



Introdução aos Elementos de Máquinas

PMR3320

Aula 2

Fadiga dos Materiais



1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
------------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	---------------------	---	--

1. Introdução

Falhas em máquinas $\Rightarrow$ Cargas que **variam no tempo**

$\Rightarrow$ Níveis de tensão **inferiores a S_y**

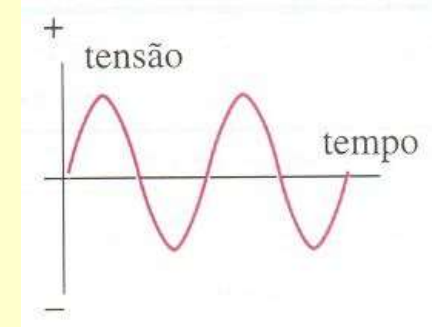


1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	---------------------	---	--

❖ História

Observado pela 1ª vez por volta de 1800 $\Rightarrow$ Eixos de vagão ferroviário

- falhavam após pequeno período de serviço
- aço **dúctil** mas fratura **frágil** e repentina
- **cargas dinâmicas** eram fenômeno novo (máquinas a vapor)
 - ✓ tensão na superfície do eixo varia ciclicamente





1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	---------------------	---	--

Termo “fadiga” $\Rightarrow$ 1839 o material **dúctil** apresentou cansaço e **fragilizou-se**.

August **Wöhler** (1870) $\Rightarrow$ eixos em laboratório até a falha.

ainda: cada metade dos eixos quebrados continuavam tão resistentes e dúcteis, em ensaios de tração, quanto o material original.



1. Introdução
❖ História

2. Mecanismos de
Falha por Fadiga

3. Modelos de Falha
por Fadiga

4. Cargas de
fadiga

5. Critérios de Medição
da Falha por Fadiga

6. Critérios para
estimar a falha por
fadiga





1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	---------------------	---	--

Exemplo

- 1º avião de transporte civil, a jato e pressurizado $\Rightarrow$ COMET (inglês)
trincas de 0.07'' de comprimento próximas aos cantos das janelas.
duas fahas em 1954 devido a falhas por fadiga na fuselagem



1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--	--

2. Mecanismo de Falha por Fadiga

Início com uma pequena **trinca** pré-existente ou desenvolvida através do tempo devido às deformações cíclicas ao redor dos concentradores de tensão

Entalhe $\Rightarrow$ qualquer contorno geométrico que **eleve a tensão local**

Ex.: rasgo de chaveta, mudança de diâmetro, defeitos superficiais

É fundamental que peças dinamicamente carregadas sejam projetadas para minimizar a concentração de tensões



1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--	--

❖ Estágios na falha por fadiga

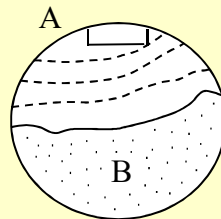
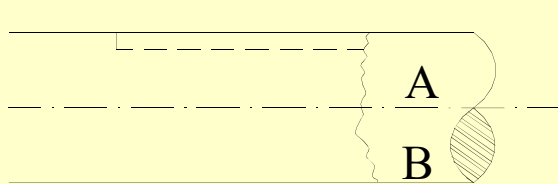
1º) **Início (nucleação) da trinca** $\Rightarrow$ escoamento localizado devido à concentração de tensão;

2º) **Propagação da trinca** $\Rightarrow$ tensão de tração e carregamento cíclico;

3º) **Fratura** $\Rightarrow$ fator de intensidade de tensão (K) aumenta devido ao aumento da trinca.

$$K = K_c \Rightarrow \text{fratura instantânea (frágil) da peça}$$

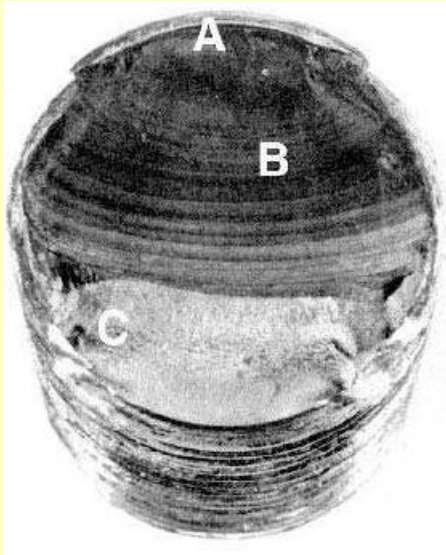
* Trincas progridem lentamente (A) e falham repentinamente (B)



A- região polida devido ao “abre-fecha”
B- região fosca $\rightarrow$ ruptura violenta



1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--	--



A figura ao lado, mostra uma fratura por **fadiga** de um **parafuso**, causada por flexão pulsante, unidirecional. O ponto A indica o início da trinca que se propagou, deixando “marcas de praia”, indicada pelo ponto B e finalmente o ponto C indicando a região final da fratura.



Fadiga devido à flexão alternada simétrica



1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--	--

3. Modelos de Falha por Fadiga

- modelo *tensão-número de ciclos (S-N)*
FAC e vida infinita
- modelo *deformação-número de ciclos (ϵ -N)*
FBC e vida infinita
- modelo da *mecânica da fratura linear-elástica (MFLE)*
FBC e vida finita

Regimes de Fadiga

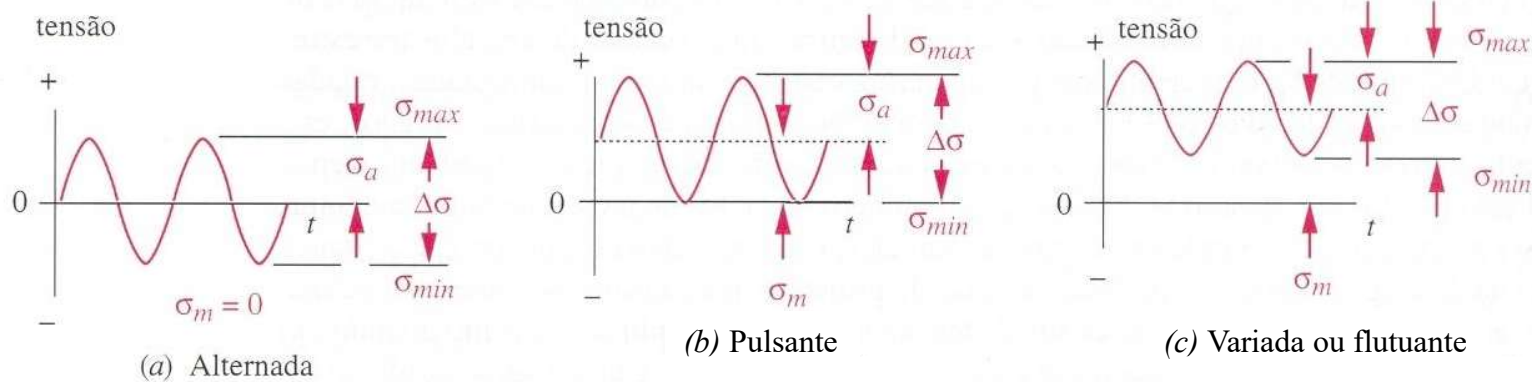
- fadiga de baixo ciclo (FBC)
- fadiga de alto ciclo (FAC)

Neste estudo o limite é $N = 10^3$ ciclos



1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--	--

4. Cargas de fadiga



Valores das componentes média, alternada e o intervalo de variação de tensões para tensões cíclicas alternadas, pulsantes e variadas.

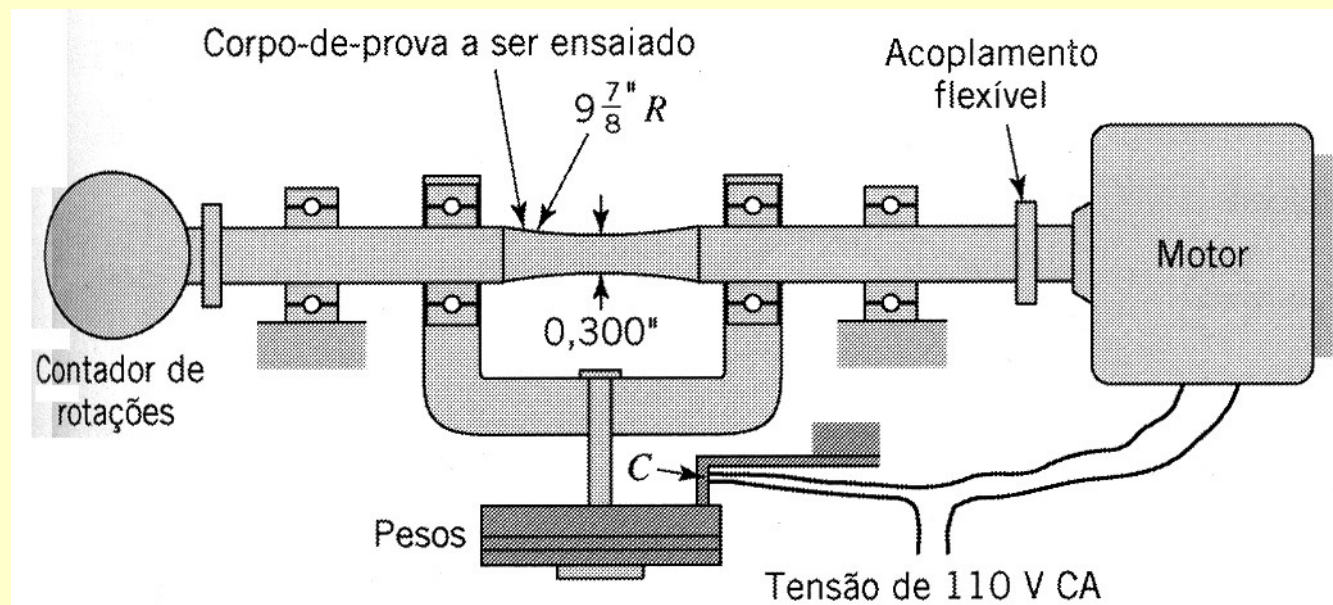
$$\begin{aligned}\Delta\sigma &= \sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}} \\ \sigma_a &= (\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}})/2 \\ \sigma_m &= (\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}})/2 \\ R &= \sigma_{\text{mín}}/\sigma_{\text{máx}} \\ A &= \sigma_a/\sigma_m\end{aligned}$$

$\Rightarrow$ faixa de variação de tensões
 $\Rightarrow$ amplitude da variação de tensões
 $\Rightarrow$ tensão média
 $\Rightarrow$ razão de tensão
 $\Rightarrow$ razão de amplitude



1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--	--

Máquina de ensaio de fadiga R.R. Moore



1725 rpm
 M_z cte

10^6 ciclos $\Rightarrow$ 10 h
 10^8 ciclos $\Rightarrow$ 40 dias



1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	---------------------	---	--

5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga

A maioria das informações disponíveis sobre resistência à fadiga provem de **ensaios em eixos girantes sujeitos à flexão alternada**

Ensaio de flexão rotativa (tensões alternadas) $\Rightarrow$ FAC

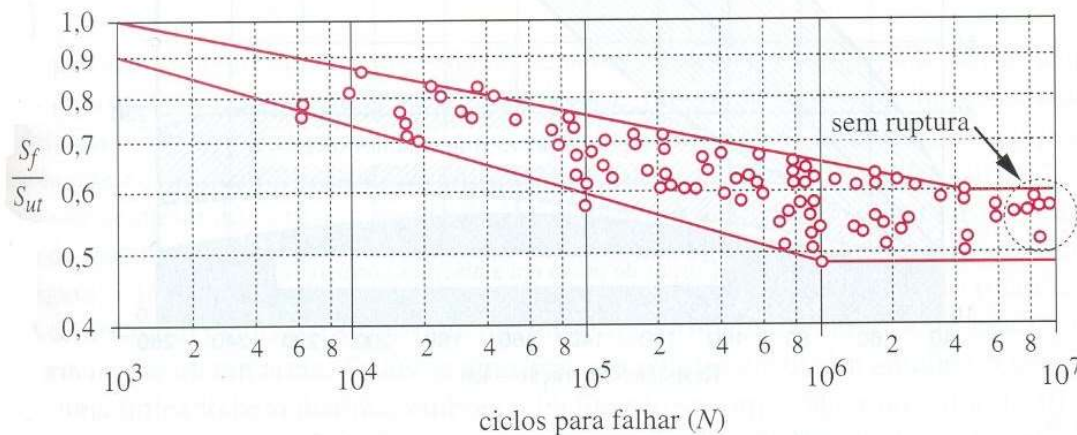


Diagrama de Wöhler
ou
 $S-N$

Gráfico log-log da composição de curvas $S-N$ para aços forjados com $S_{ut} < 200$ kpsi. (Extraído de R. C. Juvinall, *Stress, Strain and Strength*, McGraw-Hill, New York, 1967, Fig. 11.7, p. 210, com permissão.)



1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--	--

Observações

- grande dispersão dos dados
- $\uparrow$ tensão alternada $\downarrow$ número de ciclos até a falha
- existe um nível de tensão abaixo do qual vida infinita ($>10^6$ ciclos)
 $\Rightarrow$ limite de fadiga (S_e)

Definições

Limite de fadiga (S_e) $\Rightarrow$ nível de tensão, abaixo do qual, não ocorrem mais falhas por fadiga, podendo-se continuar os ciclos indefinidamente

Resistência à fadiga (S_f) $\Rightarrow$ para aplicações que requerem um tempo de operação inferior a 10^6 ciclos, pode-se definir a resistência à fadiga



1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--	--

Comentário adicional

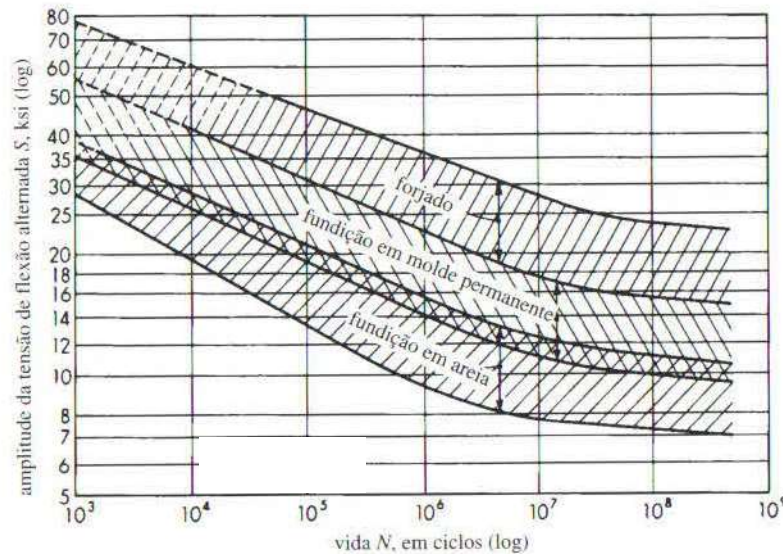


FIGURA 6-10

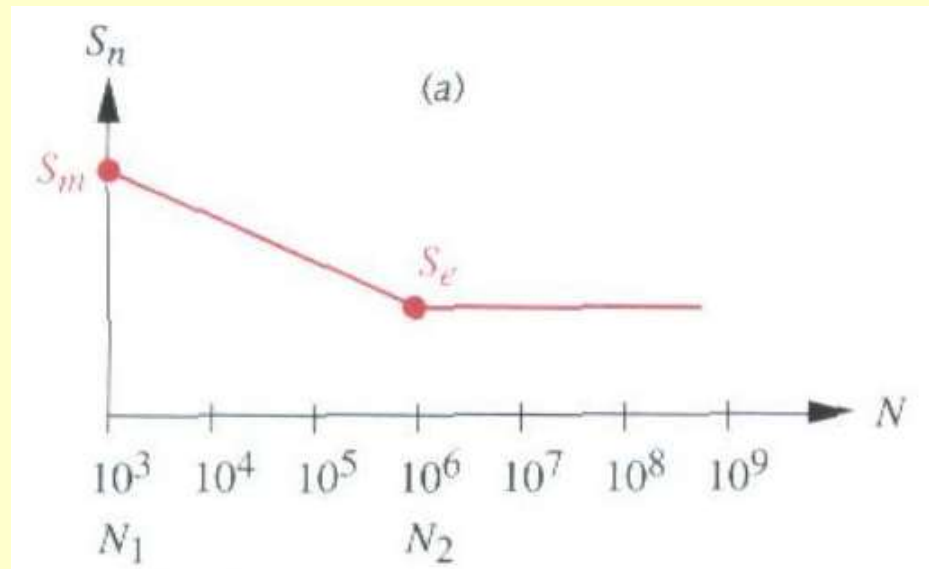
Bandas de curvas S-N para ligas de alumínio representativas, excluindo-se ligas forjadas com $S_{ut} > 38$ kpsi. (Extraído de R. C. Juvinall, *Stress, Strain and Strength*, McGraw-Hill, New York, 1967, Fig. 11.13, p. 216.)

Não se aplica
Limite de fadiga (S_e)



1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--	--

❖ Diagrama S-N estimado – materiais que apresentam (S_e)



Escala
log-log

S_n – resistência à fadiga correspondente a um N qualquer

S_m – resistência do material 10^3 ciclos



1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--	--

Dados de testes indicam que:

$$S_m = 0,9 S_{ut}$$

carregamento de flexão

$$S_m = 0,75 S_{ut}$$

força normal



1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--	--

Equação que passa por S_m e S_e

$$S_n = a N^b \quad \text{ou} \quad \log S_n = \log a + b \log N$$

a e b = constantes definidas pelas condições de contorno

Para $N = 10^3$ ciclos $\Rightarrow S_n = S_m$ (conhecido!)

$$S_m = a (10^3)^b$$

$N = 10^6$ ciclos $\Rightarrow S_n = S_e$ (conhecido!)

$$S_e = a (10^6)^b$$



1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--	--

Desta forma:

$$b = \frac{1}{\log N_1 - \log N_2} \log \frac{S_m}{S_e}$$

$$N_1 = 10^3 \text{ ciclos}$$

$$N_2 = 10^6 \text{ ciclos}$$

$$\log a = \log S_m - b \log N_1$$

Agora é possível estimar o número de ciclos para um S_n dado

$$S_n = a N^b$$



1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--	--

Danos (a)cumulativos

Fazer diagrama na lousa

$n_i \Rightarrow$ n° de ciclos sob tensão σ_i

$N_i \Rightarrow$ n° de ciclos para romper sob tensão σ_i

Com n_i não rompe, mas causa danos que diminuem a vida



S_e é menor que originalmente

#####

Materiais em que não se aplica

Limite de fadiga (S_e)



Não serão feitos comentários

Norton, R. L.; Projeto de Máquinas – uma abordagem integrada; 2ª edição, págs. 324 e 325

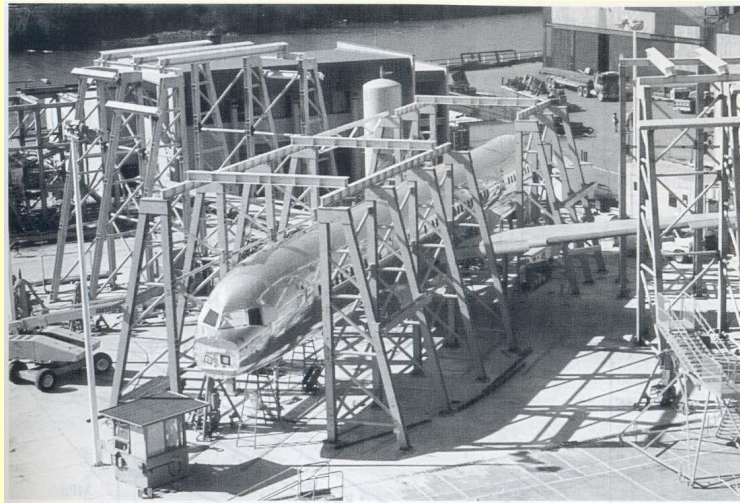


1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	---------------------	---	--

6. Critérios para Estimar a Falha por Fadiga

Para se obter S_e (limite de fadiga) e/ou S_f (resistência à fadiga)

- ensaios com montagens reais ou protótipos
- ensaios com corpos de prova retirados do mesmo material da peça
- manuais do fabricante/fornecedor de materiais
- com base nos dados disponíveis de ensaios estáticos (S_{ut} e S_y)

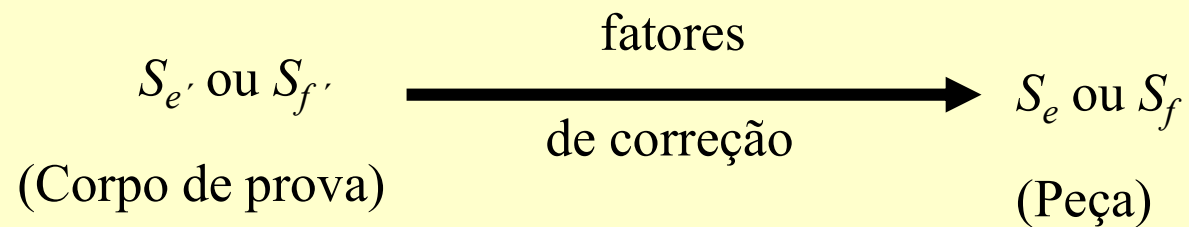


Conjunto com instrumentação construído para permitir ensaios de fadiga das montagens da asa e da fuselagem de um avião Boeing 757. (Cortesia da Boeing Commercial Airplane Co., Seattle, Wash.)



1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--	--

O apóstrofo (') indica que a propriedade é relativa ao corpo de prova



Se **não existirem dados disponíveis** de resistência à fadiga, valores aproximados de $S_{e'}$ ou $S_{f'}$ podem ser estimados a partir de valores de resistência à tração do material (próximo *slide*).

$$\begin{array}{lll} \text{p/ aços:} & S_{e'} \cong 0,5 S_{ut} & S_{ut} < 1400 \text{ MPa} \\ & S_{e'} \cong 700 \text{ MPa} & S_{ut} \geq 1400 \text{ MPa} \end{array}$$

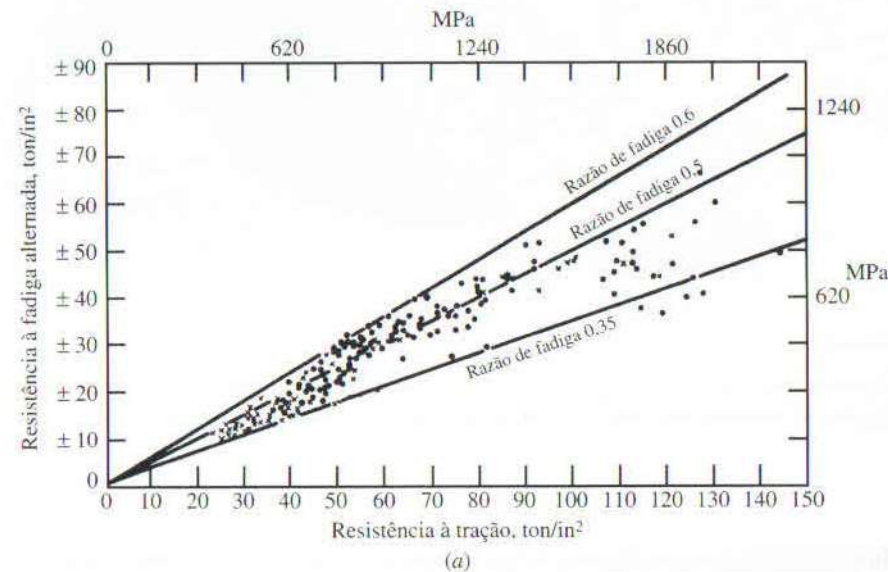


1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--	--

Ferros:
$$\begin{cases} S_{e'} \cong 0,4 S_{ut} & \text{para } S_{ut} < 60 \text{ ksi (400 MPa)} \\ S_{e'} \cong 24 \text{ ksi (160 MPa)} & \text{para } S_{ut} \geq 60 \text{ ksi (400 MPa)} \end{cases}$$

Alumínios:
$$\begin{cases} S_{f@5E8} \cong 0,4 S_{ut} & \text{para } S_{ut} < 48 \text{ ksi (330 MPa)} \\ S_{f@5E8} \cong 19 \text{ ksi (130 MPa)} & \text{para } S_{ut} \geq 48 \text{ ksi (330 MPa)} \end{cases}$$

Ligas de cobre:
$$\begin{cases} S_{f@5E8} \cong 0,4 S_{ut} & \text{para } S_{ut} < 40 \text{ ksi (280 MPa)} \\ S_{f@5E8} \cong 14 \text{ ksi (100 MPa)} & \text{para } S_{ut} \geq 40 \text{ ksi (280 MPa)} \end{cases}$$



$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$$



razão de tensão ou razão
de fadiga

Ex. alternada simétrica



$$R = 1$$



1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--	--

Fatores de correção para S_e ou S_f

$$S_e = C_{carreg} C_{tamanho} C_{superf} C_{temp} C_{conf} S_{e'}$$

$$S_f = C_{carreg} C_{tamanho} C_{superf} C_{temp} C_{conf} S_{f'}$$

❖ efeito do carregamento (ou solicitação)

Flexão alternada: $C_{carreg} = 1$

Força normal alternada: $C_{carreg} = 0,7$

Torção alternada: $C_{carreg} = 1$



1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--	--

❖ efeito do tamanho

Corpo de prova é cilíndrico ($d = 0,3 \text{ in}$)

Para peças cilíndricas

$$d \leq 0,3 \text{ in} (8 \text{ mm}) \quad C_{\text{tamanho}} = 1$$

$$0,3 \text{ in} \leq d \leq 10 \text{ in} \quad C_{\text{tamanho}} = 0,869 d^{-0,097} \text{ (em in)}$$

$$8 \text{ mm} \leq d \leq 250 \text{ mm} \quad C_{\text{tamanho}} = 1,189 d^{-0,097} \text{ (em mm)}$$

$$d \geq 10 \text{ in} \quad C_{\text{tamanho}} = 0,6$$

Para peças não cilíndricas $\Rightarrow$ diâmetro equivalente (d_{equiv})

* Somente esforço axial $C_{\text{tamanho}} = 1$

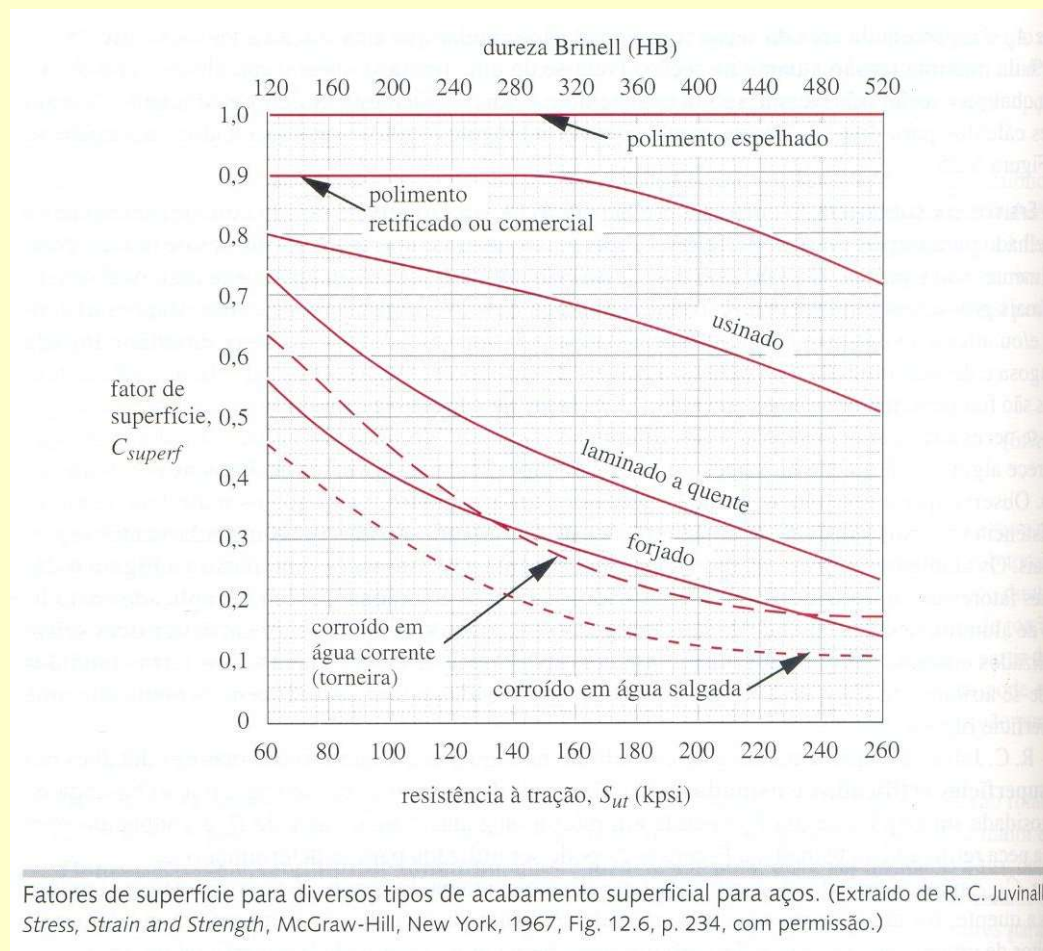
As falhas não são sensíveis ao tamanho



1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--	--

❖ efeito da superfície

Corpo de prova é
polido espelhado





1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--	--

Shigley e Mischke (1989) sugerem a utilização de uma equação exponencial da seguinte forma:

$$C_{\text{superf}} \cong A(S_{ut})^b \quad \text{Se } C_{\text{superf}} > 1,0 \quad \text{utilize } C_{\text{superf}} = 1,0$$

Fonte: Shigley e Mischke, *Mechanical Engineering Design*, 5th ed., McGraw-Hill, New York, 1989, p. 283, com permissão.

Acabamento superficial	MPa		kpsi	
	A	b	A	b
Retificado	1,58	-0,085	1,34	-0,085
Usinado ou estirado a frio	4,51	-0,265	2,7	-0,265
Laminado a quente	57,7	-0,718	14,4	-0,718
Forjado	272	-0,995	39,9	-0,995



1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--	--

❖ efeito da temperatura

Corpo de prova $\Rightarrow$ temperatura ambiente

p/ aços:

$$T \leq 450^{\circ}\text{C} (840^{\circ}\text{F}) \quad C_{temp} = 1$$

$$450^{\circ}\text{C} < T \leq 550^{\circ}\text{C} \quad C_{temp} = 1 - 0,0058(T - 450)$$

$$840^{\circ}\text{F} \leq T \leq 1020^{\circ}\text{F} \quad C_{temp} = 1 - 0,0032(T - 840)$$



1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--	--

❖ efeito de confiabilidade

Limite de fadiga para confiabilidade de 70% significa:
valor do limite de fadiga para o qual 70% dos corpos de prova
tiveram vida infinita

Fatores de confiabilidade para
 $S_d = 0,08\mu$

Confiabilidade % C_{conf}

50	1,000
90	0,897
99	0,814
99,9	0,753
99,99	0,702
99,999	0,659



PERGUNTAS?





1. Introdução ❖ História	2. Mecanismos de Falha por Fadiga	3. Modelos de Falha por Fadiga	4. Cargas de fadiga	5. Critérios de Medição da Falha por Fadiga	6. Critérios para estimar a falha por fadiga
-----------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--	--

Exercício:

Encontre o limite de fadiga para uma confiabilidade de 99% de uma barra cilíndrica de diâmetro 25 mm de aço encruado e recozido que possui $S_{ut} = 600$ MPa. A barra é para rotação e tem acabamento usinado.

Se precisar: $1\text{MPa} = 0,145038$ kpsi (“kilopounds per square inch”)