpy.



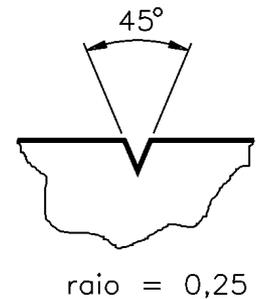
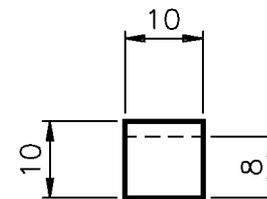
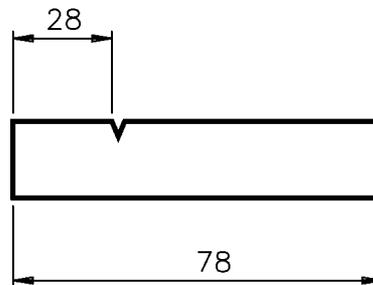


Ensaio Izod



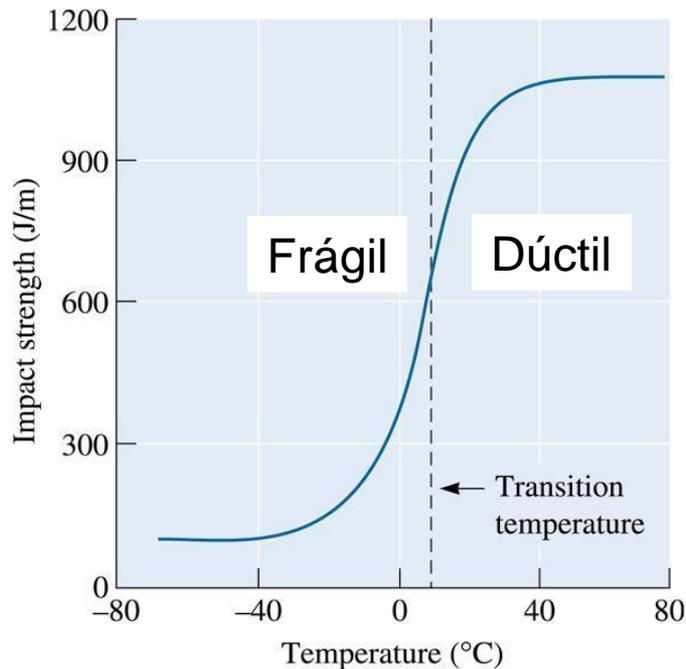
- Posição de montagem vertical do cdp Izod.
- O corpo de prova Izod tem a mesma forma de entalhe do Charpy tipo A, localizada em posição diferente (não centralizada).

izod tipo D





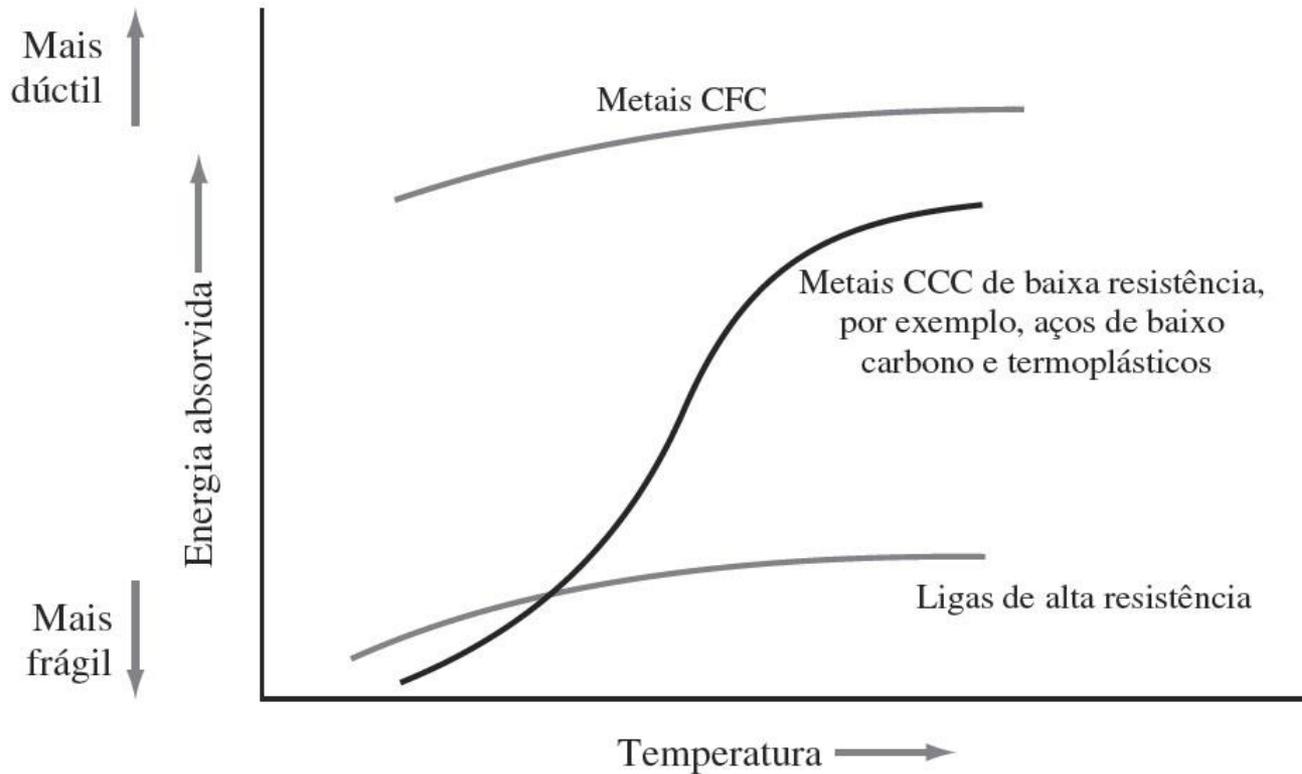
Temperatura de Transição



- Define-se temperatura de transição, como a temperatura, onde há uma mudança no caráter de ruptura do material, passando de dúctil a frágil e vice-versa.
 - Entretanto, essa passagem não é repentina e o melhor seria definir intervalo de transição dos metais.
-
- Essa determinação é importante porque só é conveniente utilizar um material numa região de temperatura onde se tenha a certeza de que a fratura frágil não ocorrerá, quando esse material for solicitado a níveis de tensão no seu campo elástico.



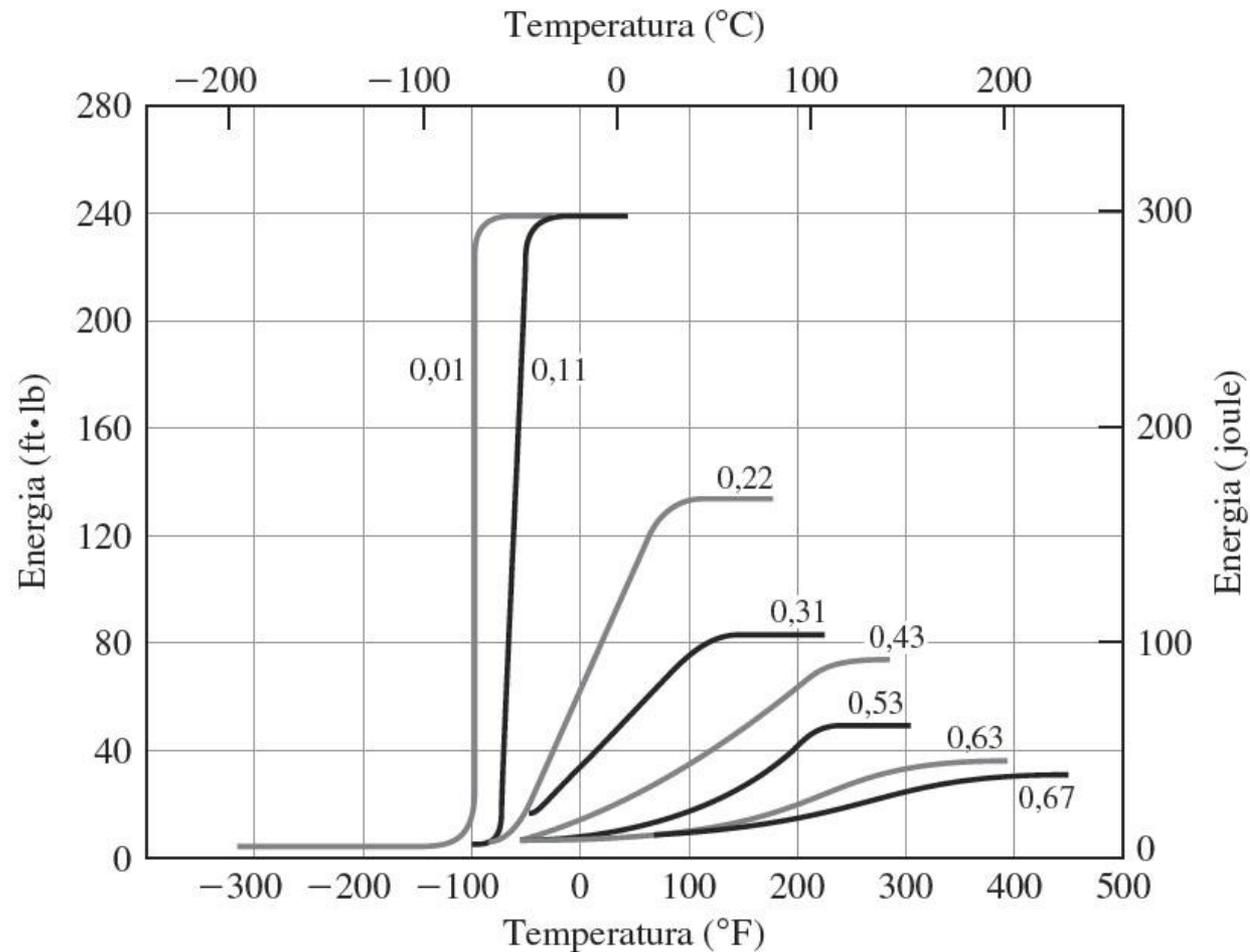
Efeito da temperatura na energia absorvida por impacto para diferentes materiais.



(G. Dieter, "Mechanical Metallurgy", 2. ed., McGraw-Hill, 1976, p. 278. Reimpresso com a permissão da McGraw-Hill Companies.)

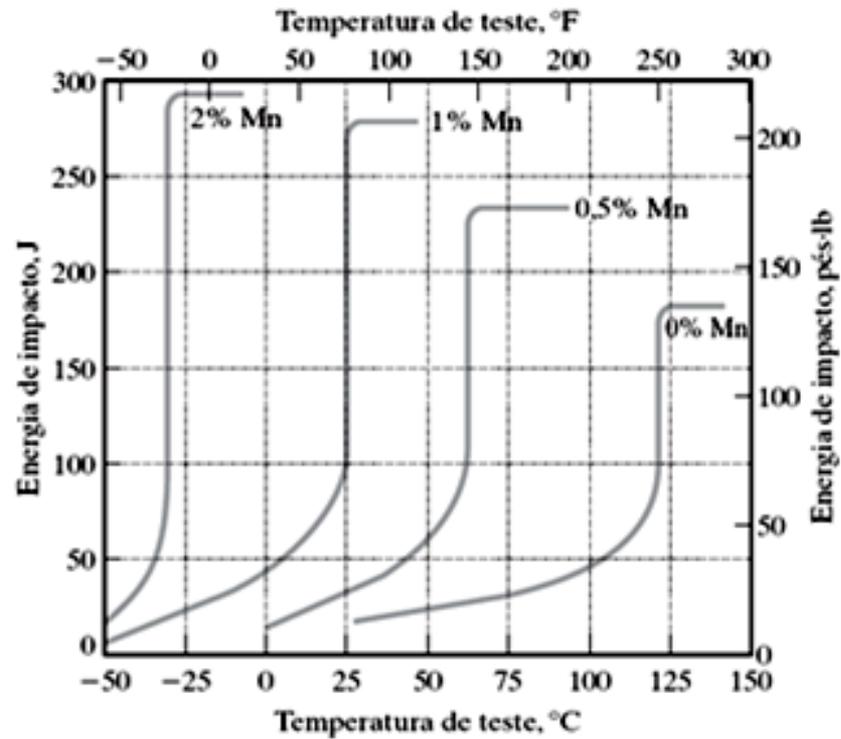


Efeito do teor de carbono de aços recozidos nas curvas da energia de impacto em função da temperatura





Considere o gráfico abaixo para sugerir a quantidade de Mn que deve ser adicionada a liga Fe-C para elaborar uma liga Fe-Mn-C de características dúcteis, para ser utilizada a uma temperatura de 0°C.



(b)



Fadiga

A fadiga é uma forma de falha que ocorre em estruturas sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes (por exemplo: aeronaves, componentes de máquina).

Sob estas circunstâncias é possível que a falha ocorra em um nível de tensão inferior ao limite de resistência à tração ou ao até mesmo inferior ao limite de escoamento.

A falha por fadiga é de natureza frágil, mesmo em metais normalmente dúcteis, pois existe muito pouca ou nenhuma deformação plástica associada à falha.

Ocorre pelo processo de nucleação e propagação da trinca.

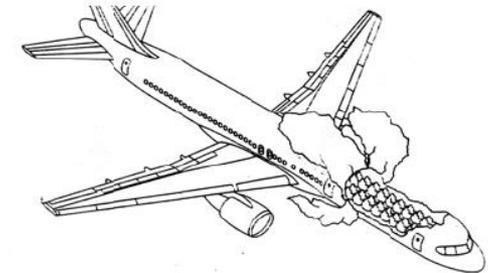
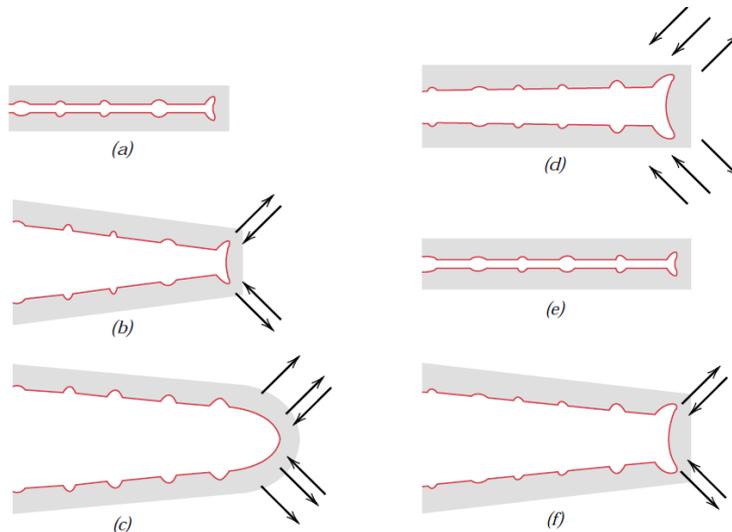


FIGURA 1 - Exemplo de um acidente aéreo causado por fadiga associada à corrosão, em 1988.



FIGURA 2 - Aeronave após o pouso
Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Voo_Aloha_Airlines_243

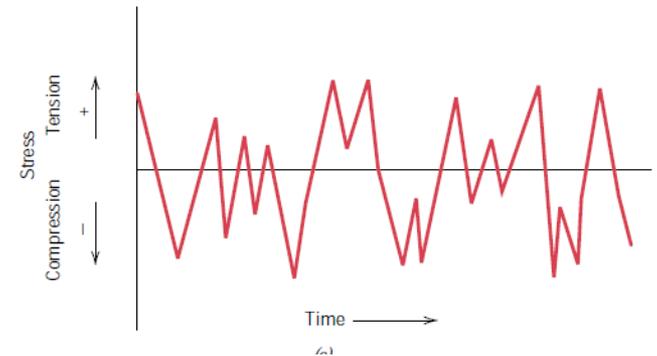
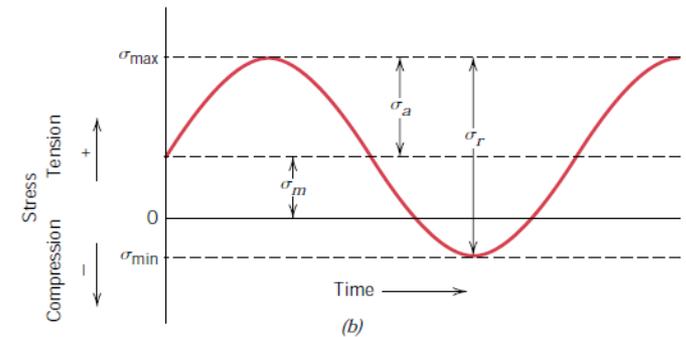
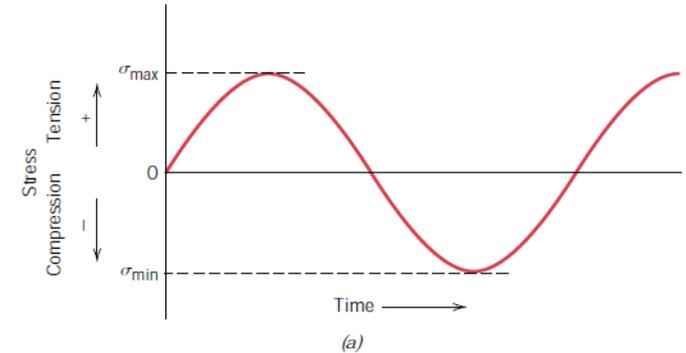


Tensões Cíclicas

Um ciclo de tensão corresponde a um conjunto sucessivo de valores de tensão, que se repete na mesma seqüência e no mesmo período de tempo.

Variação de uma tensão responsável por falhas por fadiga ao longo do tempo

- (a) Ciclo de tensões alternadas, onde a tensão de igual magnitude;
- (b) Ciclo de tensões repetidas, onde as tensões máximas e mínimas são assimétricas
- (c) Ciclo de tensões aleatórias



Tensão Média (σ_M):

$$\sigma_M = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

Intervalo de Tensões (σ_R):

$$\sigma_R = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

Amplitude de Oscilação (σ_a):

$$\sigma_a = \frac{\sigma_R}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

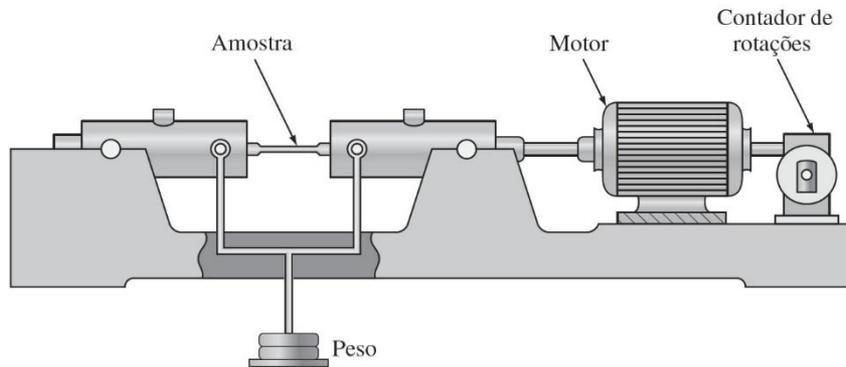
Razão de variação de tensões (R_f):

$$R_f = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

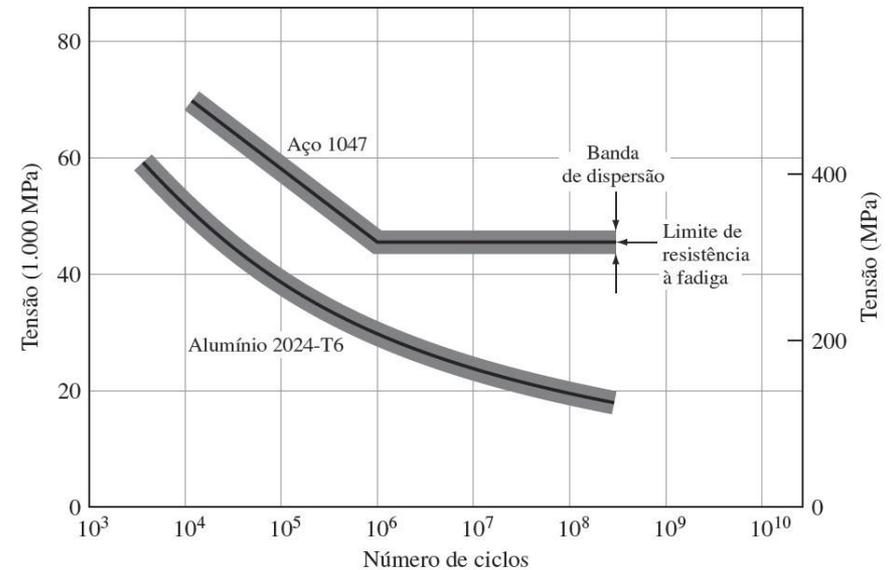


Ensaio de fadiga

- Vários tipos de testes para determinar a resistência a fadiga de um material. Um ensaio muito utilizado é o de flexão rotativa ou alternada, em que um corpo de prova é submetido a tensões alternadas de mesma amplitude de tração e de compressão enquanto gira.

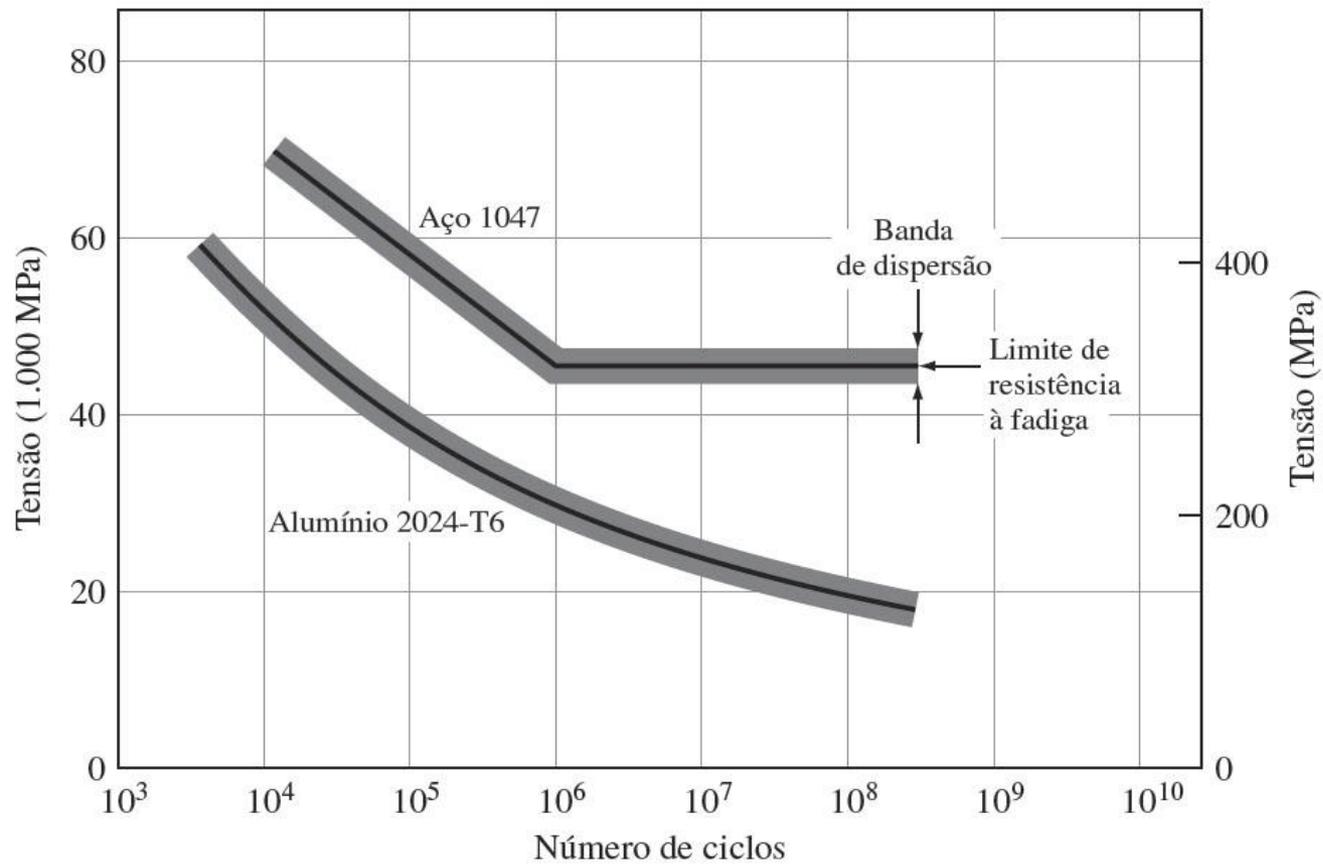


Esquema de uma máquina de fadiga por flexão alternada





A curva SxN





Correlação entre LRT e TRF

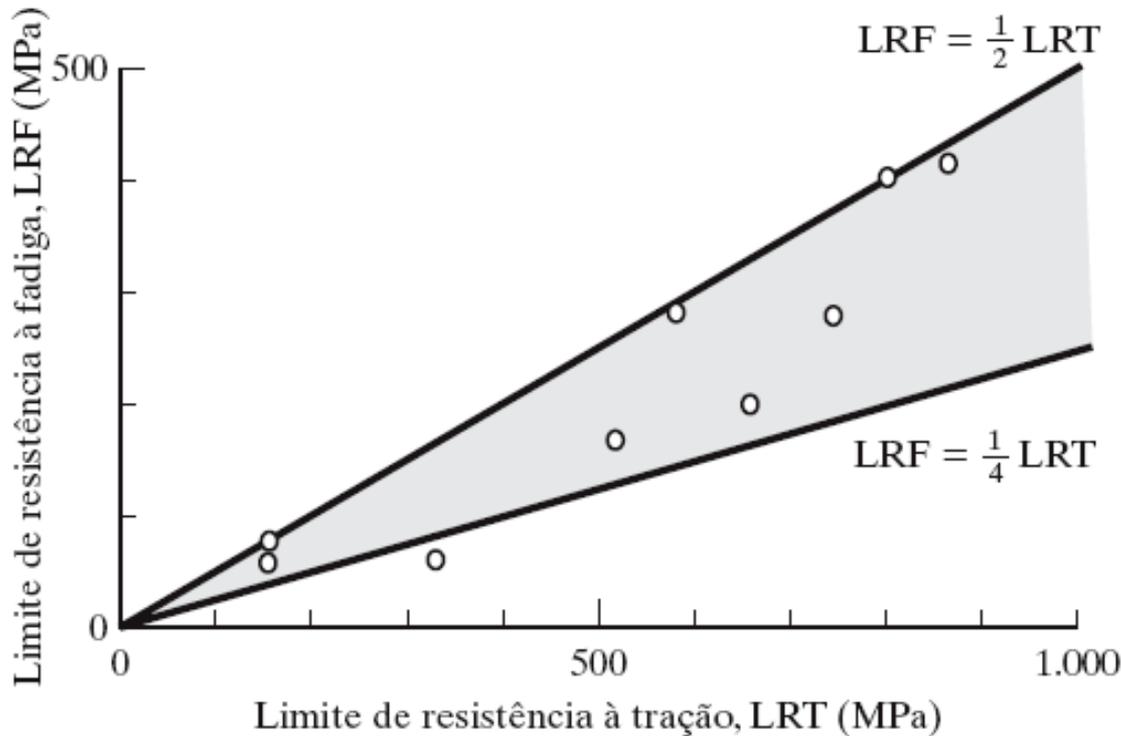


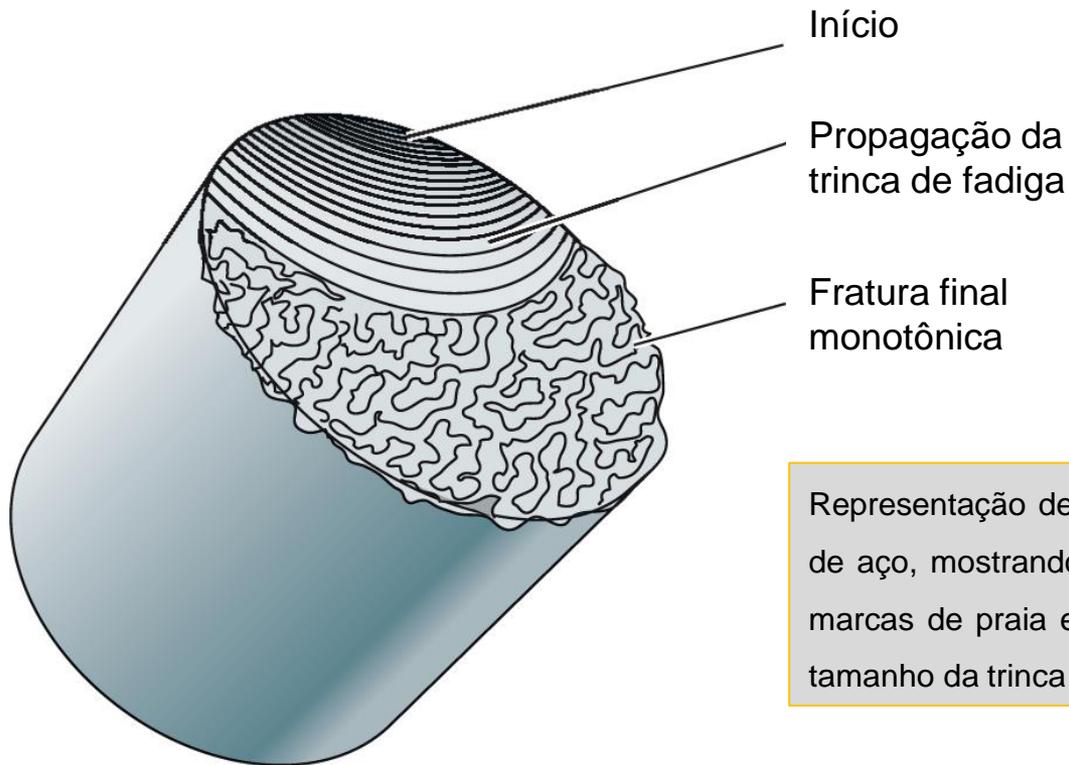
Tabela 8.4 Comparação entre o limite de resistência à fadiga (LRF) e o limite de resistência à tração (LRT) para algumas das ligas da Tabela 6.1

Liga	LRF (MPa)	LRT (MPa)
1. Aço carbono 1040	280	750
2. Aço 8630 de baixa liga	400	800
3. a. Aço inoxidável 304		515
3. b. Aço inoxidável 304	170	
7. a. Alumínio 3003-H14	62	150
8. b. Magnésio AM100A	69	150
9. a. Ti-5Al-2,5Sn	410	862
10. Bronze com alumínio, 9% (liga de cobre)	200	652
11. Monel 400 (liga de níquel)	290	579
12. Zinco AC41A	56	328

Figura 8.16 Gráfico dos dados da Tabela 8.4 que mostra como o limite de resistência à fadiga geralmente vale de um quarto à metade do limite de resistência à tração.



A Fratura de Fadiga



Representação de uma superfície de fratura por fadiga em um eixo de aço, mostrando a região de início, a região de propagação com marcas de praia e a ruptura final monotônica que ocorre quando o tamanho da trinca ultrapassa um valor crítico para a tensão aplicada.



A Fratura de Fadiga

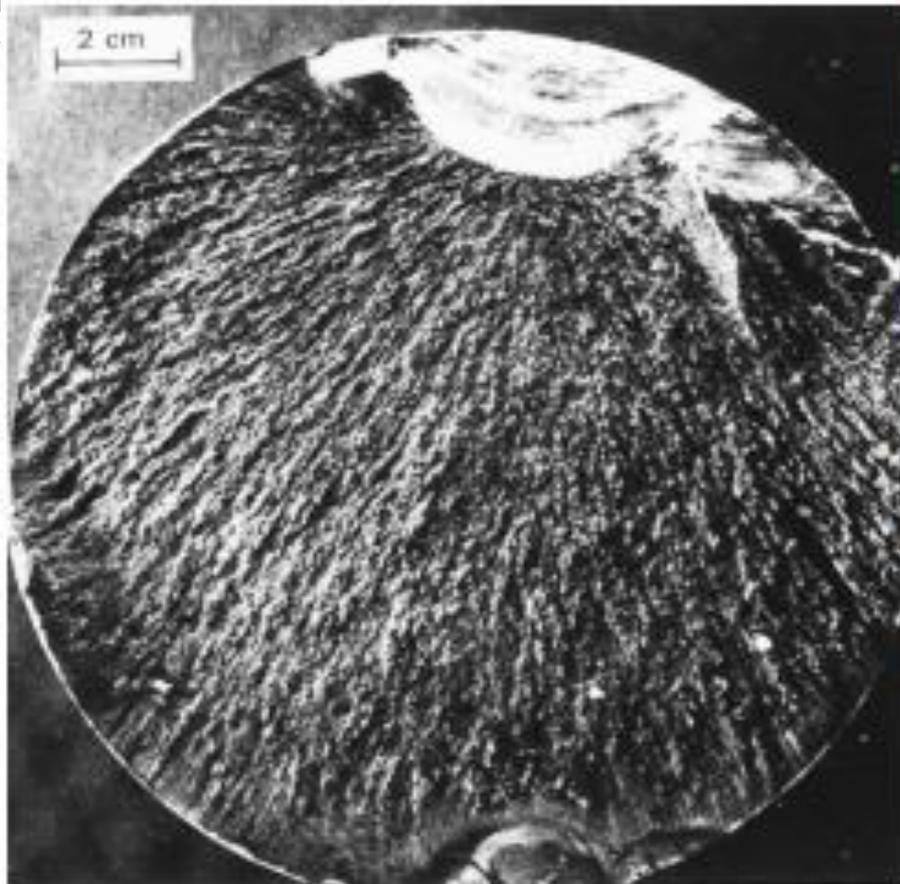


FIGURE 9.31 Transmission electron fractograph showing fatigue striations in aluminum. Magnification unknown. (From V. J. Colangelo and F. A. Heiser, *Analysis of Metallurgical Failures*, 2nd edition. Copyright © 1987 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

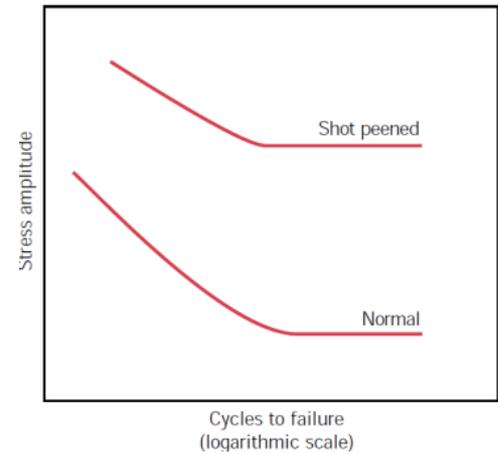
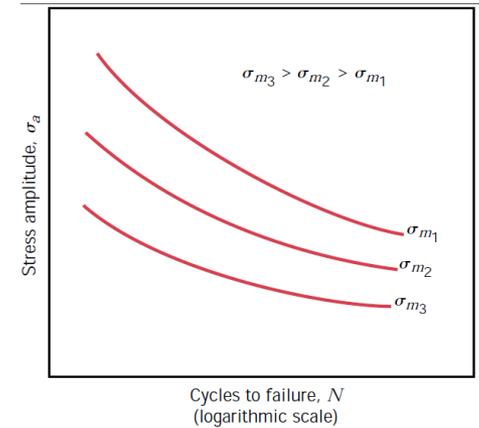
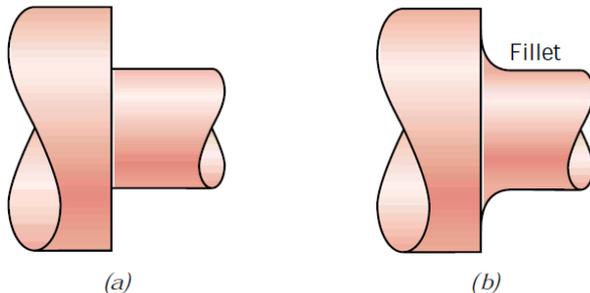
Estrias podem ser vistas apenas com microscópio, mostram a posição da ponta da trinca após cada ciclo.

Superfície de falha por fadiga. Uma trinca se formou na aresta superior. A região lisa, também próxima a superfície superior, corresponde à área ao longo da qual a trinca se propagou lentamente. A falha rápida ocorreu ao longo da área que possui uma textura opaca e fibrosa.



FATORES QUE INFLUENCIAM A VIDA EM FADIGA

- **Tensão Média:** o aumento do nível médio de tensão leva a uma diminuição da vida útil
- **Efeitos de Superfície:** variáveis de projeto (cantos agudos e demais descontinuidades podem levar a concentração de tensões e então a formação de trincas) e tratamentos superficiais (polimento, jateamento, endurecimento superficial melhoram significativamente a vida em fadiga)



- **Efeitos do ambiente:** **fadiga térmica** (flutuações na temperatura) e **fadiga por corrosão** (ex. pites de corrosão podem atuar como concentradores de tensão)



Referências Bibliográficas

- 1) Askeland, D. R.; Phule, P. P. Ciência e engenharia dos materiais. São Paulo: CENGAGE, 2008;
- 2) Callister Jr., W. D. Fundamentos da ciência e engenharia de materiais. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2006;
- 3) Callister Jr., W. D. Ciência e engenharia de materiais. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2008;
- 4) Shackelford, J. E. Ciência dos materiais. São Paulo: Prentice Hall, 2008;
- 5) Smith, W. Hashemi, J. Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais – MacGrawHill