



# Introdução a Ciência dos Materiais

## Propriedades Mecânicas II

Professora: Maria Ismenia Sodero

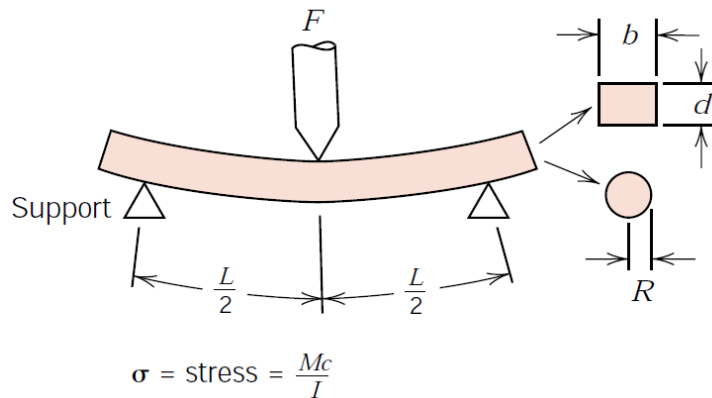
[maria.ismenia@usp.br](mailto:maria.ismenia@usp.br)



# Comportamento mecânico

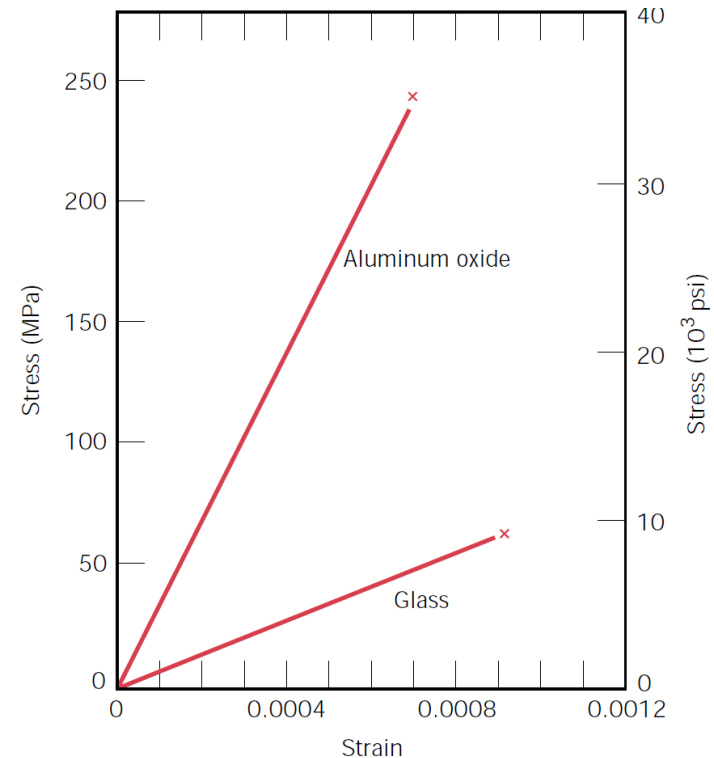
## Materiais cerâmicos

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



$$\sigma = \text{stress} = \frac{Mc}{I}$$

**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.



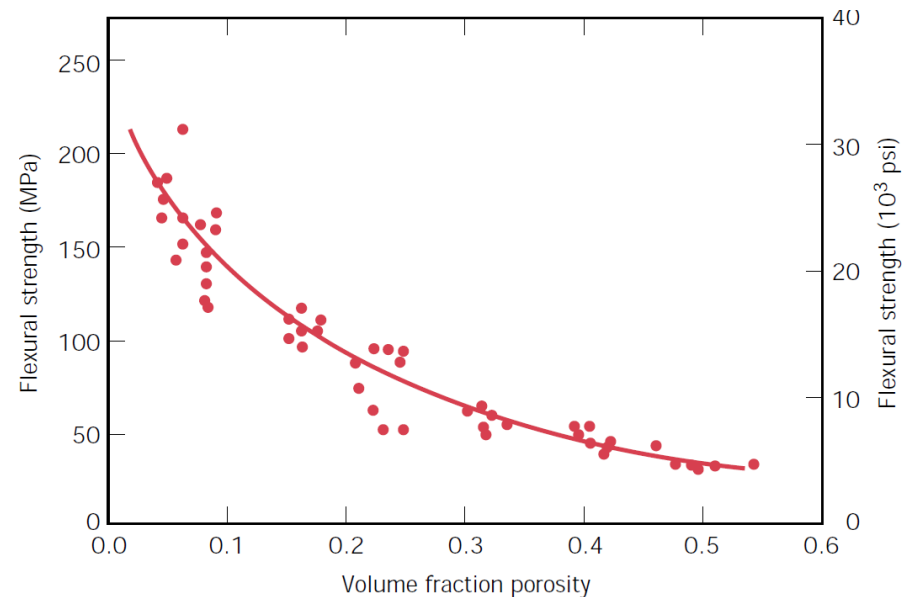
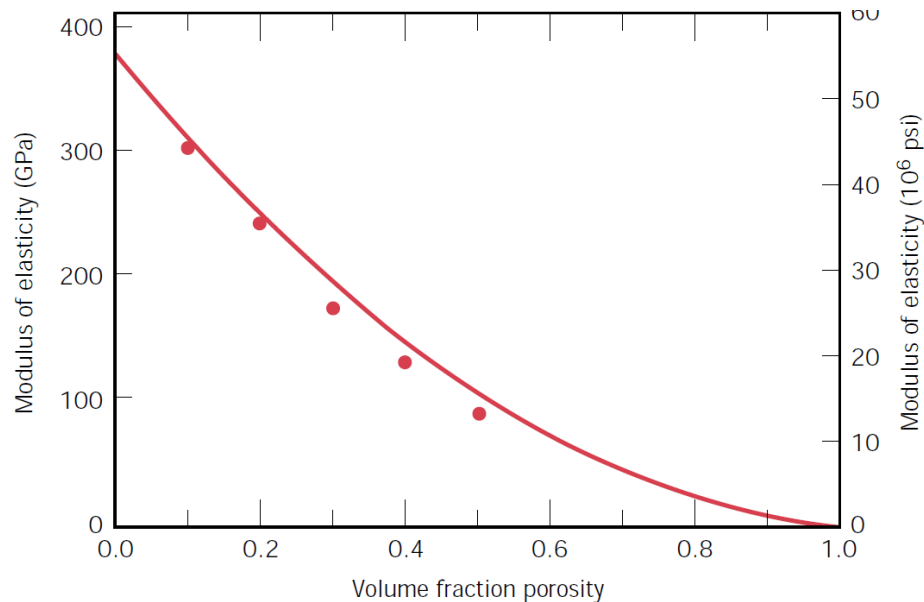
Comportamento tensão-deformação típico até o momento da fratura de óxido de alumínio e vidro.



# Comportamento mecânico

## Materiais cerâmicos

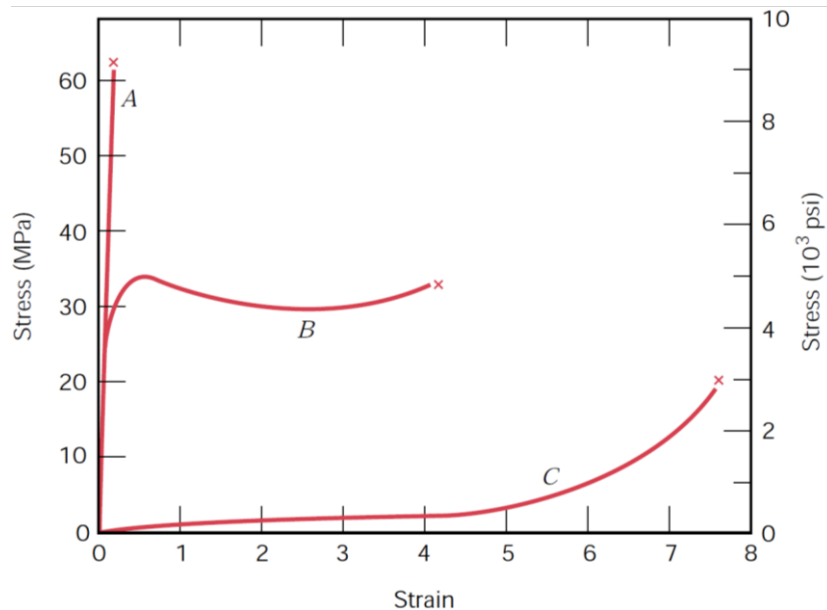
- Porosidade tem influência sobre as propriedades elásticas como sobre a resistência.
- E diminui em função da fração volumétrica da porosidade;
- A porosidade exerce influência negativa sobre a resistência à flexão: poros reduzem a área da seção reta e atuam como concentradores de tensão;





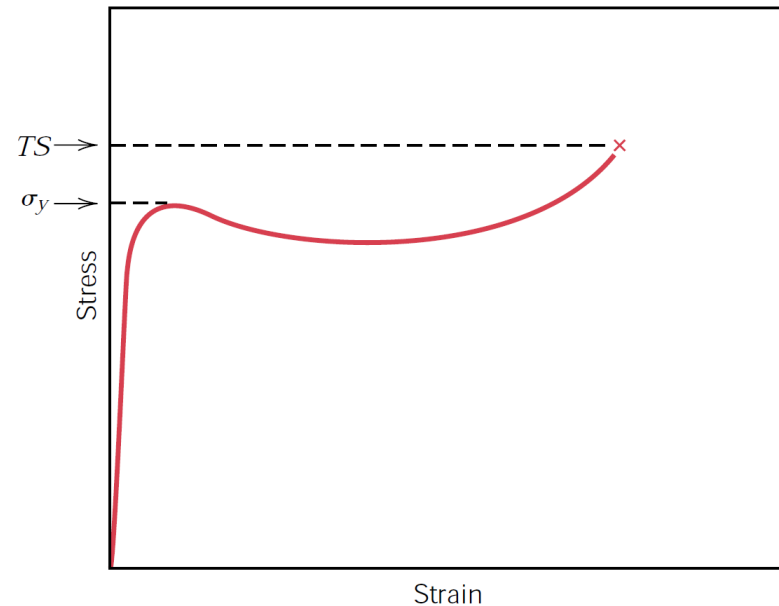
# Comportamento mecânico

## 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.



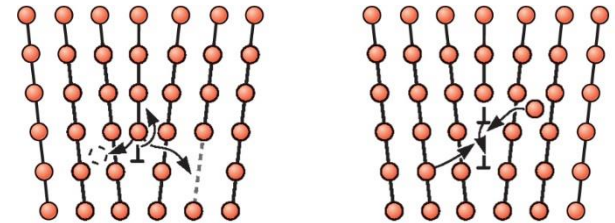
# Influência da Temperatura na resistência dos metais

## 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



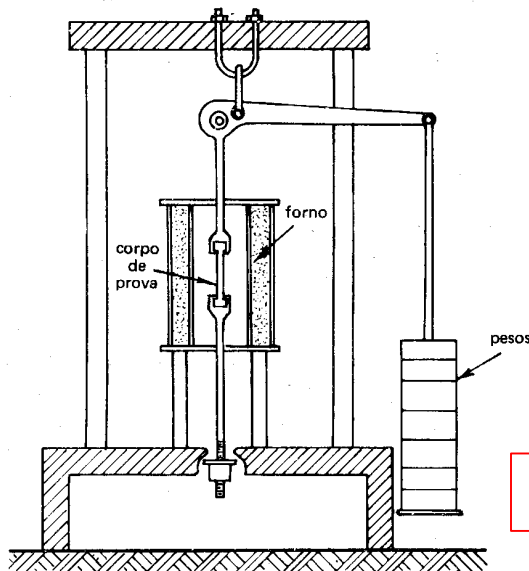
Escalagem de discordâncias (a) ocorre quando átomos da rede deixam a linha de discordância para preencher lacunas ou para ocupar locais intersticiais, (b) quando átomos são atraídos para a linha de discordância, mediante a criação de lacunas ou com a saída de átomos intersticiais.

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.



## Mecanismos teóricos:

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

Ensaio de fluência

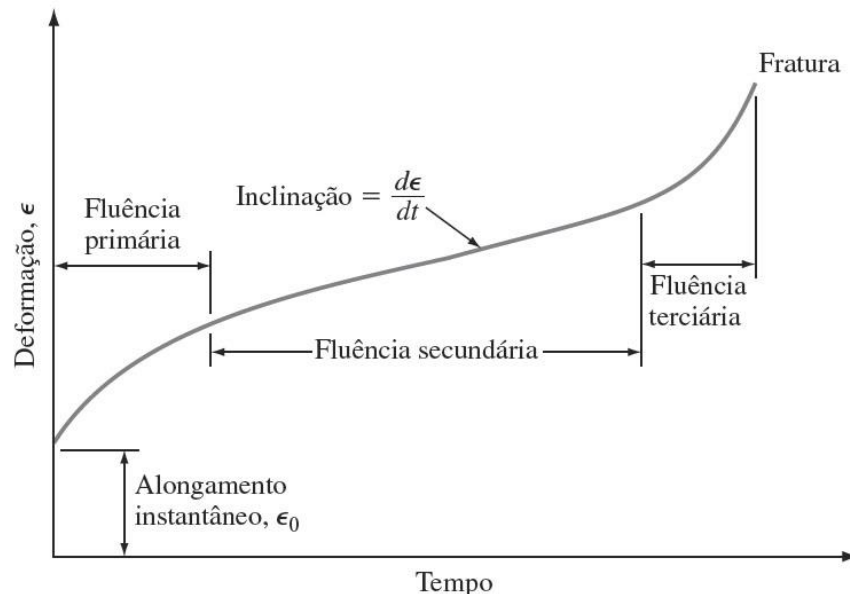


# Curva típica de fluência

**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.



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

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

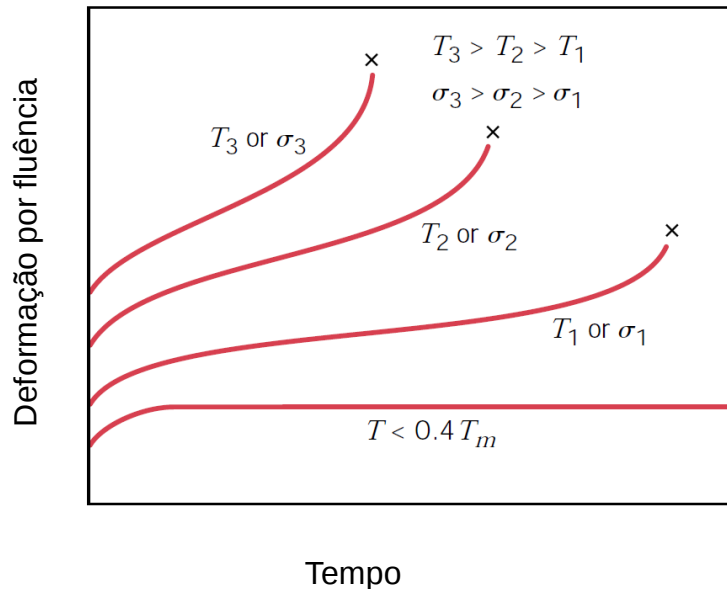
$$\ln \dot{\epsilon}_M = \ln k + n \ln \sigma - \frac{Q_c}{RT}$$

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



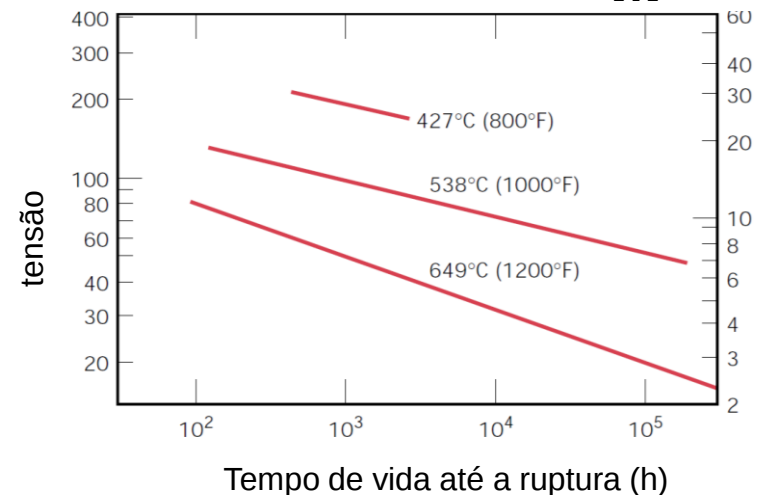
**Tempo de vida diminui:**  $t_{f,4} < t_{f,3} < t_{f,2}$

**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.

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

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

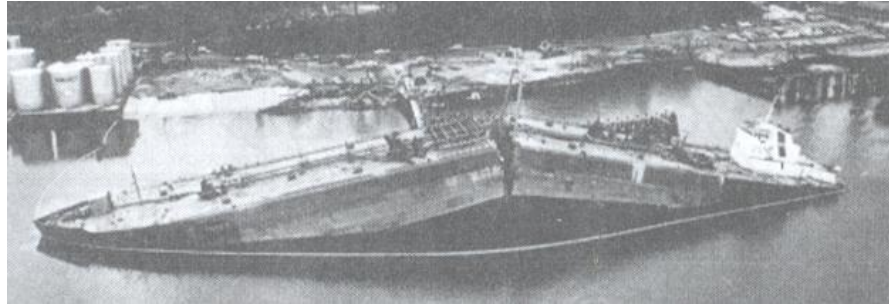


Os resultados de ensaio de ruptura por fluência são comumente apresentados na forma do logaritmo da tensão em função do logaritmo do tempo de vida até a ruptura.

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.

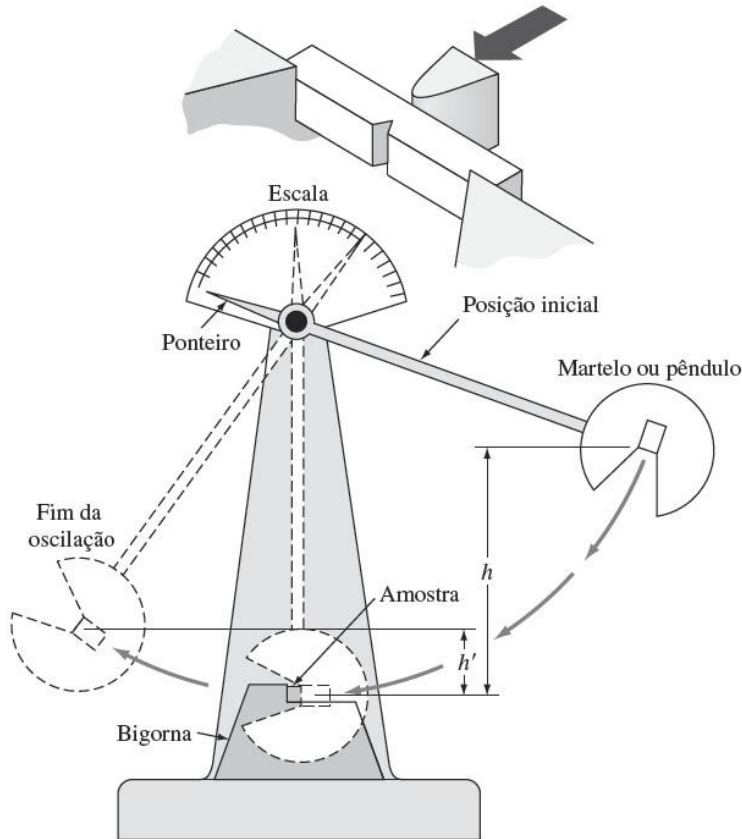
Em algumas ocasiões, metais que são normalmente dúcteis, fraturam abruptamente e com muito pouca deformação plástica:

- 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.

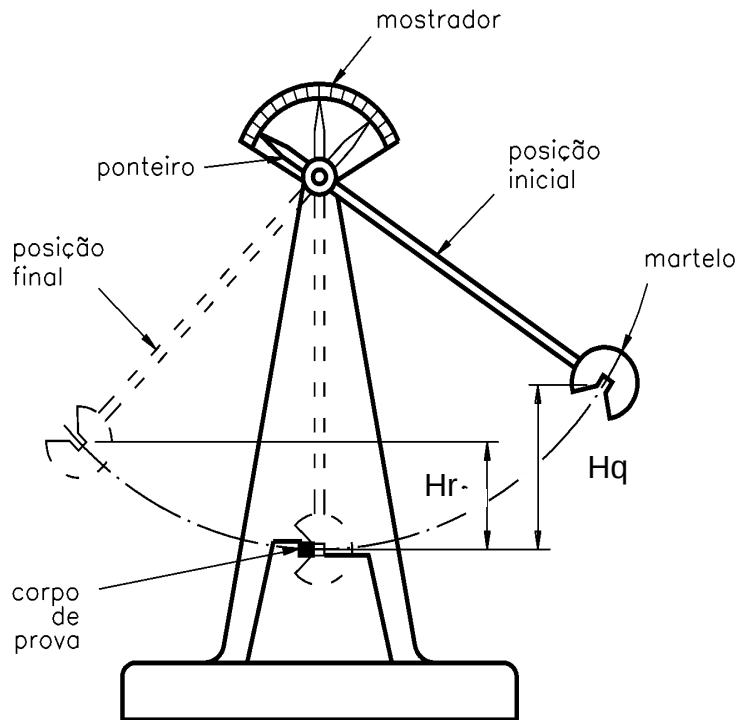
# Ensaio de Impacto

- 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



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

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

**Resultado: medida de energia absorvida**

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

Onde:

E – energia absorvida no impacto (j);

M – massa

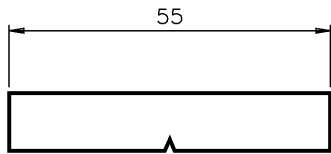
g – aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>)

H<sub>q</sub> – altura de liberação do pêndulo (posição inicial);

h<sub>r</sub> – altura de rebote (posição final).



# Ensaio Charpy



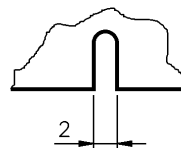
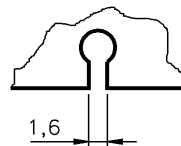
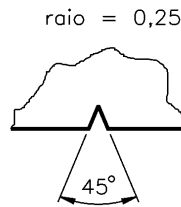
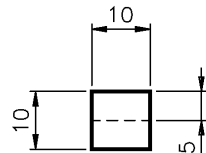
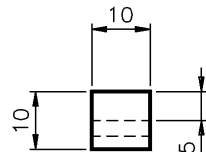
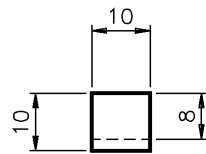
charpy tipo A



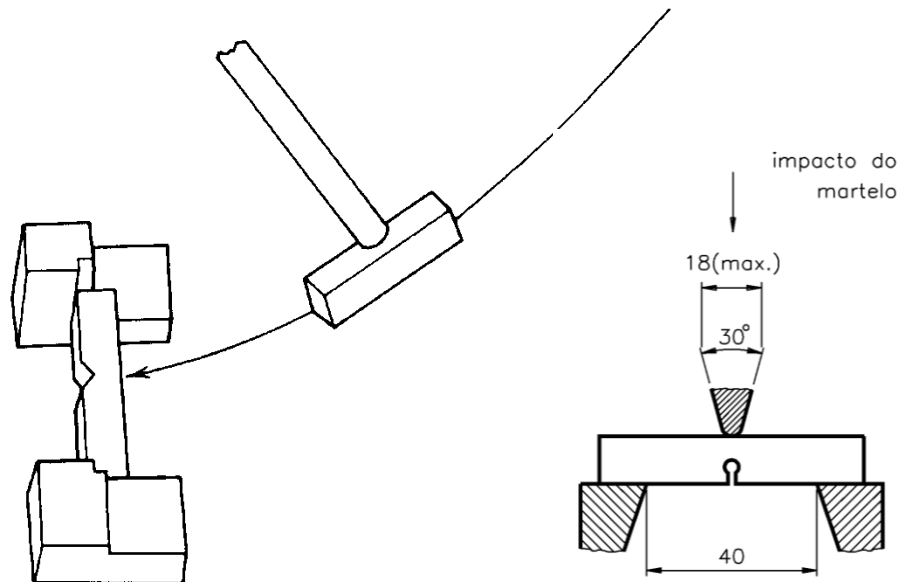
charpy tipo B



charpy tipo C

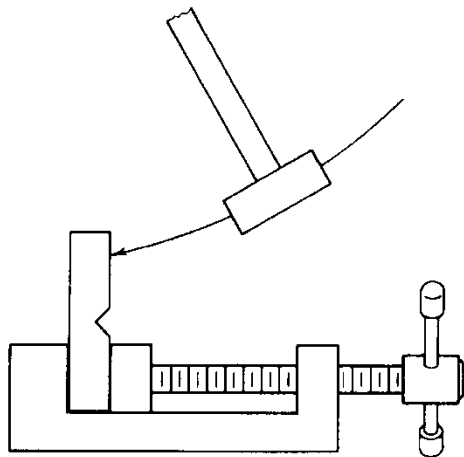
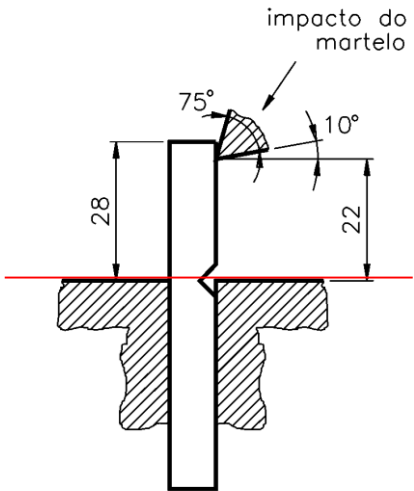


- Os corpos de prova Charpy compreendem três subtipos (A, B e C), de acordo com a forma do entalhe.
- Posição horizontal de montagem dos cdp Charpy.

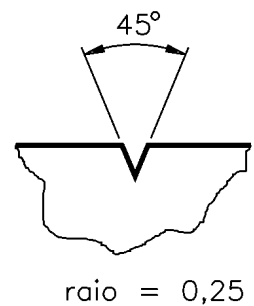
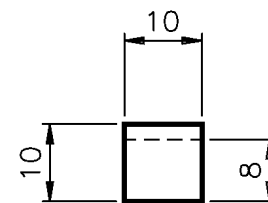
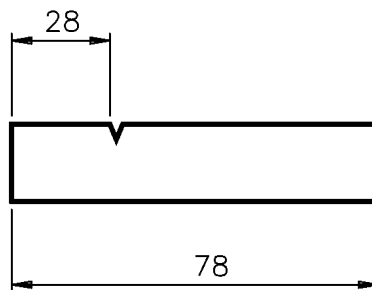




# Ensaio Izod

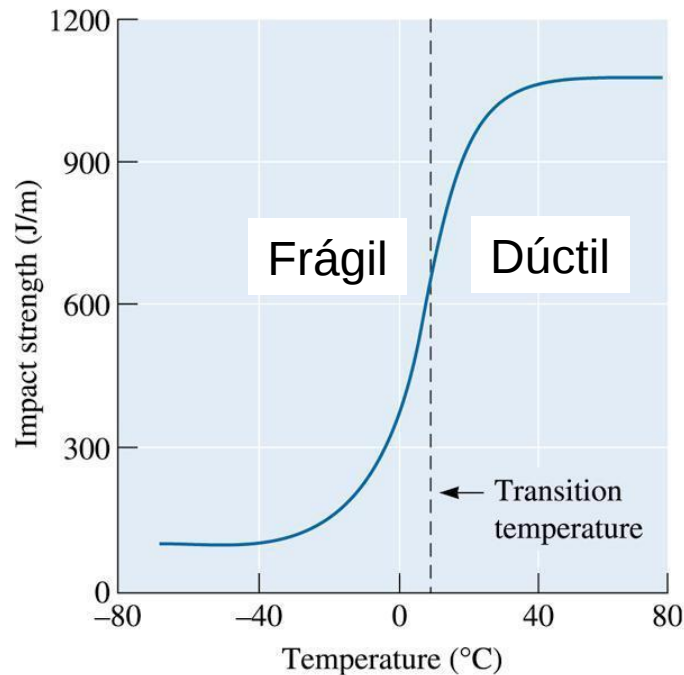


- Posição de montagem vertical do cdp Izod.
- O corpo de prova Izod tem a mesma forma de entalhe do Charpy tipo A, localizada em posição diferente (não centralizada).





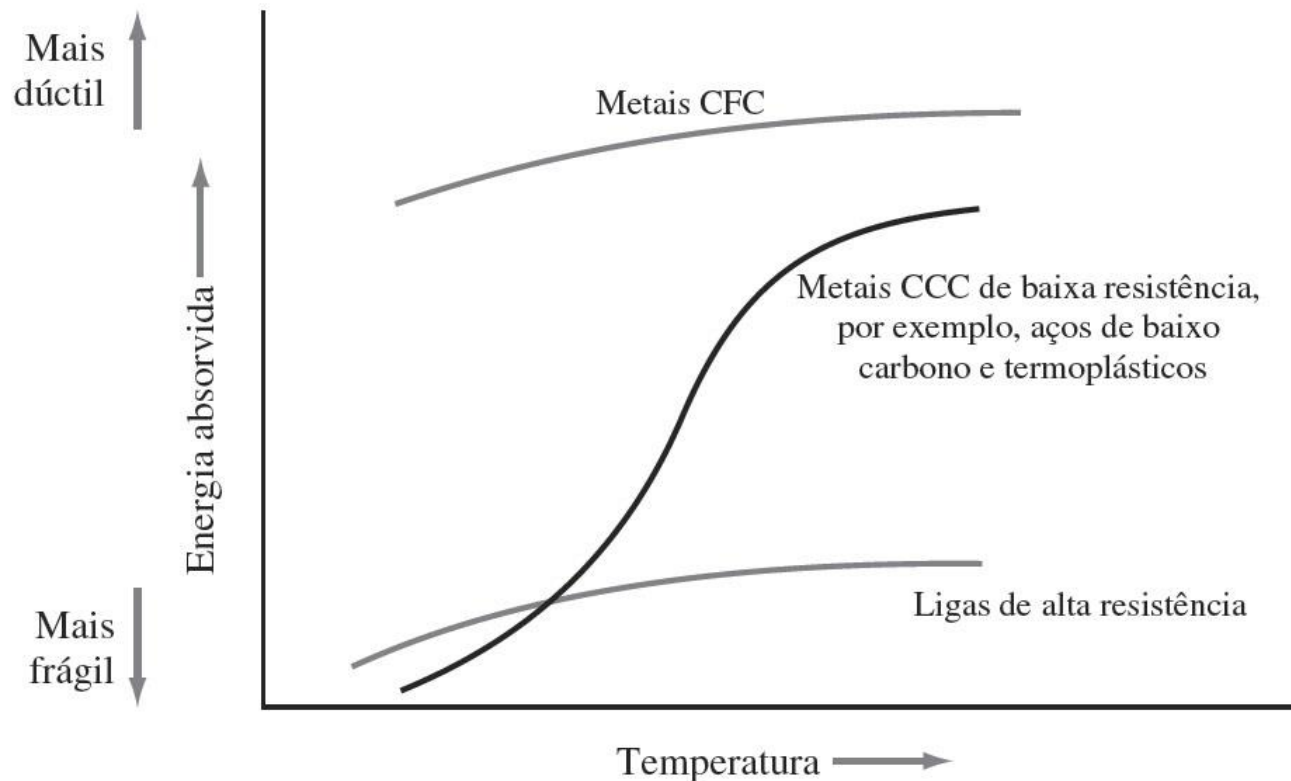
# Temperatura de Transição



- 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.



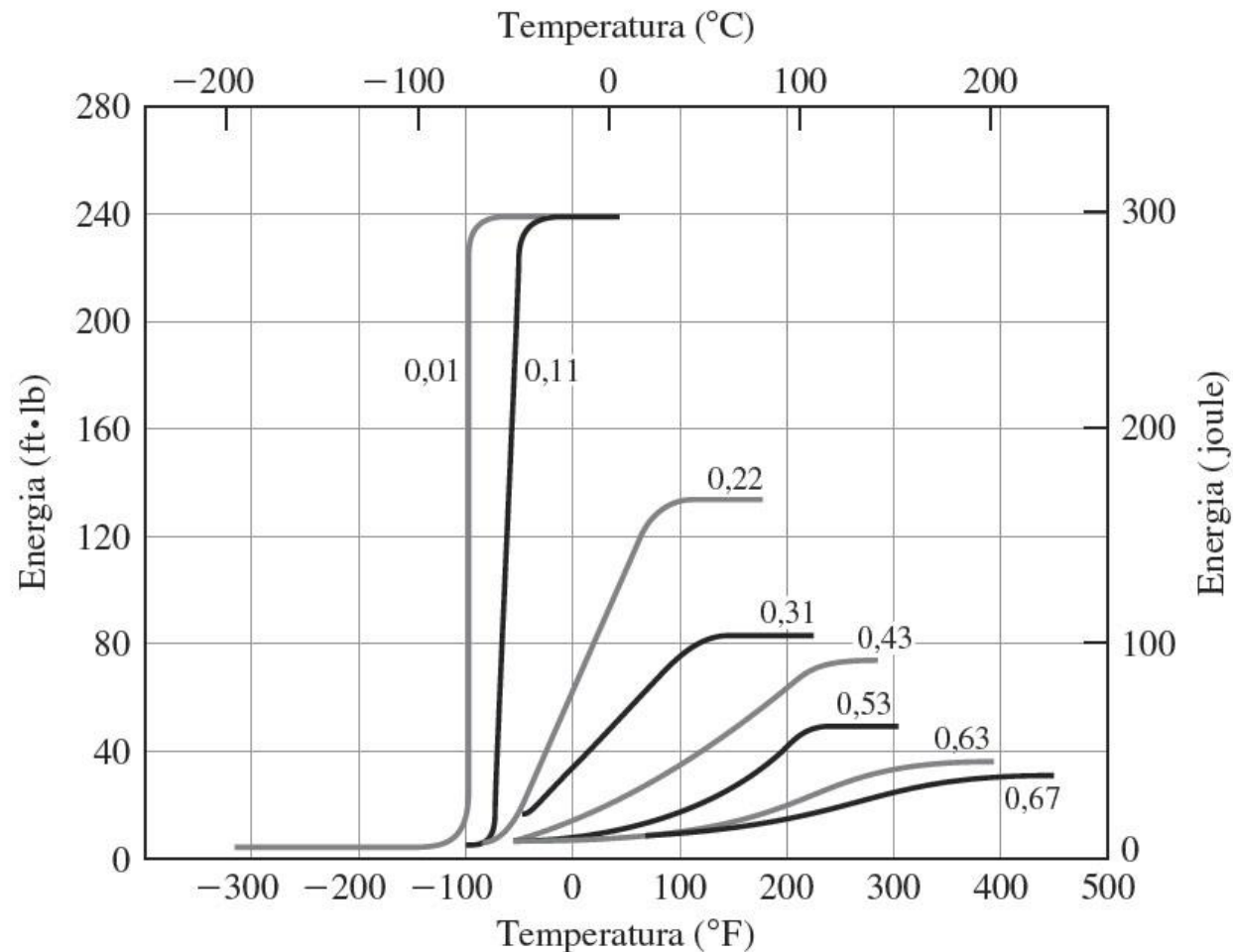
## Efeito da temperatura na energia absorvida por impacto para diferentes materiais.



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

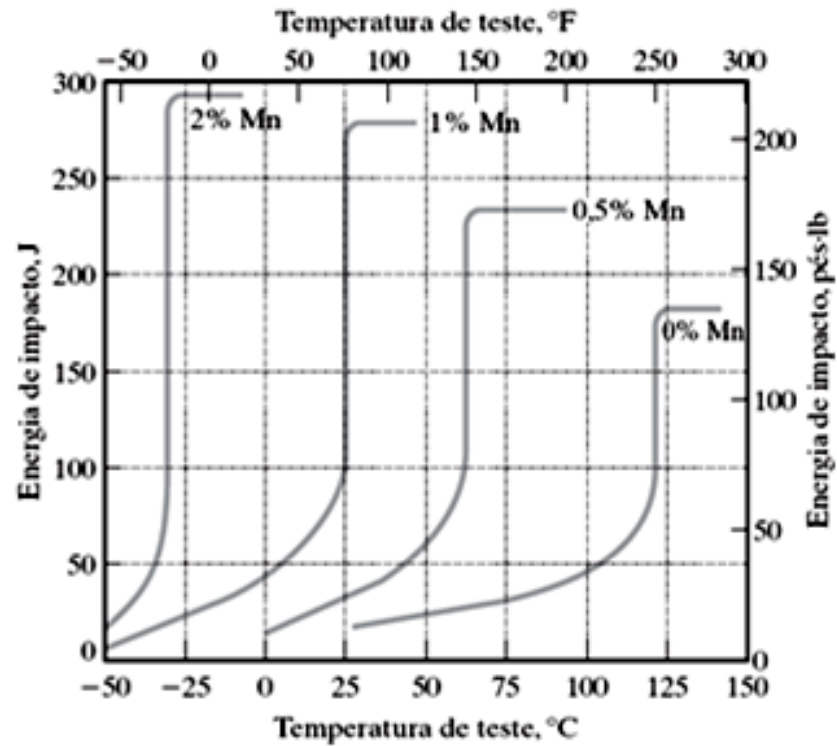


## Efeito do teor de carbono de aços recozidos nas curvas da energia de impacto em função da temperatura





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.

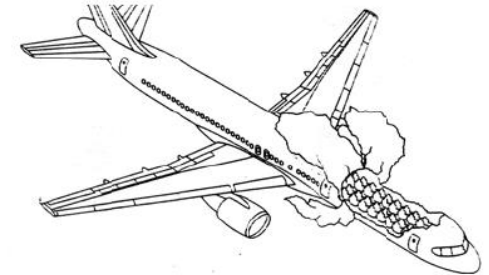
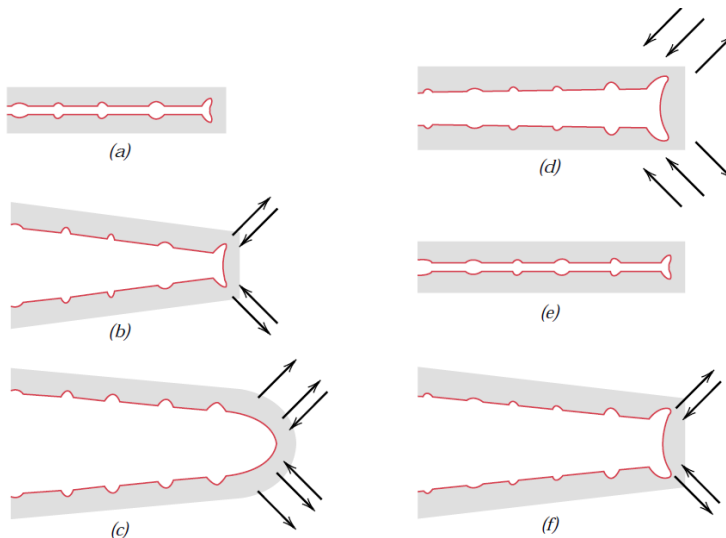


FIGURA 1 - Exemplo de um acidente aéreo causado por fadiga associada à corrosão, em 1988.



FIGURA 2 - Aeronave após o pouso  
Fonte: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Voo\\_Aloha\\_Airlines\\_243](http://pt.wikipedia.org/wiki/Voo_Aloha_Airlines_243)

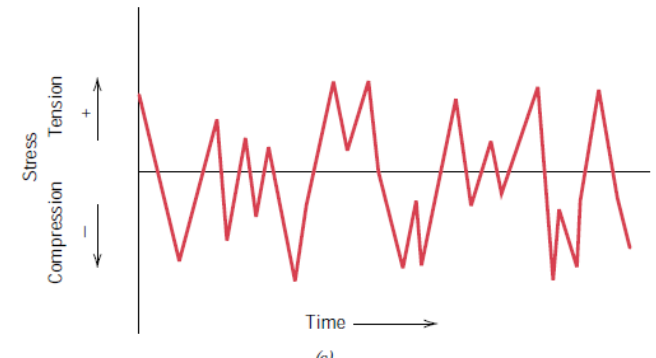
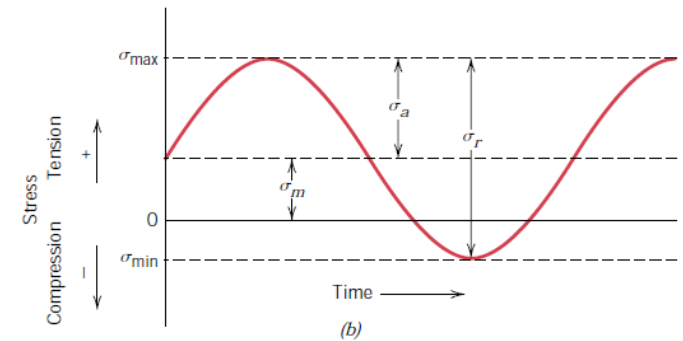
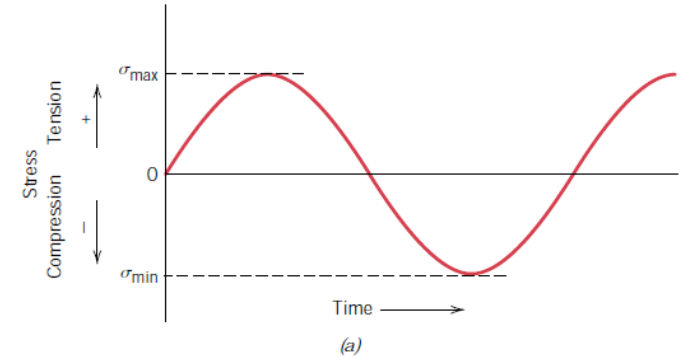


# Tensões Cíclicas

*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 ( $\sigma_M$ ):**

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

**Intervalo de Tensões ( $\sigma_R$ ):**

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

**Amplitude de Oscilação ( $\sigma_a$ ):**

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

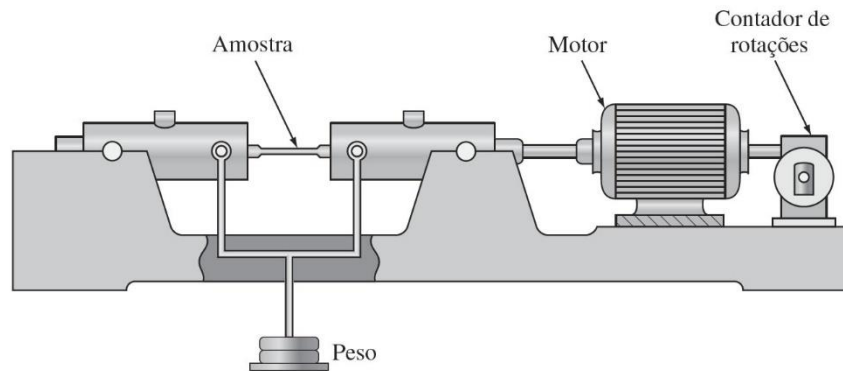
**Razão de variação de tensões ( $R_f$ ):**

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

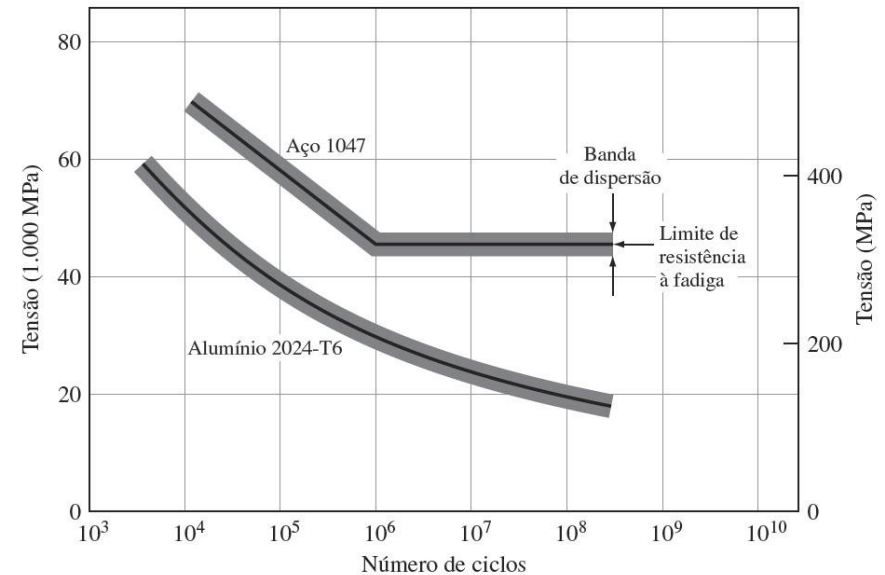


# Ensaio de fadiga

- 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.

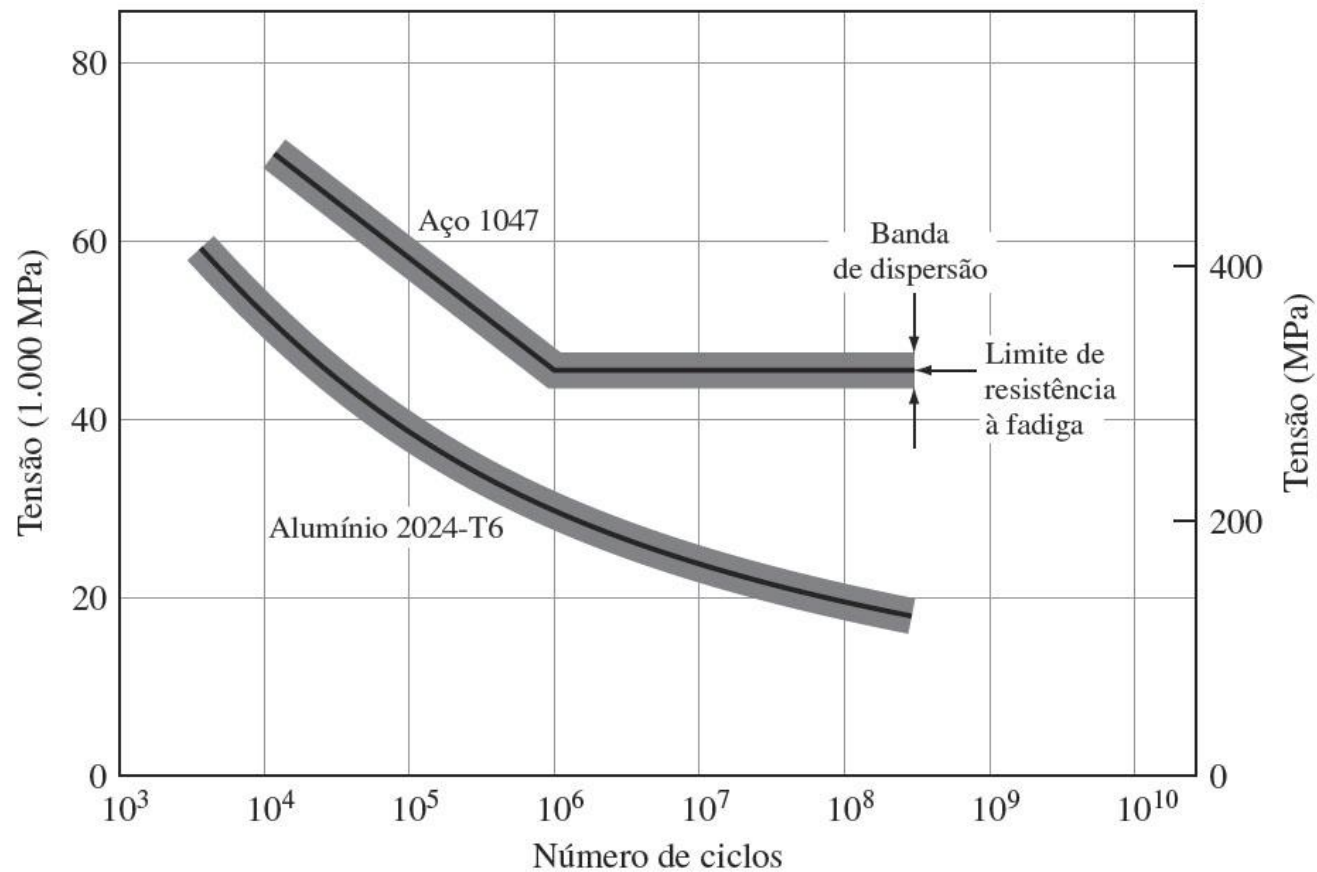


Esquema de uma máquina de fadiga por flexão alternada

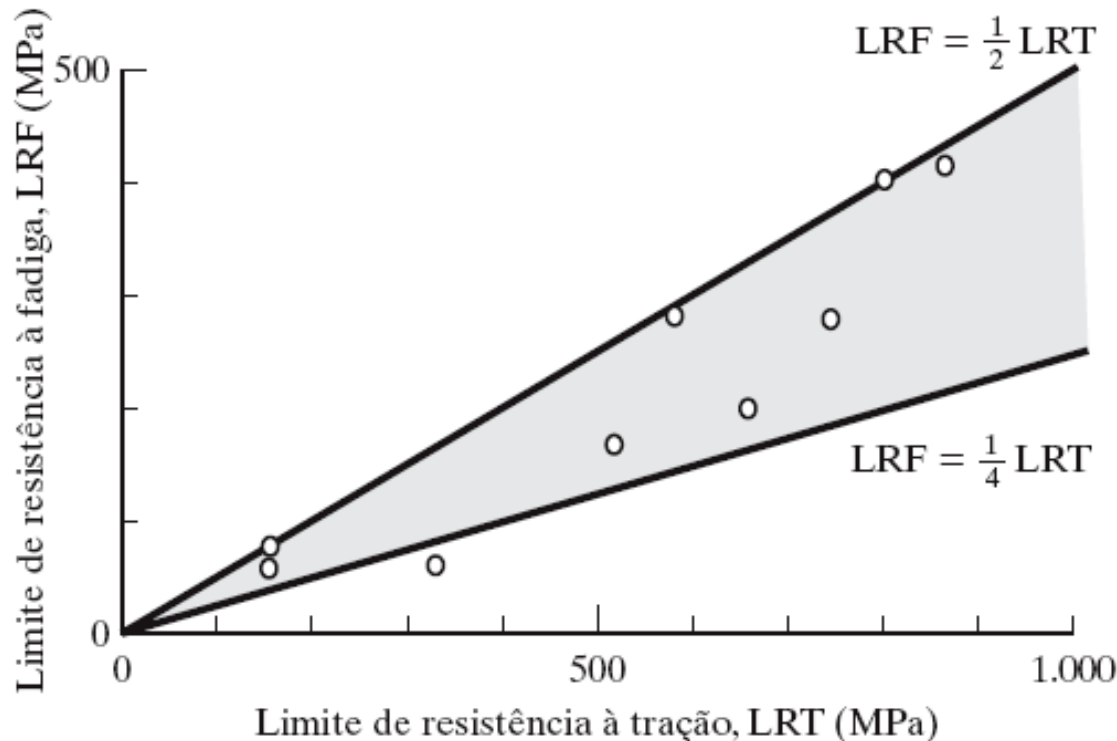




# A curva SxN



# Correlação entre LRT e TRF



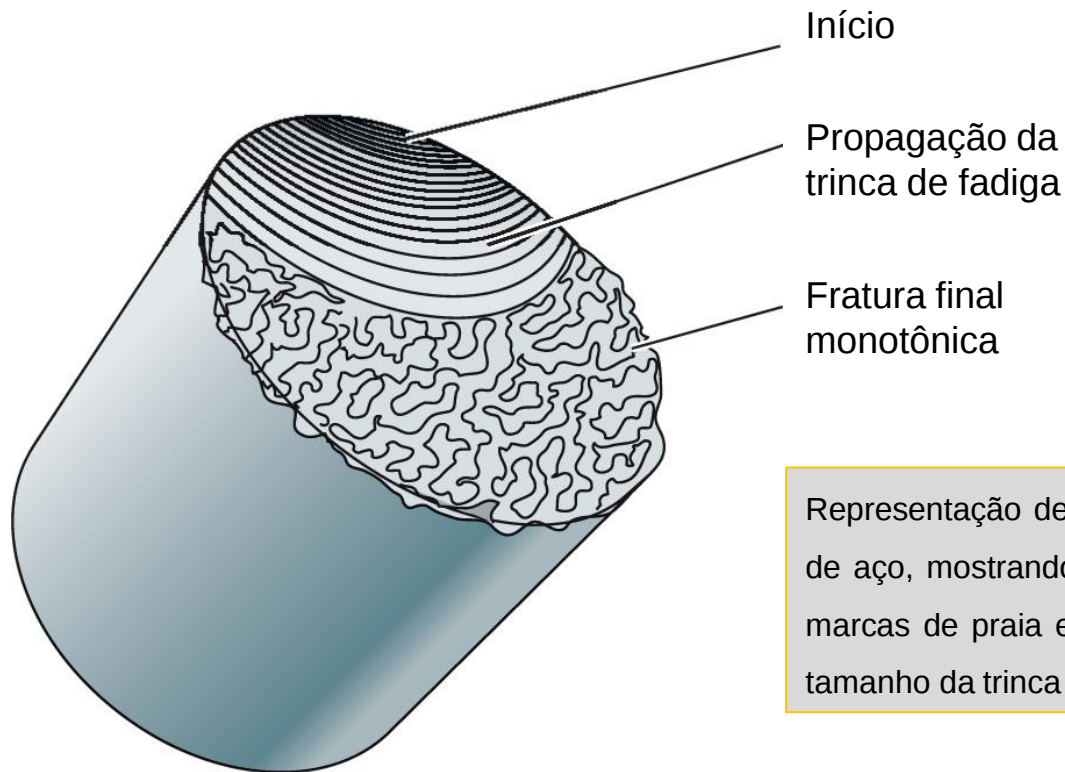
**Tabela 8.4** Comparação entre o limite de resistência à fadiga (LRF) e o limite de resistência à tração (LRT) para algumas das ligas da Tabela 6.1

| 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.



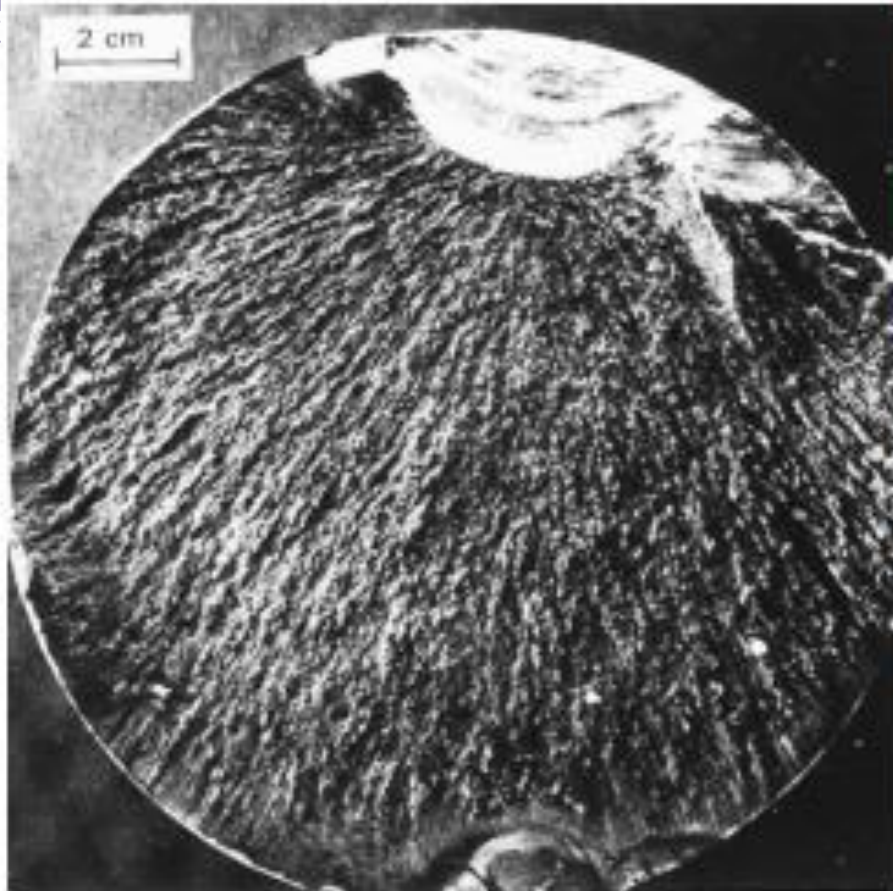
# A Fratura de Fadiga



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.



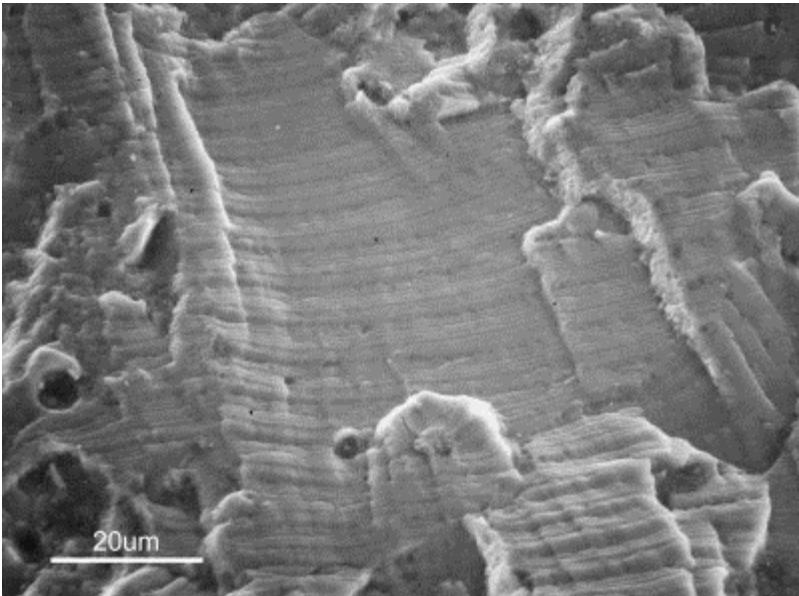
# A Fratura de Fadiga



**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.

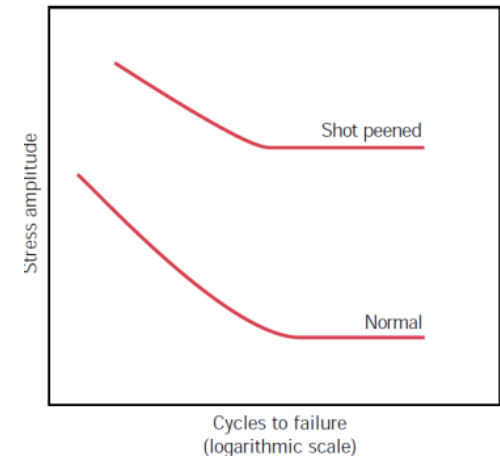
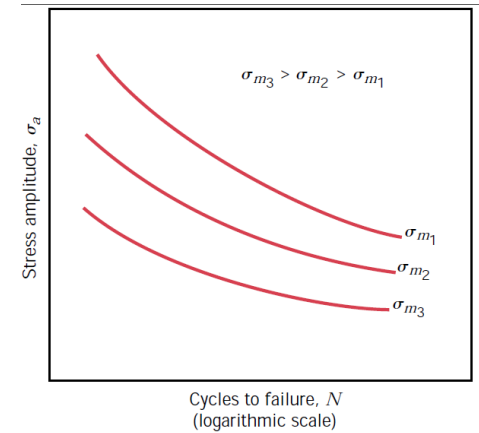
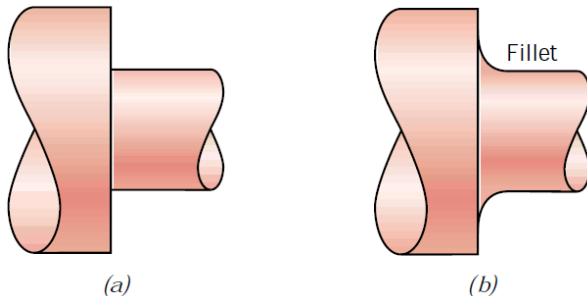


Fatigue striations observed on the fracture surface



# 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