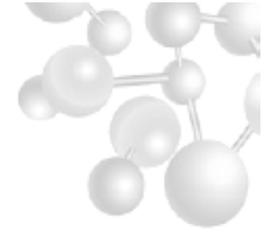




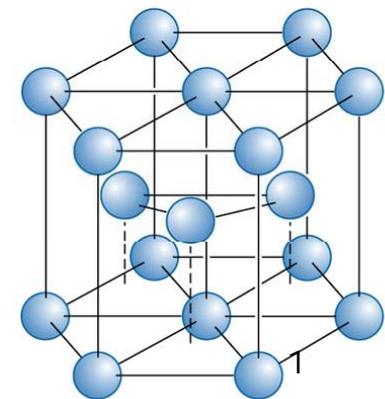
Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e
Automobilística



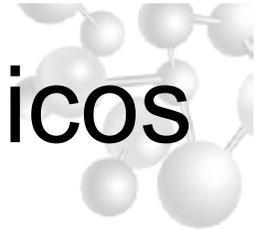
Ensaio Mecânicos dos Materiais – Flexão, Fluência e Fadiga

**SMM0342- Introdução aos Ensaio
Mecânicos dos Materiais**

Prof. Dr. Cassius O. F. Terra Ruchert



Classificação dos ensaios mecânicos



Classificação :

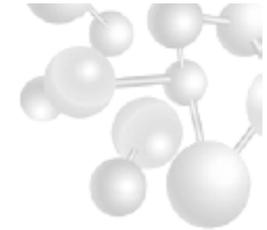
① Quanto à integridade

- i) **Destrutivos**: provocam inutilização parcial ou total da peça;
Tração, Dureza, Fadiga, Fluência, Torção, Flexão, Impacto, Tenacidade a Fratura
- ii) **Não- Destrutivos**: não comprometem a integridade da peça;
Raios-X, Raios-γ, Ultra-Som, Partículas Magnéticas, Líquidos Penetrantes, Microdureza, Tomografia

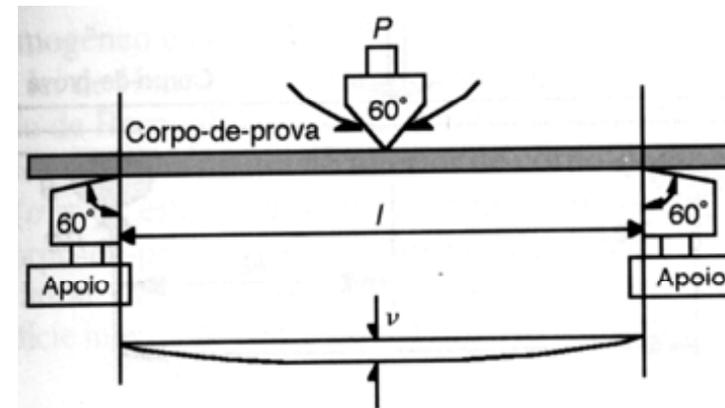
② Quanto à velocidade:

- i) **Estáticos**: carga aplicada lenta (estados de equilíbrio)
Tração, Compressão, Flexão, Dureza e Torção
- ii) **Dinâmicos**: carga aplicada rapidamente ou ciclicamente;
Fadiga e Impacto
- iii) **Carga Constante**: carga aplicada durante um longo período;
Fluência

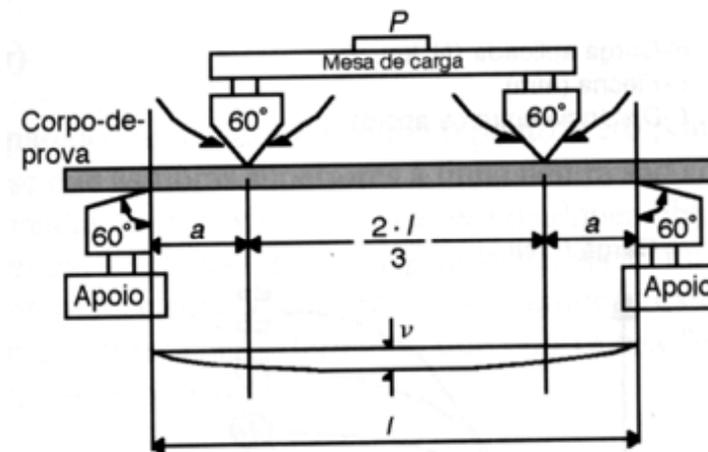
Ensaio de Flexão



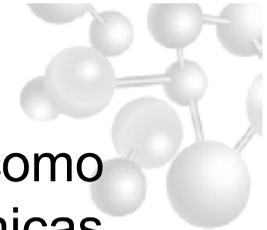
- O Ensaio de flexão consiste na aplicação de uma carga crescente em determinados pontos de uma barra
- Mede-se o valor da carga versus a deformação máxima
- Existem dois tipos principais de Ensaio: Ensaio de flexão em três pontos e Ensaio de flexão em quatro pontos



(A) Ensaio de flexão em três pontos



(B) Ensaio de flexão em quatro pontos



- Grande aplicação para materiais frágeis ou de elevada dureza, como o caso de FoFo, aços ferramentas, aços rápidos, e cerâmicas estruturais, pois estes materiais, devido a baixa ductilidade não permitem ou dificultam a utilização de outros tipos de ensaios mecânicos.
- Materiais Dúteis estes ensaios não são utilizados, mas existem duas variantes que são os ensaios de dobramento e de tenacidade à fratura, CTOD.

Critérios do CP:

- Recomenda-se a forma retangular.
- A relação comprimento/espessura não deve ser inferior a 15.
- A relação largura/espessura não deve ser superior a 10.
- Mínimo de 6 CPs, para cada material ensaiado

Ensaio de Flexão

As principais propriedades obtidas em um Ensaio de Flexão são:

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

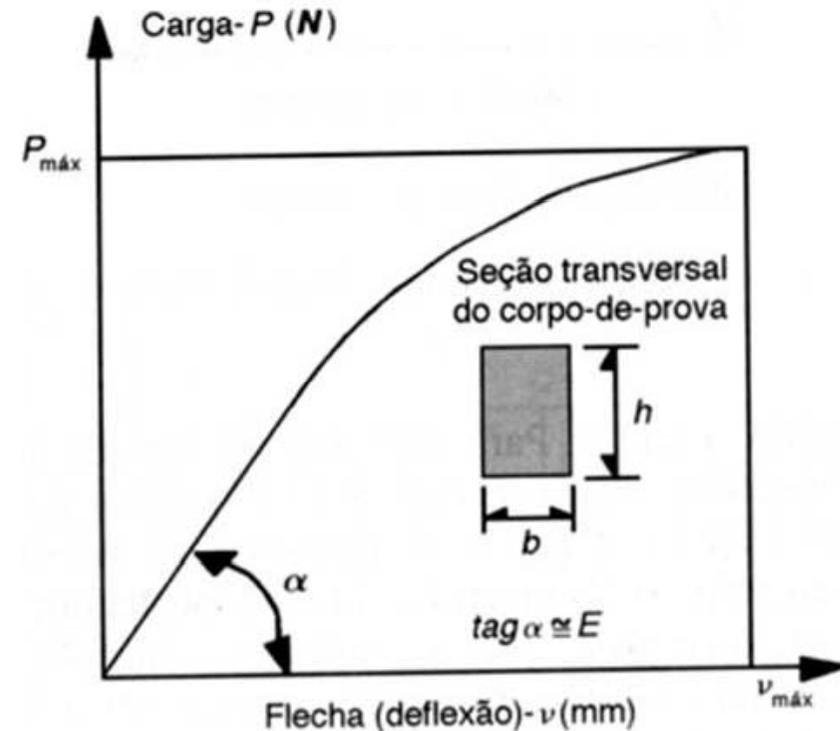
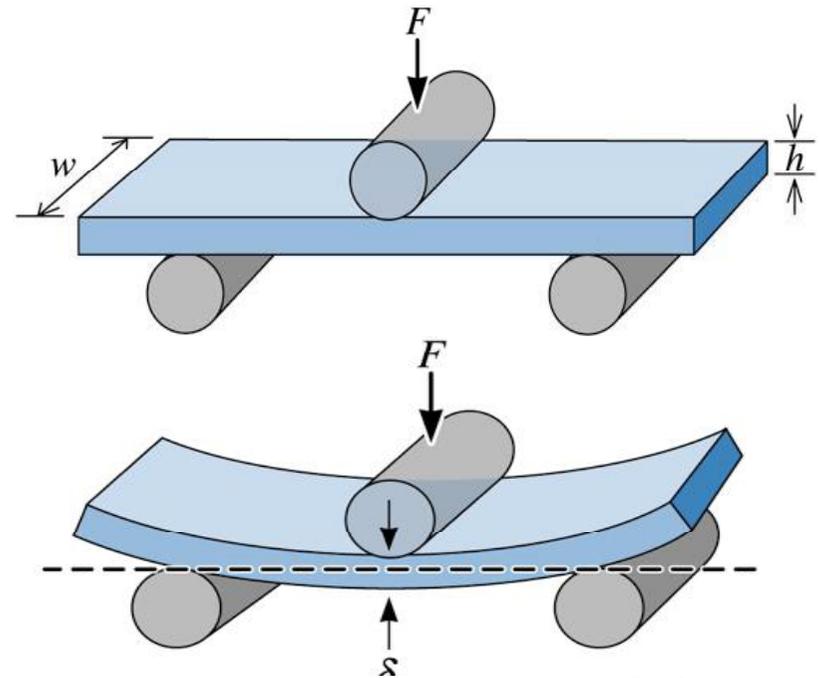
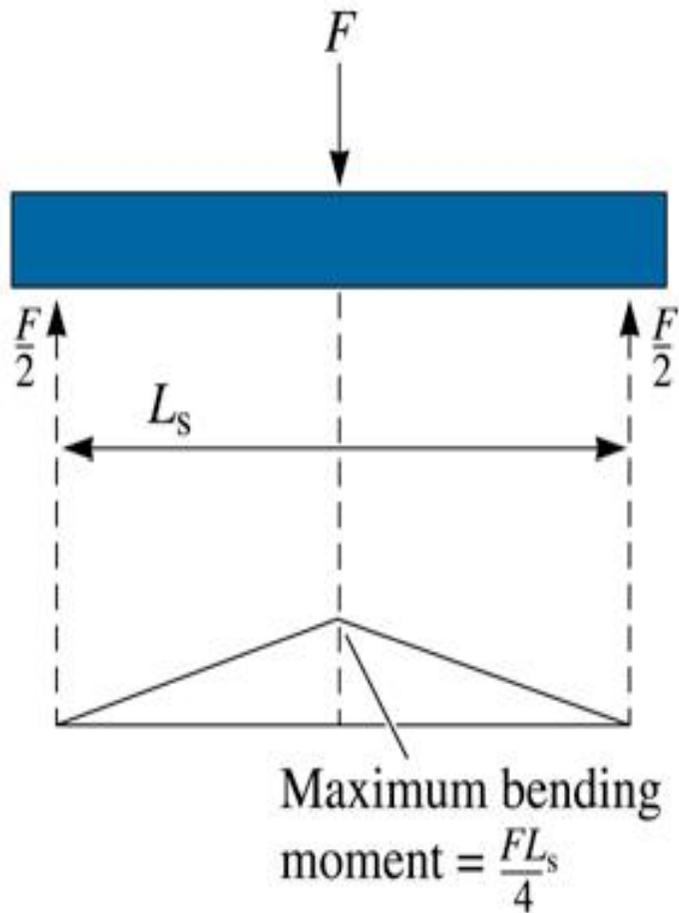
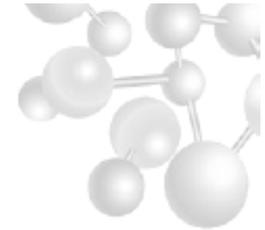
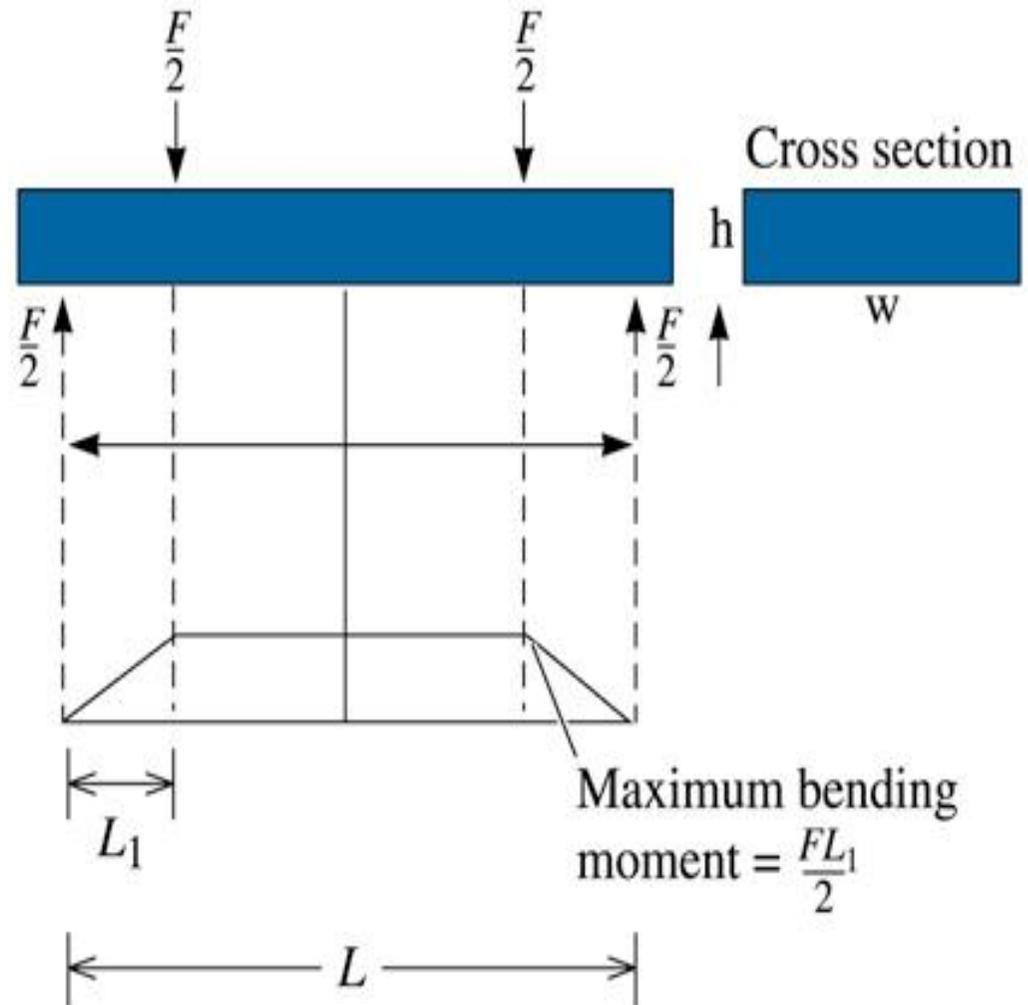


Diagrama de Esforços (Flexão)



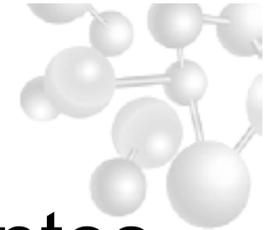
3 pontos

(a)

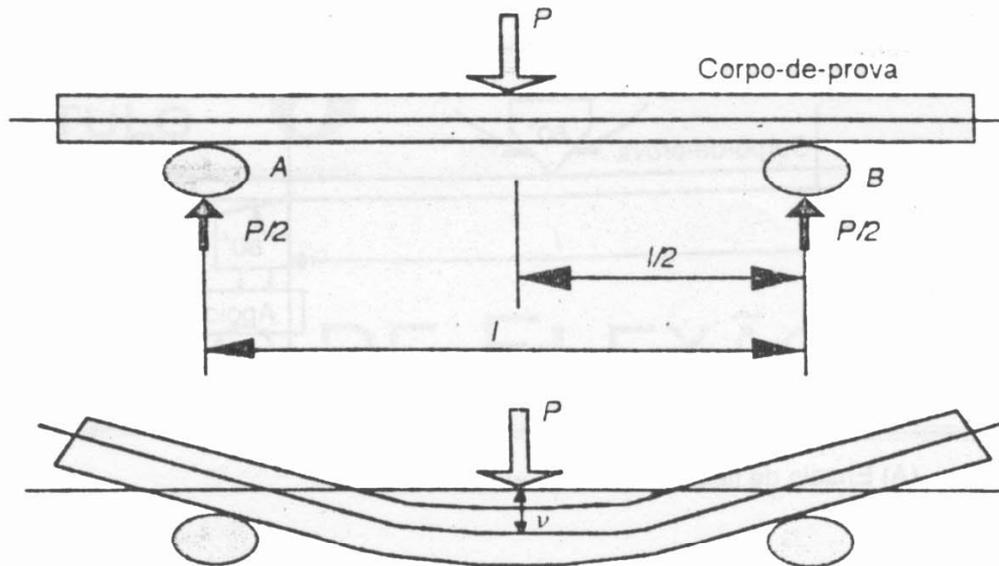


4 pontos

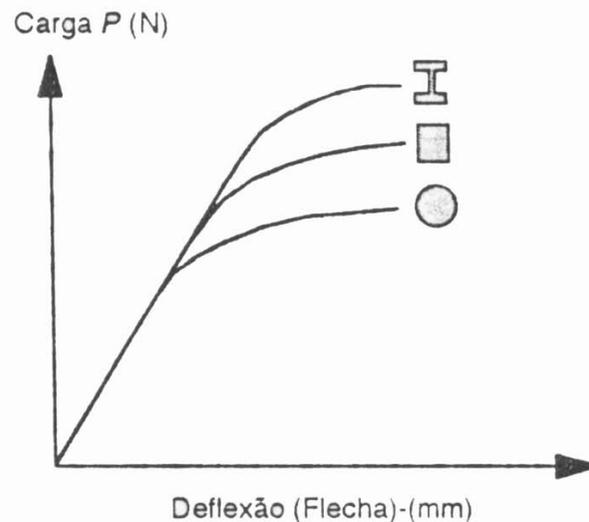
(b)



Ensaio 3 Pontos



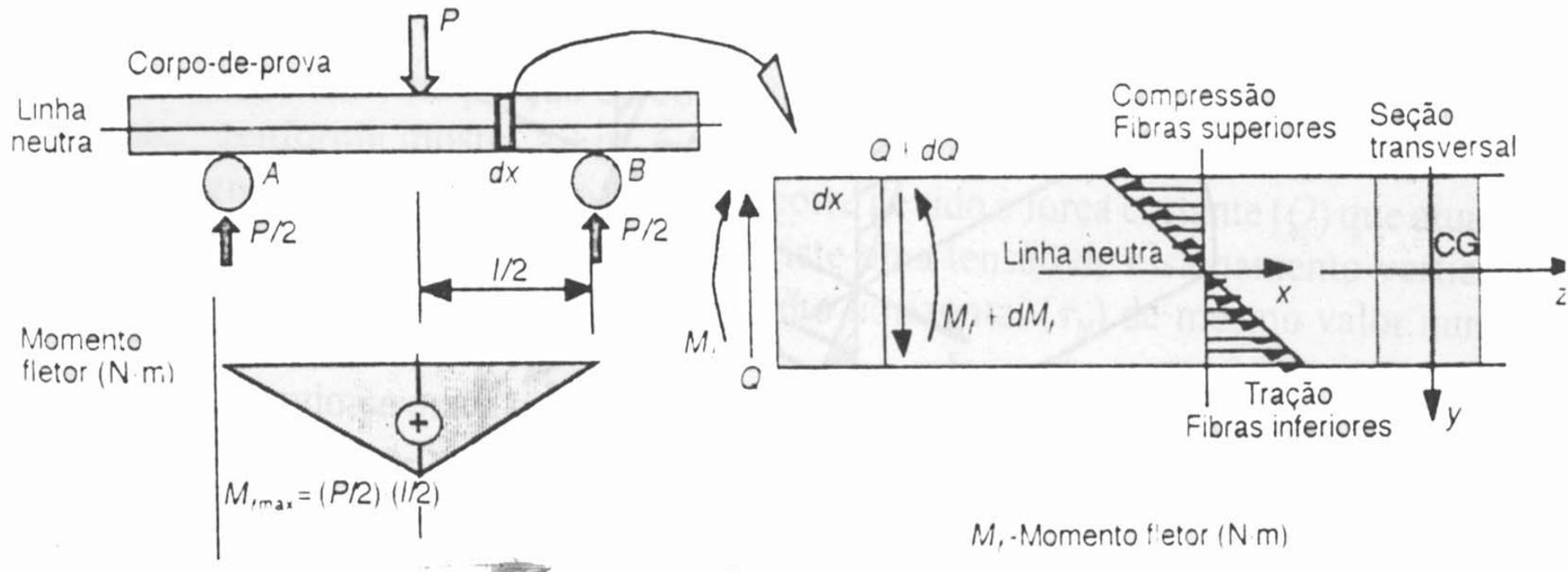
(A)
 P - Carga aplicada (N, kgf, tf)
 v - Flecha (mm)
 l - Distância entre os apoios (m)



(B) Resposta do ensaio de flexão

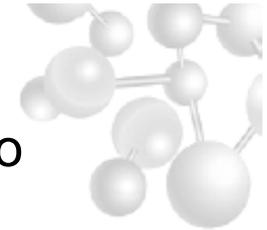
- A curva resposta do ensaio depende fortemente da geometria da seção transversal do CP.
- Durante o ensaio ocorrem esforços normais e tangenciais na seção transversal do CP, gerando um complicado estado de tensões no seu interior.

Ensaio Flexão 3 Pontos (Distribuição Tensão)



- As fibras superiores comprimida e inferiores tracionadas.
- A Tensão é proporcional a dist. da linha neutra.
- Da resistência dos materiais:

$$\sigma = \frac{M_f}{I_z} y$$



- O deslocamento de qualquer ponto na barra submetida a flexão simples (3 pontos) é dada por:

$$v_x = \frac{P}{4E I_z} \left(\frac{l^2}{4} x - \frac{x^3}{3} \right) \quad v_{\max} = \frac{P l^3}{48E I_z}$$

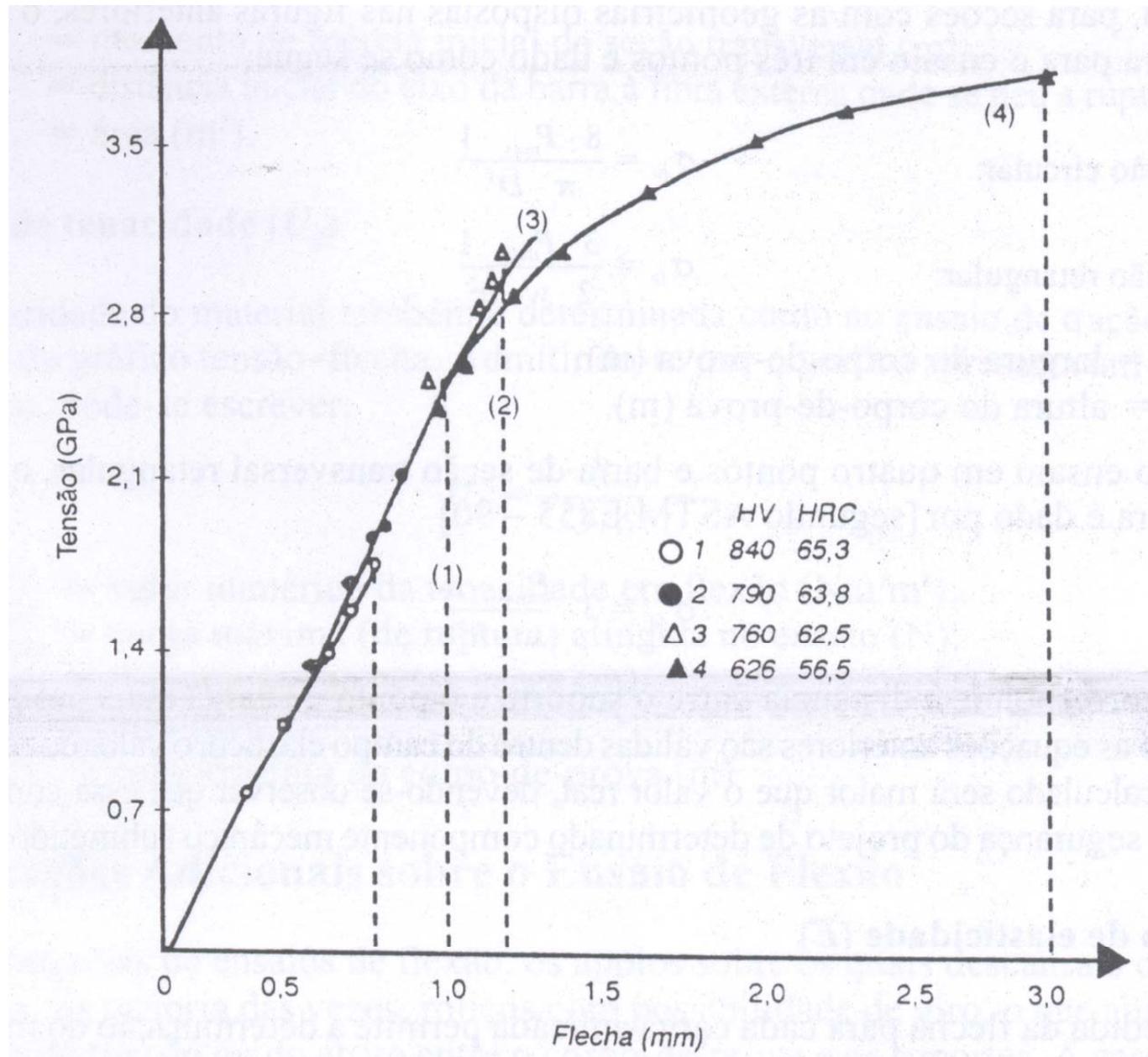
- Para o caso de seção circular

$$v = \frac{4P l^3}{3\pi E D^4}$$

- Para o caso de seção retangular:

$$v = \frac{P l^3}{4E w h^3}$$

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





- Por meio do ensaio de Flexão é possível obter importantes informações a respeito do material quando submetidos a esforços de flexão.
- Módulo de Ruptura, σ_{fu} , ou resistência ao dobramento é o valor máximo da tensão de tração nas fibras externas do CP

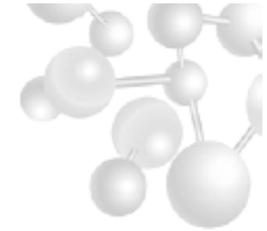
$$\sigma_{fu} = \frac{8 P_{\max} l}{\pi D^3} \quad \text{Seção circular}$$

$$\sigma_{fu} = \frac{3 P_{\max} l}{2 w h^2} \quad \text{Seção retangular}$$

- Módulo de Elasticidade, E:

$$E = \frac{P l^3}{4 w h^3 v} \quad \text{Flexão 3 pontos}$$

$$E = \frac{P a (3 l^2 - 4 a^2)}{4 w h^3 v} \quad \text{Flexão 4 pontos}$$



- Módulo de Resiliência, U_{rf} , é determinado em função da tensão aplicada e das dimensões do CP, no regime elástico

$$U_{rf} = \frac{\sigma_p^2 I}{6E C^2 S}$$

U_{rf} = resiliência em flexão, Nm/m³

σ_p = limite de proporcionalidade, N/m²

I = momento de inércia, m⁴

C = dist. Inicial do eixo da barra a fibra externa, m

S = área (m²)

- Módulo de Tenacidade, U_{tf} , é dada pela área total do gráfico.

$$U_{tf} = \frac{2 P_{\max} y_f}{3Sl}$$

U_{tf} = tenacidade em flexão, Nm/m³

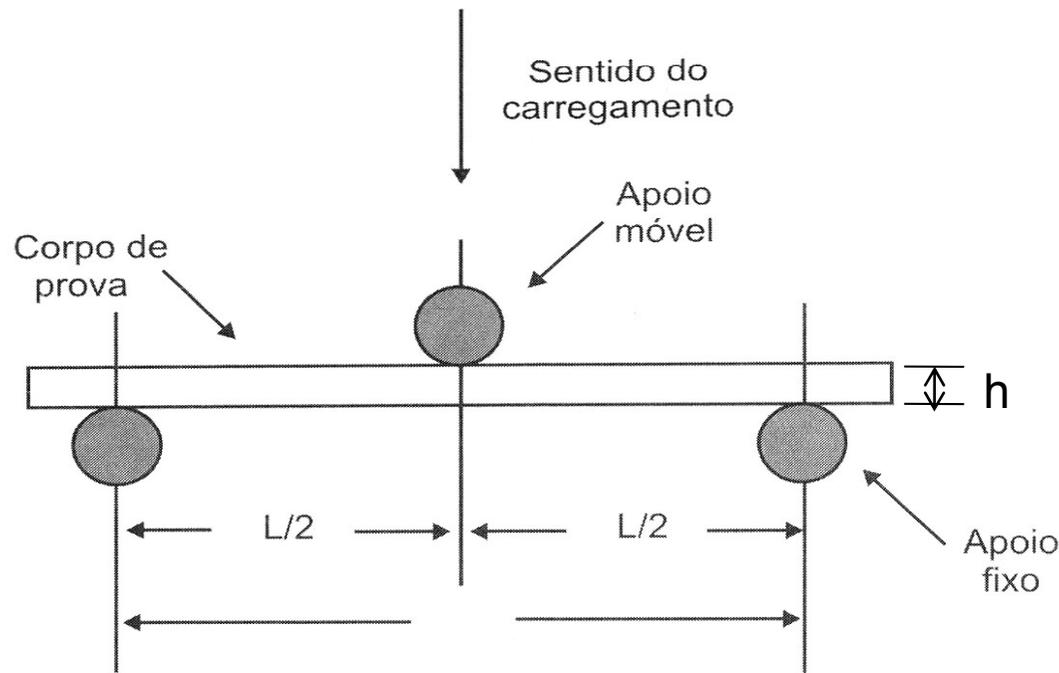
P_{\max} = carga máxima, N

y_f = flexa máxima, m

l = comprimento do CP, m

S = área (m²)

Ensaio Flexão Polímeros (ASTM D790 e ISO 178)



$$D = rL^2/6d \quad d = h \text{ (CP deitado e } h > 1,6 \text{ mm)}$$

- ✓ D = deflexão no ponto médio entre os apoios;
- ✓ r = deformação máxima na superfície oposta ao carregamento (ex. 0,05 mm/mm = 5%);
- ✓ L = distância entre apoios;
- ✓ d = profundidade dos Cps.

$L/d = 16:1$ (distancia entre apoios/prof. CP)

Término do ensaio: Ruptura ou deformação máxima de 5%



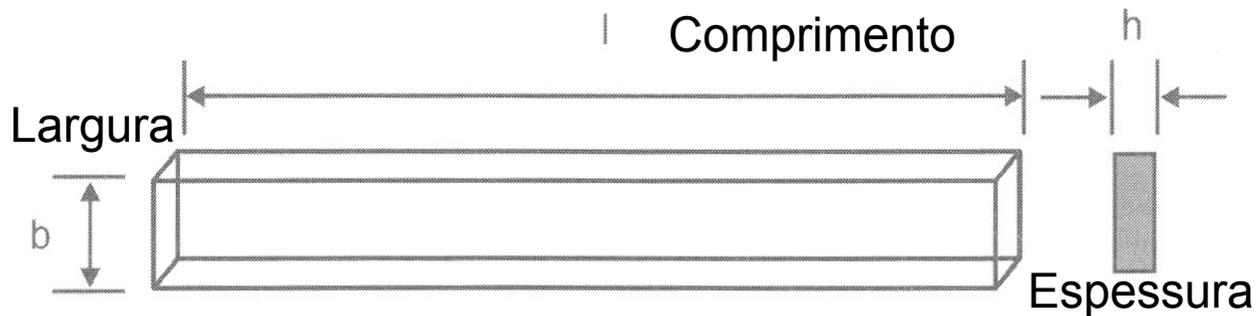
Procedimento A:

Aplicado em materiais que rompem em deflexões pequenas (rígidos e semi-rígidos)

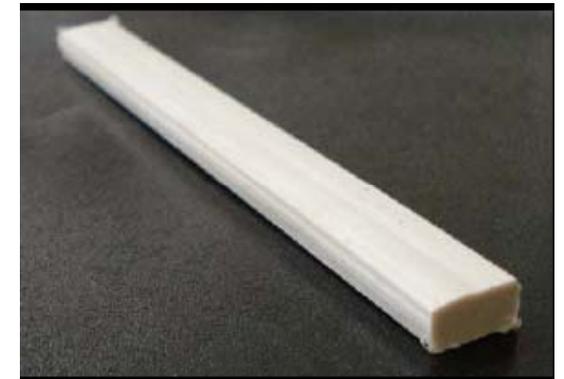
Procedimento B:

Aplicado em materiais que suportam grandes deflexões durante o ensaio.

Dimensões do CP para Ensaio de Flexão (ASTM D790)



CP padrão Moldado	CP Retirado Chapa	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ l = 127 mm; ➤ b = 12,7±0,2 mm; ➤ d = 3,2±0,2 mm; ➤ L/d=16:1. 	h < 1,6 mm	h > 1,6 mm
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ L/d=16:1; ➤ b < 1/4L; ➤ l > 10%L. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ l = 50,8 mm; ➤ b = 12,7 mm; ➤ L=25,4 mm.



Para **compósitos com elevada resistência** a razão L/d deve ser ajustada para que a falha ocorra na superfície oposta ao carregamento (**L/d=32:1**) ou (**L/d=40:1**)

Velocidade de Ensaio:

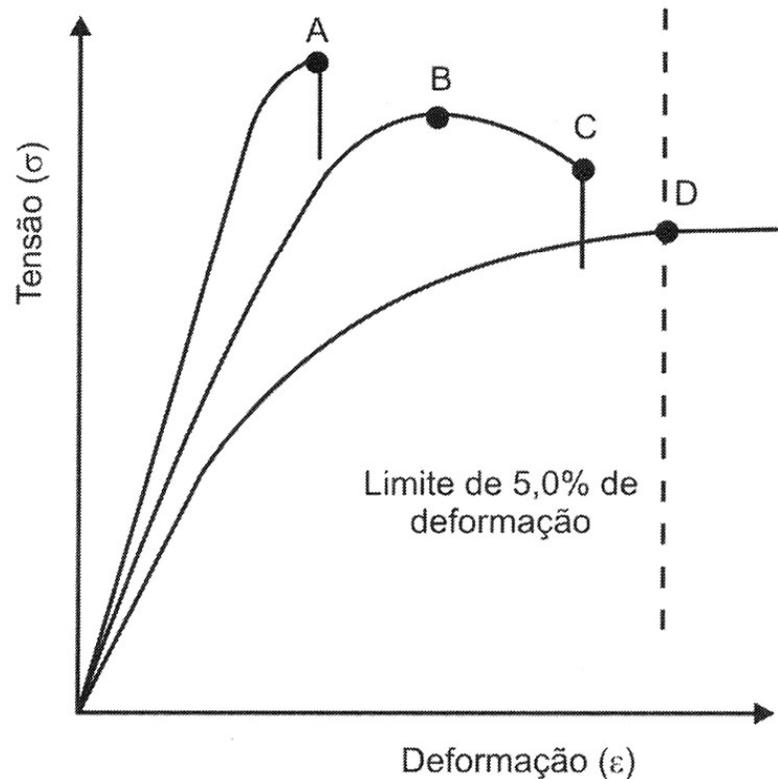
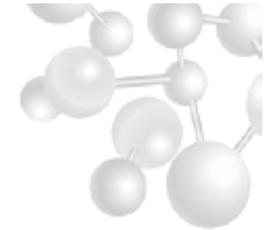
$$R = ZL^2/6d \quad (\text{mm/min})$$

- ✓ R – velocidade do travessão
- ✓ L – distância entre apoios;
- ✓ d = profundidade do CP
- ✓ Z = Taxa de deformação na superfície oposta ao carregamento

Procedimento A
Z=0,01 mm/mm/min

Procedimento B
Z=0,10 mm/mm/min

Principais Parâmetros Obtidos no Ensaio Flexão 3 pontos



1) $\sigma_f = 3PL/2bd^2$

- ✓ σ_f = tensão de flexão na superfície oposta ao carregamento (MPa);
- ✓ P = carga em Newtons;
- ✓ L = distância entre apoios;
- ✓ b = largura do CP em mm;
- ✓ d = profundidade (esp.) do CP em mm.

2) σ_{fM} = máxima tensão sob flexão no ensaio (pontos A, B e D)

Caso o CP não rompa até 5% adotar o P de 5% de deformação

3) σ_{fb} = tensão de flexão na ruptura (pontos A e C)

4) ϵ_{fr} (deformação sob flexão): variação percentual no incremento do comprimento de um elemento da superfície oposta ao carregamento, onde a deformação máxima irá ocorrer. Calculado para qualquer deflexão ($\epsilon_f = 6Dd/L^2$)

5) E_f = (módulo de elasticidade secante ou tangente): razão dentro do limite de elasticidade entre a tensão de flexão e a deformação correspondente ($E_f = L^3m/4bd^3$).

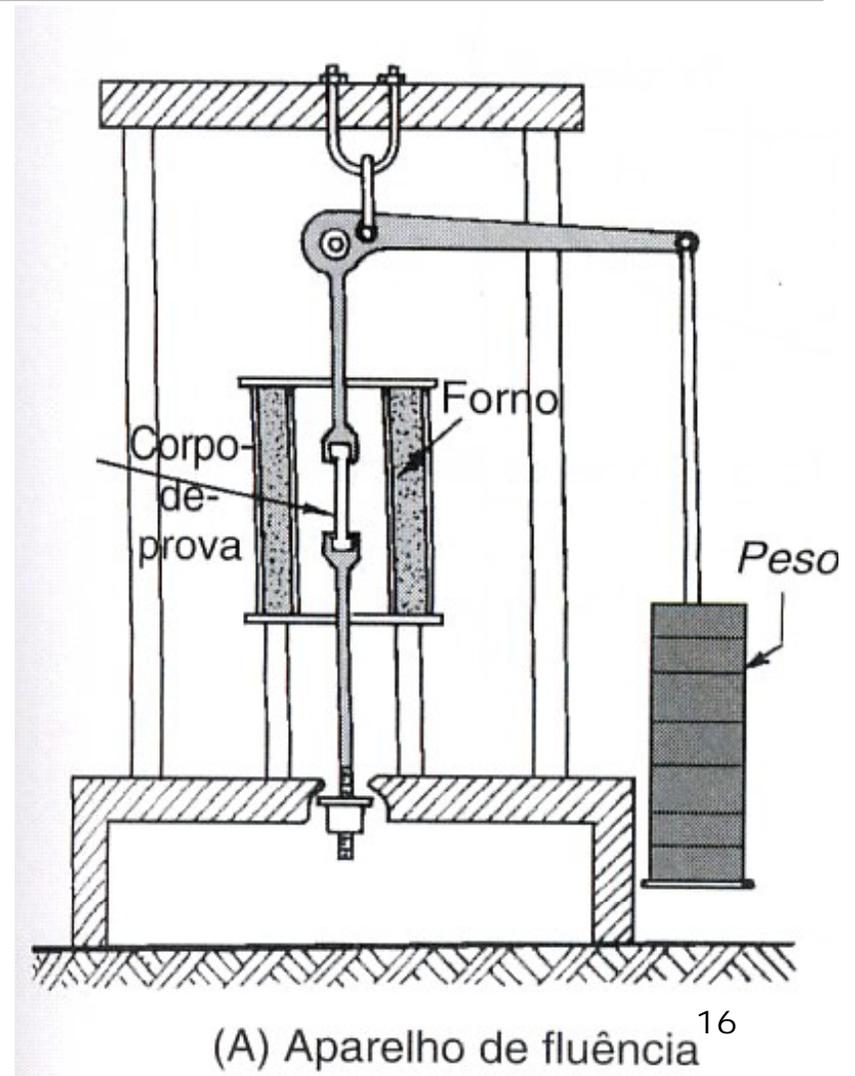
Modulo tangente (m – inclinação da tangente da curva)
Módulo secante (m – inclinação da secante da curva)

Ensaio de Fluência



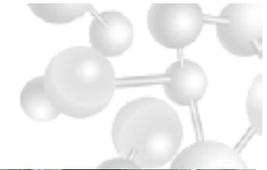
Definição Fluência: fenômeno de deformação plástica acumulada com o tempo que um sólido apresenta, sob o efeito constante da tensão e temperatura.

- O ensaio de fluência consiste na aplicação de uma carga constante em um material durante um período de tempo, em temperaturas elevadas;
- Essas condições são favoráveis a mudanças de comportamento dos materiais devido à difusão dos átomos, movimento de discordâncias, escorregamento e recristalização;
- Fenômeno ocorre em $T > 0,4T_f$ (acima de 0,4 da temp. absoluta de fusão).

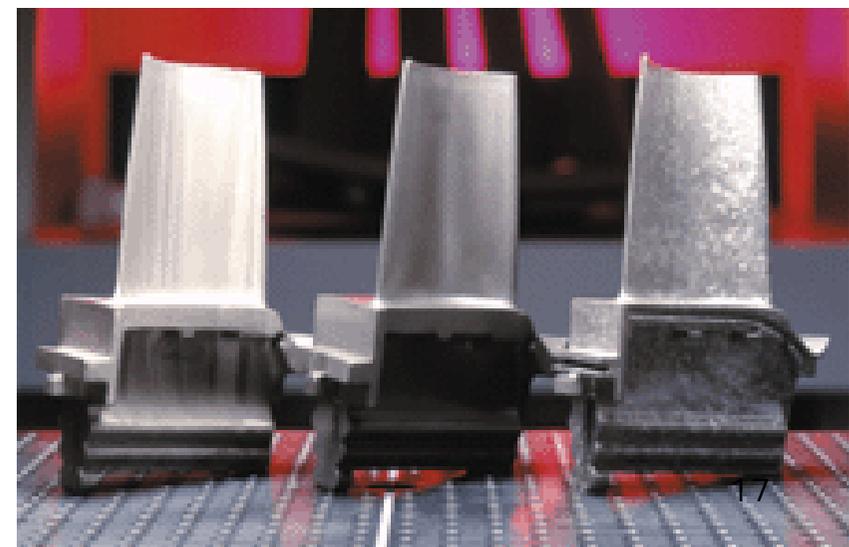


(A) Aparelho de fluência¹⁶

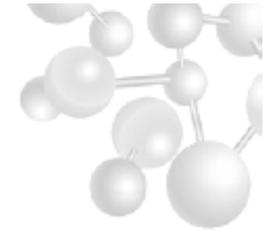
Ensaio de Fluência



- No ensaio de fluência pode-se obter apenas o tempo de ruptura total (ensaio de ruptura por fluência).
- Normalmente no ensaio de fluência são medidas as *deformações* que ocorrem no CP em função do *tempo* (ensaio de fluência).
- Entre os materiais ensaiados em fluência pode-se citar os empregados em instalações de refinarias petroquímicas, usinas nucleares, indústria aeroespacial, turbinas, forno craqueamento etc..



Ensaio de Fluência

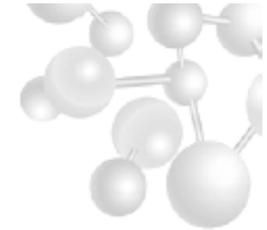


O ensaio de fluência pode ser dividido em três estágios:

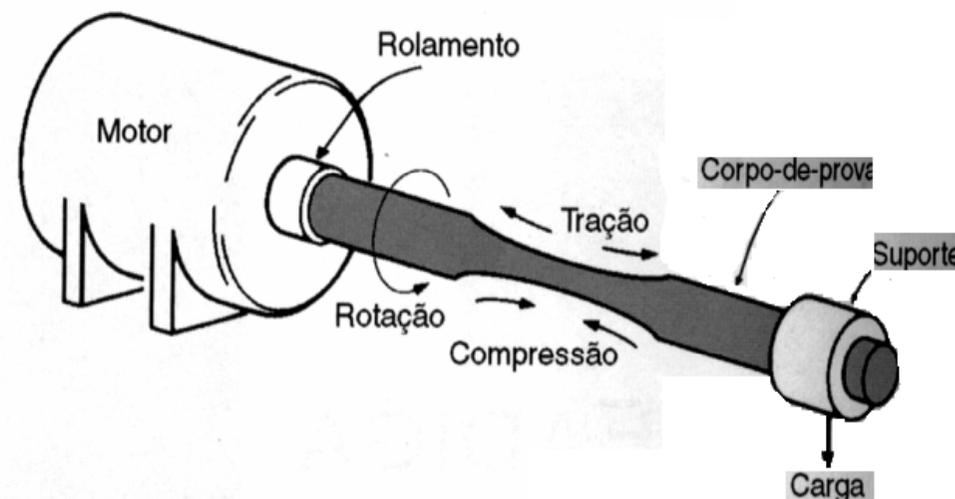
- Primário: decréscimo contínuo da taxa de fluência ($d\varepsilon/dt$) em função do aumento de resistência devido ao encruamento
- Secundário: taxa de fluência constante, função do equilíbrio entre encruamento e recuperação (devido temp.). O parâmetro mais importante (**taxa mínima de fluência**) consiste na inclinação da curva nesse estágio
- Terciário: aceleração da taxa de fluência devido a estrição do CP culminando na ruptura devido à formação e propagação de trincas



Ensaio de Fadiga



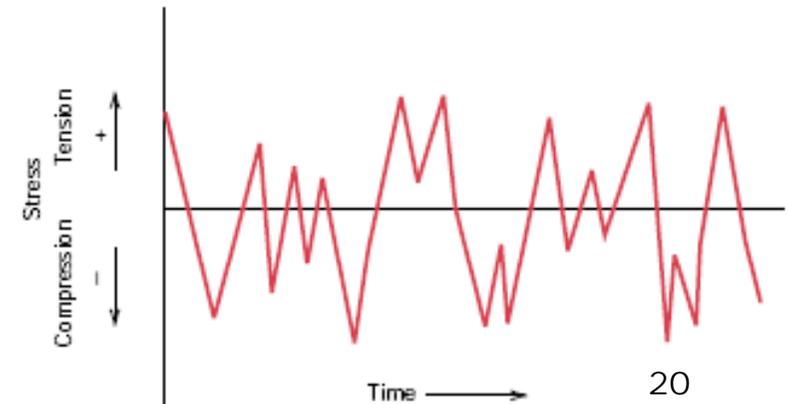
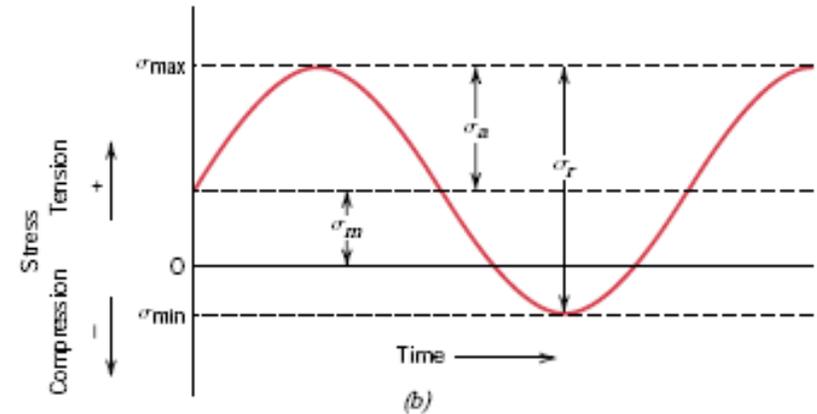
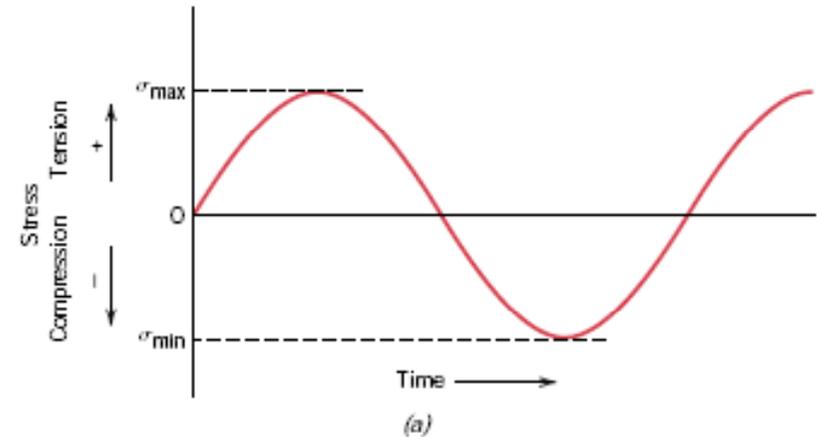
- Os materiais metálicos, quando submetidos a esforços cíclicos rompem-se a tensões inferiores àquelas determinadas nos ensaios de tração e compressão. A ruptura que ocorre é denominada ruptura por fadiga
- O ensaio de fadiga consiste na aplicação de carga cíclica em corpo de prova padronizado



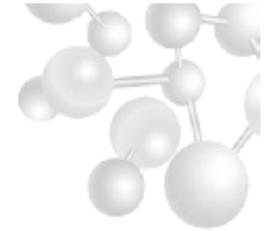
Tensões Cíclicas

Em geral são possíveis três modalidades diferentes de tensão oscilante-tempo:

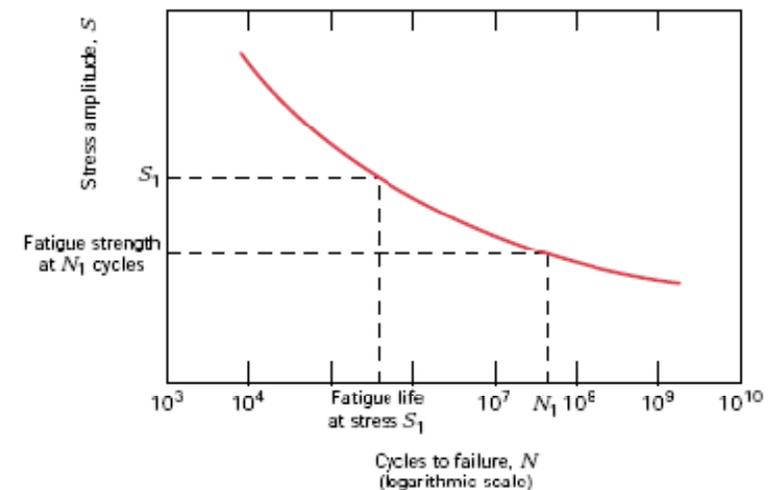
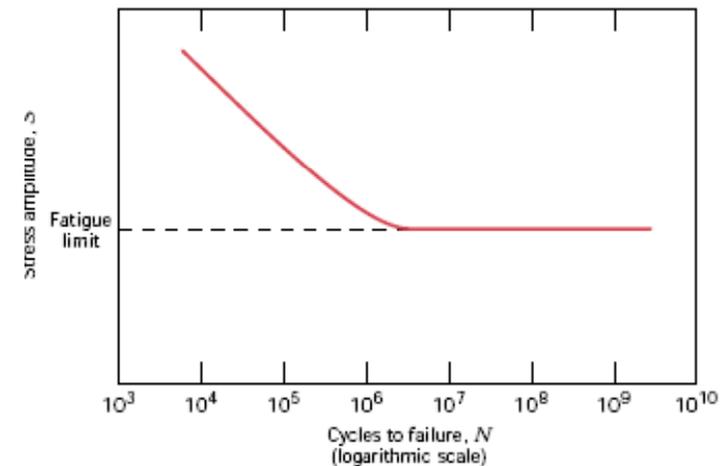
- Ciclo de tensões alternadas: dependência regular e senoidal em relação ao tempo, alternando entre uma tensão máxima de tração e uma tensão mínima de compressão de igual magnitude;
- Ciclo de tensões repetidas: valores máximos e mínimos são assimétricos e relação ao nível 0 de tensão;
- Ciclo de tensões aleatórias.



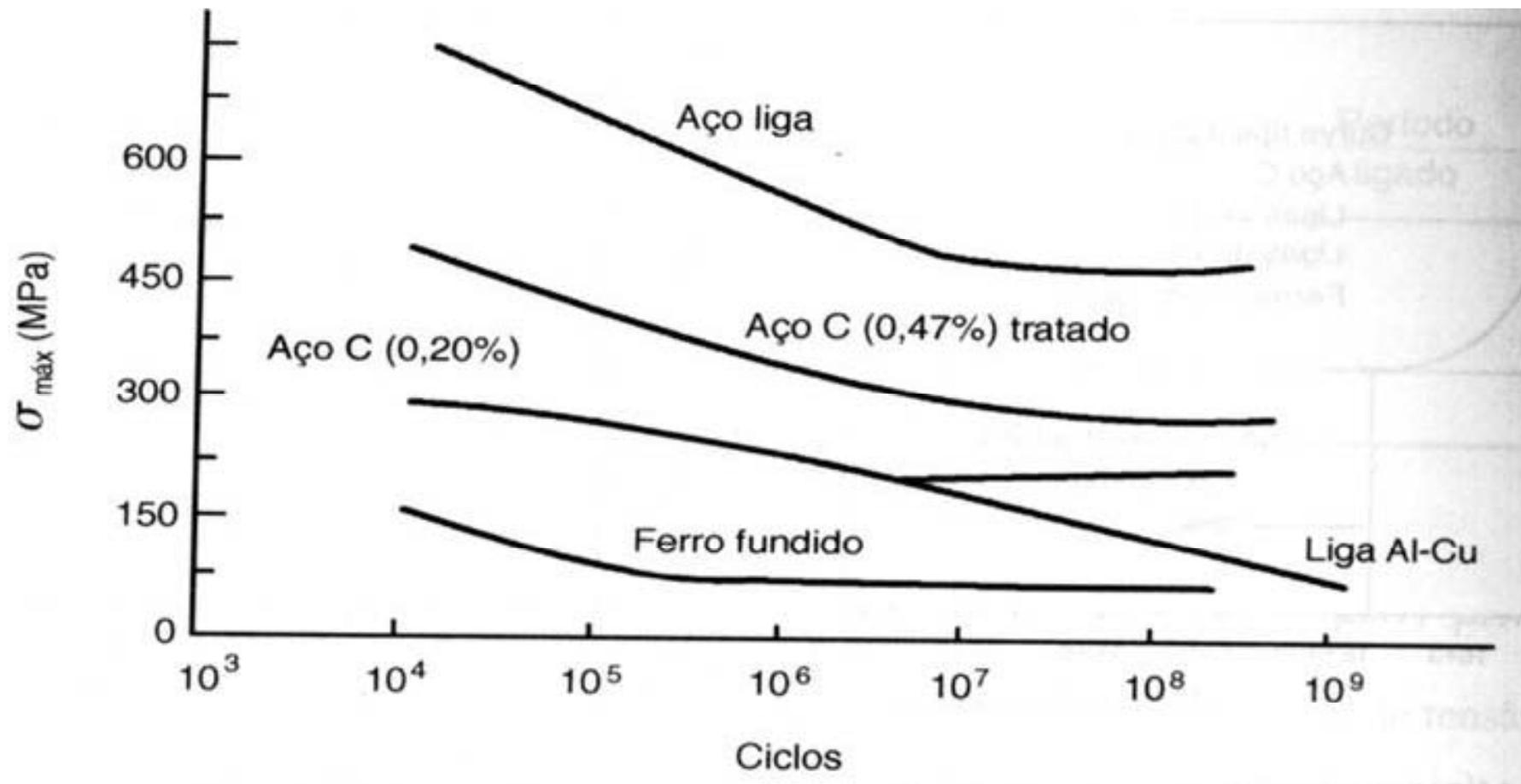
Curva σ - N ou Curva de Wöhler



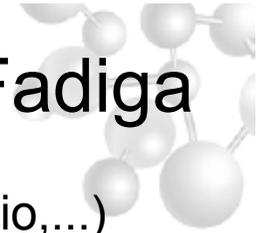
- Em geral, a curva σ - N de materiais ferrosos (+ Ti) apresenta um **limite de resistência à fadiga**. Para valores abaixo desse limite o CP nunca irá sofrer ruptura por fadiga
- Para ligas não ferrosas a fadiga é caracterizada pela **resistência à fadiga**, tensão na qual ocorre ruptura por fadiga após um número de ciclos específicos (10^6 a 10^8)
- **Vida à fadiga** consiste no número de ciclos que causará a ruptura em determinado nível de tensão
- Em função do número de ciclos para haver ruptura o ensaio pode ser de **baixo ciclo** (10^4) ou de **alto ciclo** (acima desse limite)



Curva σ -N ou Curva de Wöhler

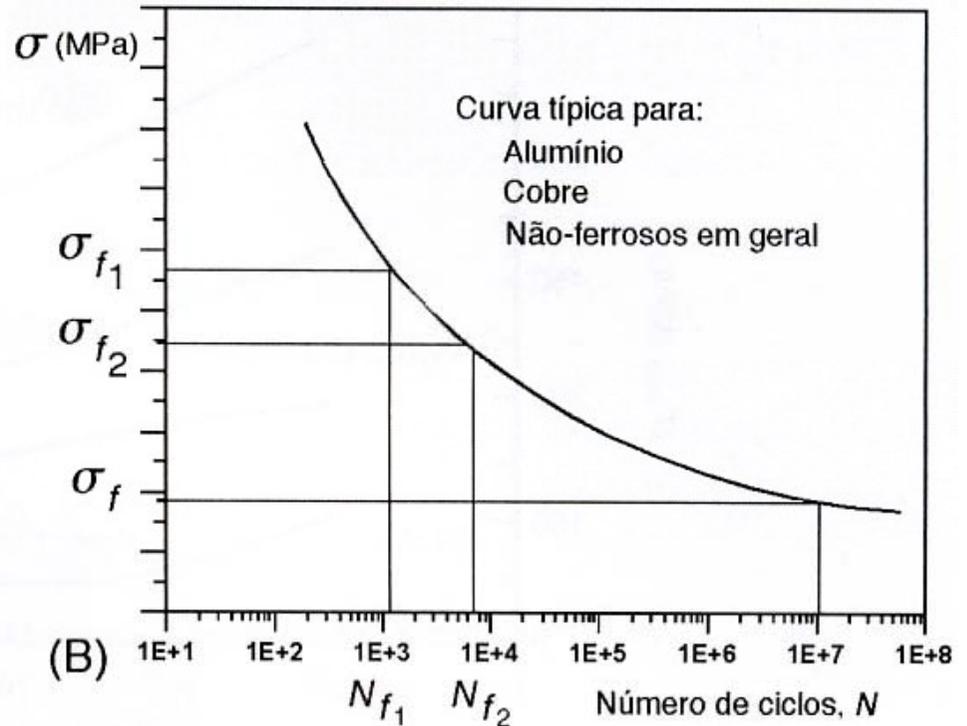
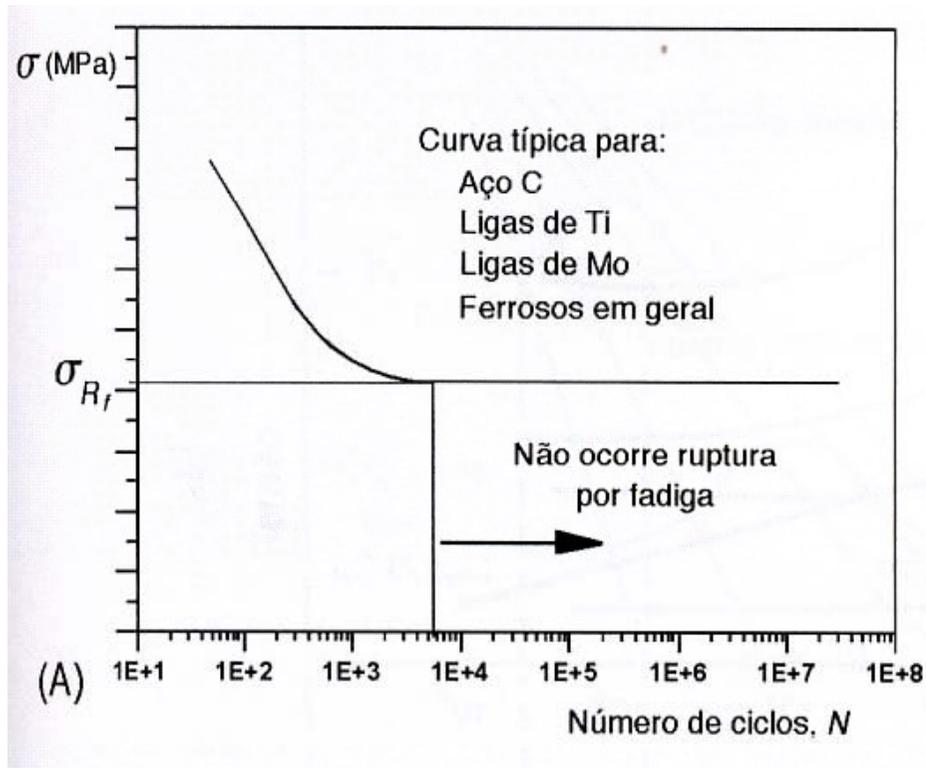


- Resultado de ensaio de fadiga para diferentes materiais



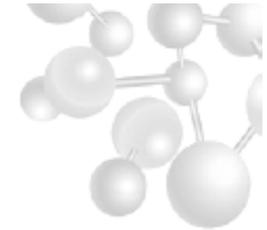
Diferença entre Limite à Fadiga e Resistência a Fadiga

- **Limite de resistência à fadiga (σ_{Rf})**: em certos materiais (aços, titânio,...) abaixo de um determinado limite de tensão abaixo do qual o material nunca sofrerá ruptura por fadiga.
- **Resistência à fadiga (σ_f)**: em alguns materiais a tensão na qual ocorrerá a falha decresce continuamente com o número de ciclos (ligas não ferrosas: Al, Mg, Cu,...). Nesse caso a fadiga é caracterizada por resistência à fadiga



Para os aços o limite de resistência à fadiga (σ_{Rf}) está entre 35-65% do limite de resistência à tração.

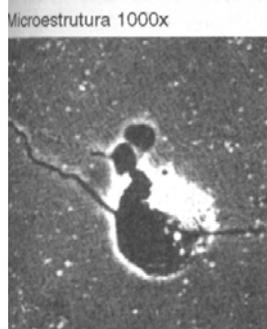
Nucleação da Trinca



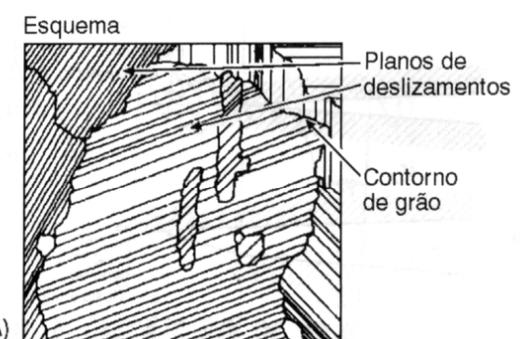
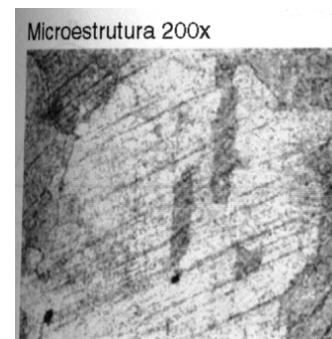
- A ruptura do material por fadiga ocorre devido à formação e propagação de trincas;
- As trincas se iniciam principalmente em defeitos de superfície, entalhes, inclusões, contornos de grãos, defeitos de solidificação, pontos de corrosão e pontos que sofrem deformação localizada.



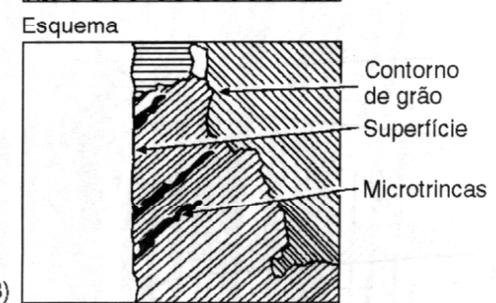
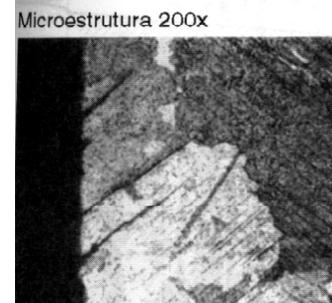
(A)



(B)

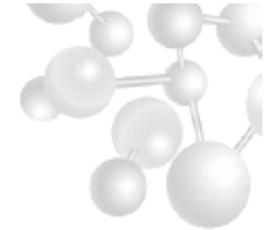


(A)

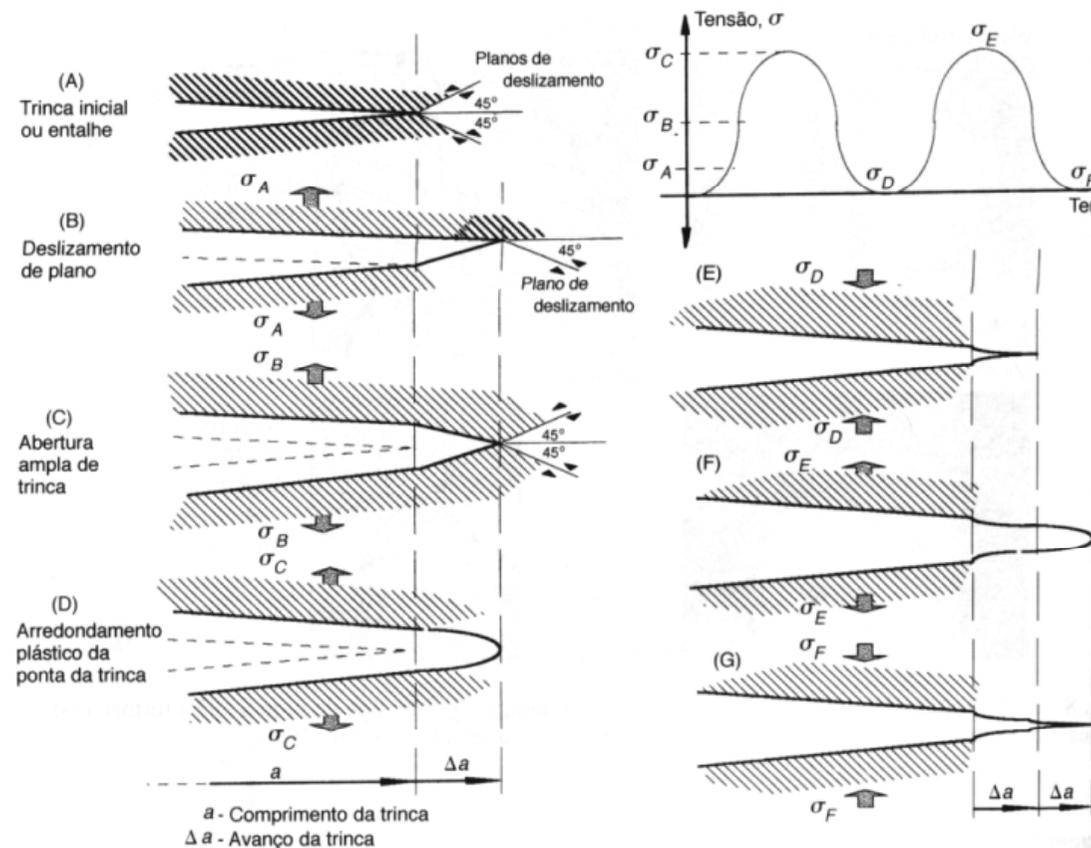


(B)

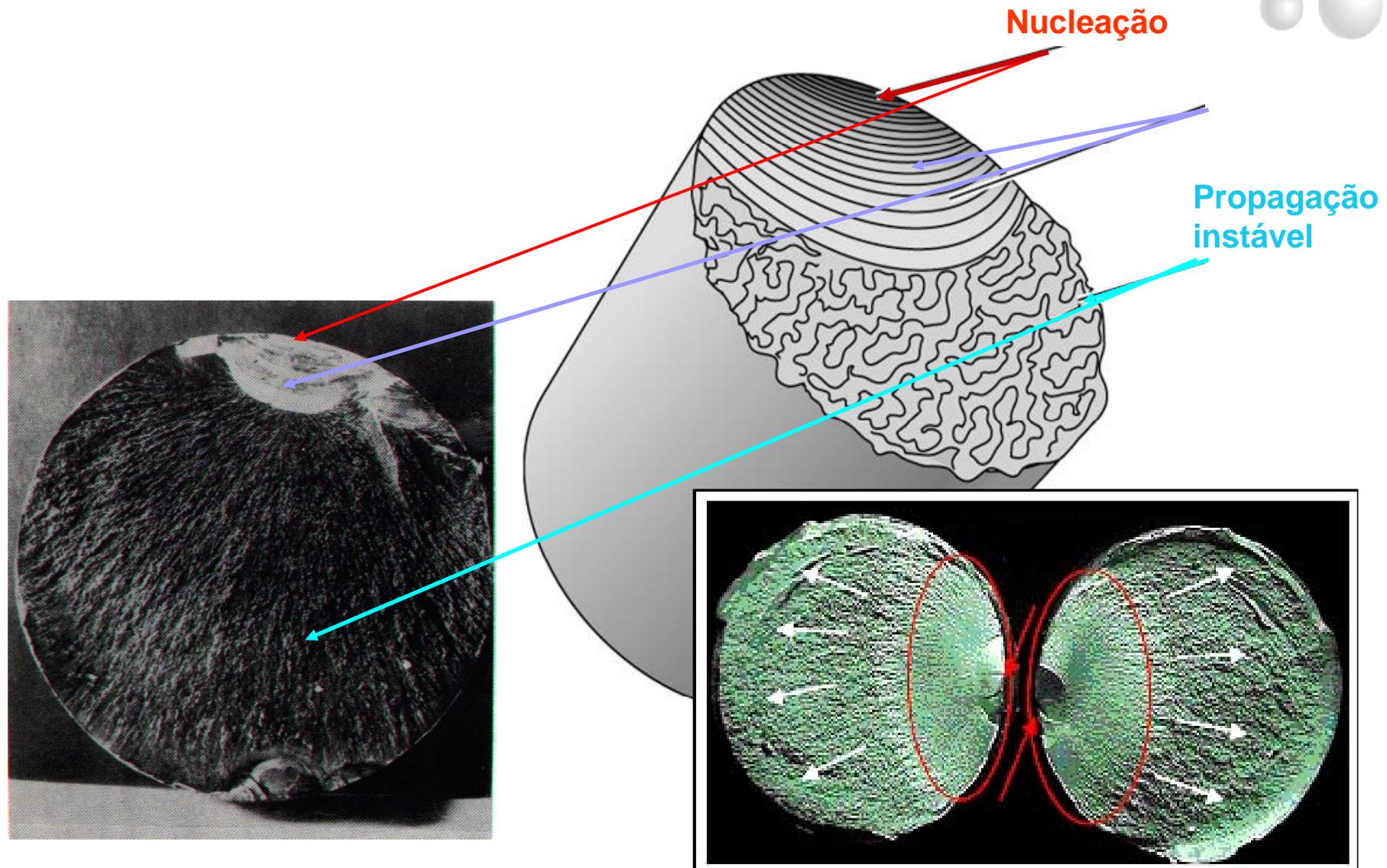
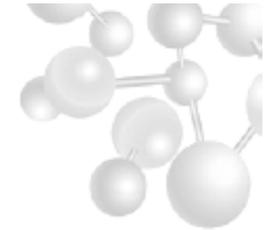
Propagação de Trincas



- A concentração de tensão (tração) na ponta da trinca favorece o deslizamento de planos em 45° (A, B e C)
- Em resposta à deformação plástica, a ponta da trinca torna-se curva (embota).
- Na recuperação da tensão (ou tensão de compressão) a ponta é comprimida, formando novamente uma ponta aguda e o processo volta a se repetir em cada ciclo

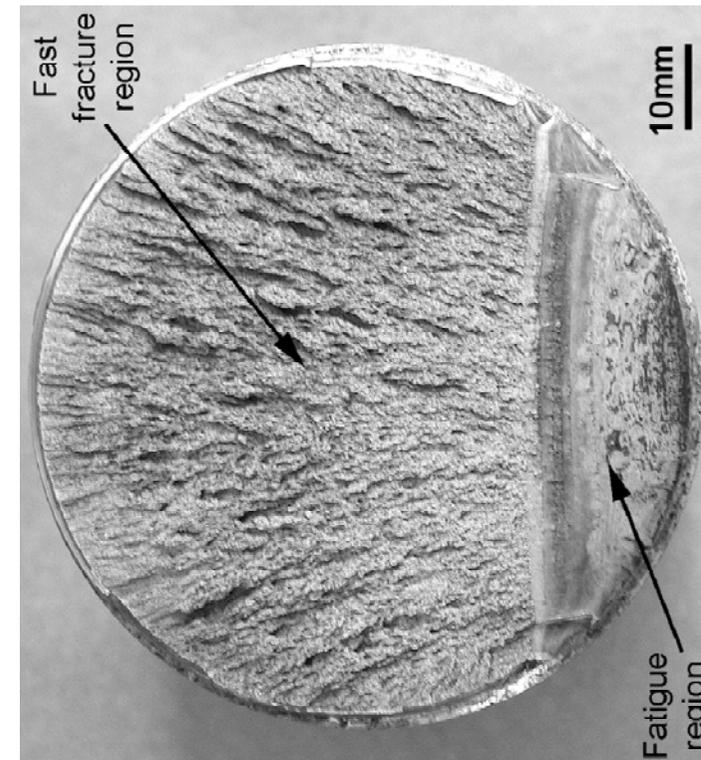
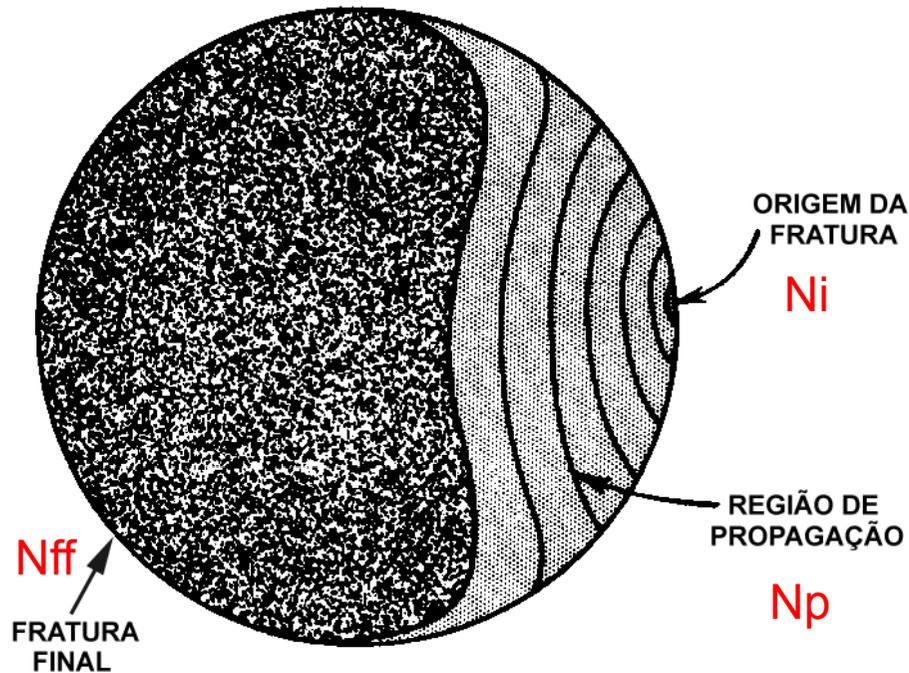
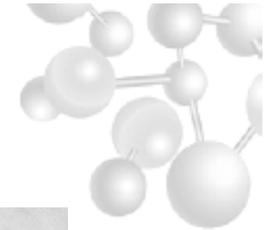


Características Macroscópicas



Características macroscópicas gerais de uma fratura por fadiga.

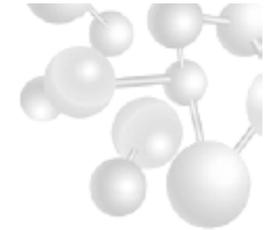
Modo Macroscópico de Propagação de Trinca por Fadiga



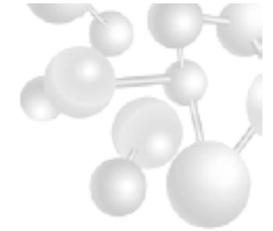
A superfície de uma fratura por fadiga apresenta duas regiões distintas:

- Região de propagação estável da trinca (aspecto polido, devido ao atrito das faces da trinca com possíveis marcas de progressão da trinca;
- Corresponde à área de fratura final não tendo ação do atrito (grosseiro, irregular, texturizado) – fratura frágil ou dúctil

Bibliografia



- ❑ Ciência e Engenharia de Materiais – uma Introdução, Willian D. **Callister**, Jr. LTC 5. edição.
- ❑ The Science and Engineering of Materials, 4th ed Donald R. **Askeland** – Pradeep P. Phulé.
- ❑ **Dieter**, G.E. Metalurgia Mecânica 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.
- ❑ Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos, Fundamentos teóricos e práticos. 5^o. Edição. Sérgio Augusto de **Souza**
- ❑ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8M-01A (2001)**. Standard test methods of tension testing of metallic materials. Metric. Philadelphia.
- ❑ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E9-89a00 (2000)**. Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature



OBRIGADO PELA

ATENÇÃO !!!