UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS E DE PETRÓLEO
PMR2372 – INTRODUÇÃO AOS ELEMENTOS DE MÁQUINAS
1ª PROVA – 16/03/2016
PROF. RONALDO CARRION

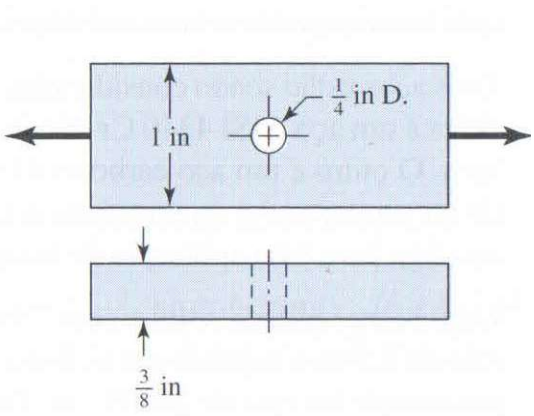
Nome: _____ **N° USP:** _____

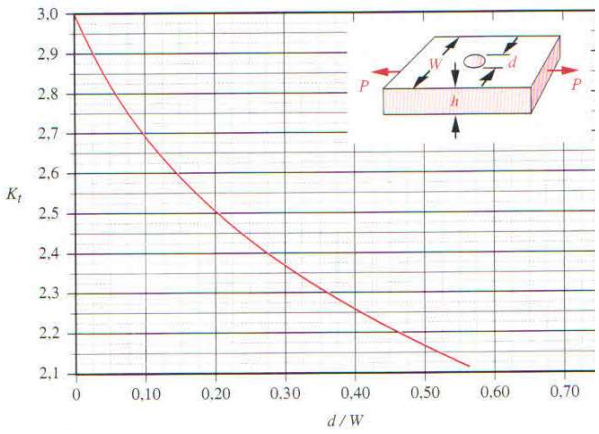
Duração da Prova: 60 min.

Questão única (10,0 pontos) - A barra de aço AISI 1018 repuxado a frio (S_y = 54 kpsi e S_{ut} = 64 kpsi) mostrada na figura é submetida a uma carga de tração flutuante entre 800 e 3000 lbf. Estime os fatores de segurança utilizando o critério de Goodman modificado e de Gerber. Qual dos dois critérios é mais conservador? Justifique sua resposta.

Informações adicionais:
lbf, in e psi pertencem ao mesmo sistema de unidades

S_y = 54 kpsi = 370 MPa e S_{ut} = 64 kpsi = 440 MPa





Bom trabalho!

Formulário:

Tensões

$$\sigma_{xx} = \frac{N_x(x)}{A(x)}$$ Tensão normal devido à força normal

$$\sigma_{xy} = \frac{M_x(x)\ r}{J_p}$$ Tensão de cisalhamento devido ao momento torsor

$$\sigma_{xx} = -\frac{M_z(x)\ y}{I_{zz}}$$ Tensão normal devido ao momento fletor

$$\sigma_{xy} = -\frac{V_y(x)\ Q_{zp}(y)}{I_{zz}\ b(y)}$$ Tensão de cisalhamento devido à força cortante

Critérios de falha por fadiga para tensões uniaxiais variadas

Goodman modificado

$$\sigma_a = S_n\left(1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}}\right)$$

Gerber

$$\sigma_a = S_n\left(1 - \frac{\sigma_m^{\ 2}}{S_{ut}^{\ 2}}\right)$$

Fadiga dos Materiais

Para o diagrama *S-N*

$$S_n = a\,N^b \quad \text{com} \quad b = \frac{1}{\log N_1 - \log N_2}\log\frac{S_m}{S_e}$$

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

$$S_m = 0{,}9\,S_{ut} \Rightarrow \textit{flexão}$$
$$S_m = 0{,}75\,S_{ut} \Rightarrow \textit{força normal}$$

$N_1 = 10^3$ ciclos $N_2 = 10^6$ ciclos

Fatores de Correção

p/ aços:

$$S_{e'} \cong 0{,}5\ S_{ut} \qquad S_{ut} < 1400\ MPa$$
$$S_{e'} \cong 700\,MPa \qquad S_{ut} \geq 1400\ MPa$$

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

- Efeito do carregamento

Flexão alternada: $C_{carreg} = 1$
Força normal alternada: $C_{carreg} = 0,7$
Torção alternada: $C_{carreg} = 1$

- Efeito do tamanho

Para peças cilíndricas

$d \le 0,3\,in\,(8mm)$ $\quad C_{tamanho} = 1$
$0,3\,in \le d \le 10\,in$ $\quad C_{tamanho} = 0,869\,d^{-0,097}$ (em in)
$8\,mm \le d \le 250\,mm$ $\quad C_{tamanho} = 1,189\,d^{-0,097}$ (em mm)
$d \ge 10\,in$ $\quad C_{tamanho} = 0,6$

* Somente esforço axial $C_{tamanho} = 1$
As falhas não são sensíveis ao tamanho

- Efeito da superfície

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

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

	MPa		kpsi	
Acabamento superficial	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

- Efeito da temperatura

p/ aços:
$T \le 450°C\,(840°F)$ $\quad C_{temp} = 1$
$450°C < T \le 550°C$ $\quad C_{temp} = 1 - 0,0058\,(T - 450)$
$840°F \le T \le 1020°F$ $\quad C_{temp} = 1 - 0,0032\,(T - 840)$

- Efeito de confiabilidade

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

Concentração de Tensão

$$\sigma = K_f \, \sigma_{nom}$$
$$\tau = K_{fs} \, \tau_{nom}$$

$$K_f = 1 + q\left(K_t - 1\right) \qquad \text{com} \qquad q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}}$$

Constante de Neuber para aços

S_{ut} (ksi)	$\sqrt{a}$ ($in^{0,5}$)
50	0,130
55	0,118
60	0,108
70	0,093
80	0,080
90	0,070
100	0,062
110	0,055
120	0,049
130	0,044
140	0,039
160	0,031
180	0,024
200	0,018
220	0,013
240	0,009

Material dúctil (Dowling, 1993): define-se K_{fm} - fator de concentração de tensão relativo à tensão média em fadiga

1ª Possibilidade $\sigma_{máx} < S_y$ $\qquad K_{fm} = K_f$

2ª Possibilidade $\sigma_{máx} > S_y$ e $|\sigma_{mín}| < S_y$ $\qquad K_{fm} = \dfrac{S_y - K_f \sigma_{a_{nom}}}{\left|\sigma_{m_{nom}}\right|}$

3ª Possibilidade $\Delta\sigma_{máx} > 2S_y$ $\qquad K_{fm} = 0$

INTRODUÇÃO AOS ELEMENTOS DE MÁQUINAS

Resolução Primeira Prova – 2016/1

Questão Única:

1) Dados do problema:

$$Aço\ AISI\ 1018:$$

$$S_{ut} = 64\ kpsi = 440\ MPa$$

$$S_y = 54\ kpsi = 370\ MPa$$

$$Forças\ atuantes:$$

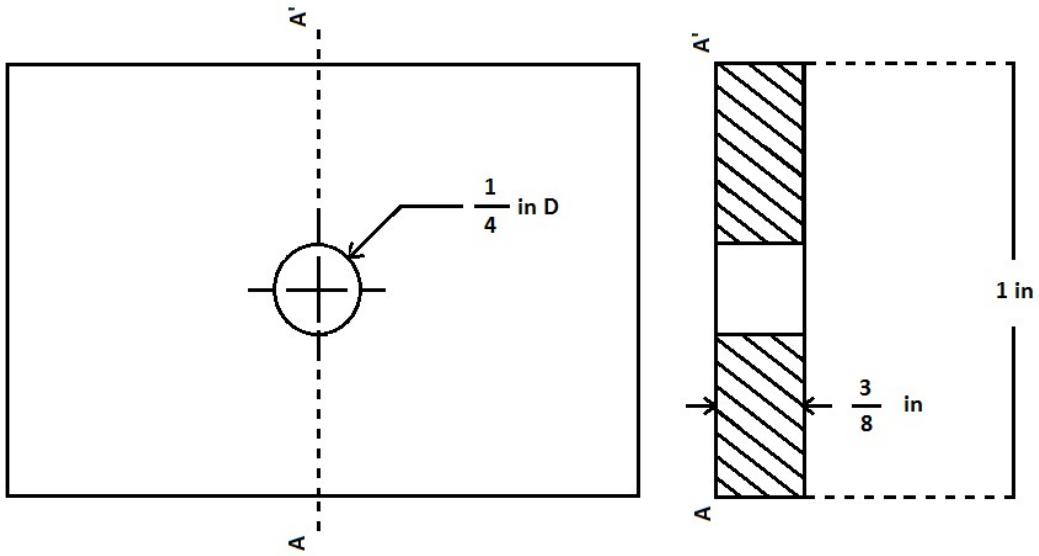
$$F_{mín} = 800\ lbf\ ; F_{máx} = 3000\ lbf$$

2) Tensões atuantes:

$$Tensão\ Nominal = \sigma = \frac{F}{A}$$

$$\sigma_{mín} = \frac{F_{mín}}{A}\ ; \sigma_{máx} = \frac{F_{máx}}{A}$$

Mas que área é utilizada? Para manter a abordagem conservadora, utilizaremos a área na seção crítica, representada por A-A':



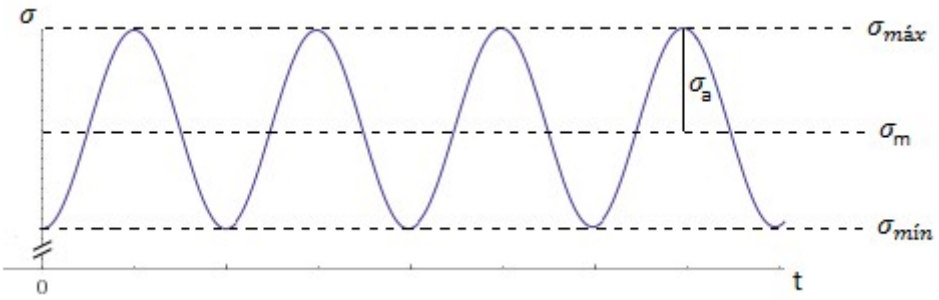
Portanto:

$$A = \frac{3}{8} \times \left(1 - \frac{1}{4}\right) = \frac{3}{8} \times \frac{3}{4} = \frac{9}{32}\ in^2$$

$$\sigma_{mín} = \frac{800}{\frac{9}{32}} = 2844{,}4\ psi$$

$$\sigma_{máx} = \frac{3000}{\frac{9}{32}} = 10666{,}7\ psi$$

O comportamento da tensão nominal nesta barra de aço, em relação ao tempo, pode ser descrito através do gráfico a seguir:



Repare que a oscilação pode ser caracterizada por uma tensão média e uma tensão alternada (σ_m e σ_a). Para utilizarmos os critérios de Goodman Modificado e Gerber, é necessário calcular estes termos. Através das relações das tensões no gráfico:

$$\sigma_m^{nom} = \frac{\sigma_{máx} + \sigma_{mín}}{2} = \frac{10666{,}7 + 2844{,}4}{2} = \mathbf{6755{,}5\ psi}$$

$$\sigma_a^{nom} = \frac{\sigma_{máx} - \sigma_{mín}}{2} = \frac{10666{,}7 - 2844{,}4}{2} = \mathbf{3911{,}1\ psi}$$

Guardaremos estes valores nominais para quando aplicarmos os critérios.

3) <u>Limite de Fadiga da Peça</u>

$$S_{ut} = 64\ kpsi\ (< 1400\ MPa)$$

$$S_e' = Limite\ de\ fadiga\ do\ corpo\ de\ prova\ para\ aços = \frac{S_{ut}}{2} = 32\ kpsi$$

Para calcularmos o Limite de Fadiga da peça, precisamos aplicar a correção a seguir:

$$Se = C_{carreg} C_{tam} C_{superf} C_{temp} C_{conf} \times S_e'$$

Temos força normal alternada, portanto:

$$C_{carreg} = 0{,}7$$

Temos esforço axial, então:

$$C_{tam} = 1{,}0$$

Nada é comentado sobre confiabilidade e temperatura, portanto:

$$C_{conf} = 1{,}0\ ;\ C_{temp} = 1{,}0$$

É mencionado no exercício que a peça é “repuxada a frio”. Trataremos isso como acabamento “usinado ou estirado a frio”. Então:

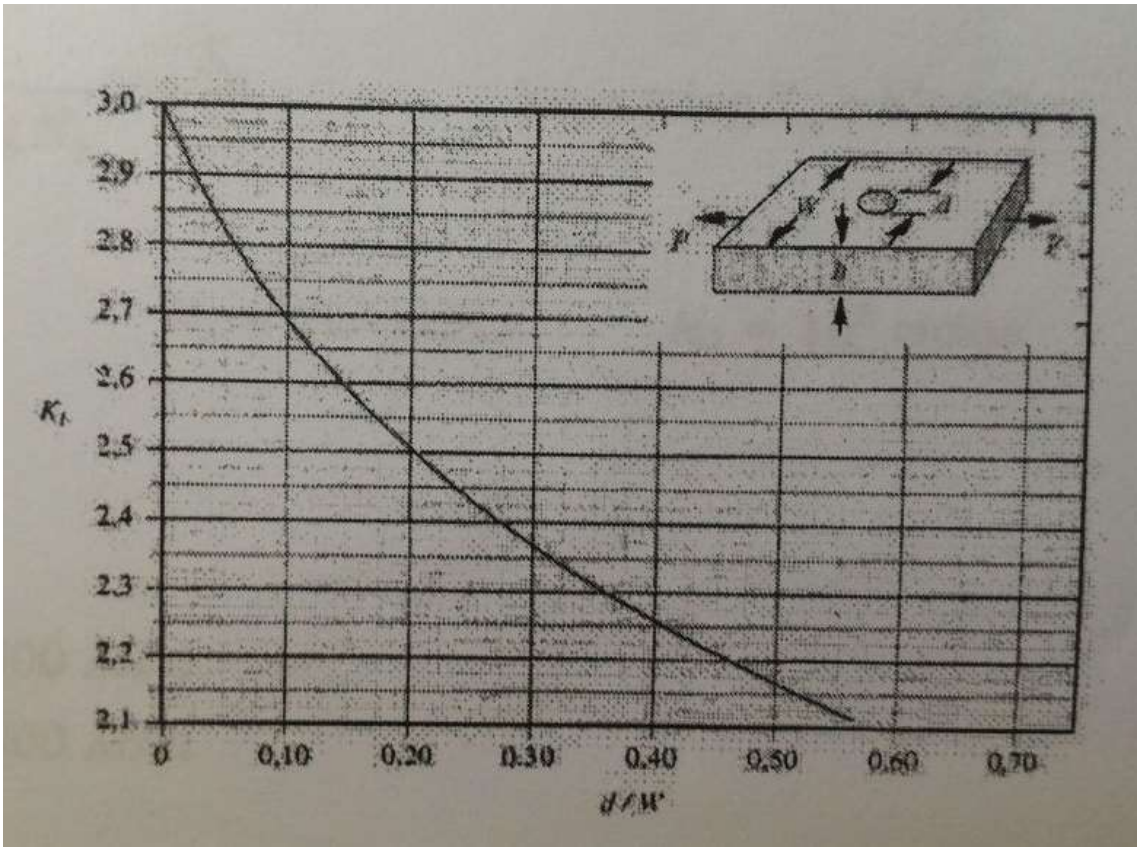
$$C_{superf} = 2{,}7 \times S_{ut}^{-0{,}265} = 2{,}7 \times (64)^{-0{,}265} = 0{,}90$$

Finalmente, podemos calcular uma estimativa do Limite de Fadiga da Peça:

$$Se = 0{,}7 \times 0{,}9 \times 32 = \mathbf{20{,}1\ kpsi}$$

4) <u>Fator de Concentração de Tensão em Fadiga</u>

Este fator ajuda a estimar o aumento de tensão em regiões de descontinuidades, entalhes, deformações, e demais mudanças.



Utilizando a referência acima, é possível calcular um valor de Fator de Concentração de Tensão ESTÁTICO.

$$d = \frac{1}{4}\ in; W = 1\ in$$

$$\frac{d}{W} = 0{,}25 \rightarrow através\ do\ gráfico \rightarrow K_t = 2{,}43$$

Lembrando que t subscrito significa estático. A letra f subscrita significa em fadiga, que é o que buscamos nesta etapa.

Constante de Neuber para aços

S_u (ksi)	$\sqrt{a}$ ($in^{0,5}$)
50	0,130
55	0,118
60	0,108
70	0,093
80	0,080
90	0,070
100	0,062
110	0,055
120	0,049
130	0,044
140	0,039
160	0,031
180	0,024
200	0,018
220	0,013
240	0,009

Através da tabela ao lado, iniciamos o passo a passo para transformar K_t em K_f.

$$S_{ut} = 64\ kpsi$$

Interpolando entre 60 e 70 kpsi:

$$\sqrt{a} = 0{,}102\ \sqrt{in}$$

Além disto,

$$\sqrt{r} = \sqrt{\frac{d}{2}} = \sqrt{\frac{1}{8}} = 0{,}35\ \sqrt{in}$$

Agora podemos calcular o valor de q:

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}} = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{0{,}102}}{\sqrt{0{,}35}}} = 0{,}78$$

Finalmente, aplica-se os valores de q e K_t para calcularmos o fator de concentração de tensão em fadiga:

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) = 1 + 0{,}78 \times (2{,}43 - 1) = \mathbf{2{,}09}$$

Lembrando que, em teoria, esse valor valeria apenas para a tensão alternada (σ_a). Entretanto, assumiremos que o valor de K_{fm} (que vale para σ_m) também é 2,09.

5) <u>Critério de Goodman Modificado</u>

$$\sigma_a = S_n\left(1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}}\right), sendo\ \sigma_a = K_f\sigma_a^{nom}\ e\ \sigma_m = K_{fm}\sigma_m^{nom}$$

$$\sigma_a = 2{,}09 \times 3911{,}1 = 8174{,}2\ psi$$

$$\sigma_m = 2{,}09 \times 6755{,}5 = 14119{,}1\ psi$$

$$S_n = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}}} = \frac{8174{,}2}{1 - \frac{14119{,}1}{64000}} = 10488\ psi$$

Se S_n é menor que o Limite de Fadiga da Peça, conclui-se que temos "vida infinita". O coeficiente de segurança é calculado através da expressão a seguir:

$$N_f(Goodman\ Modificado) = \frac{S_e}{S_n} = \frac{20100}{10488} = \mathbf{1,9}$$

6) Critério de Gerber

$$\sigma_a = S_n\left(1 - \frac{\sigma_m^2}{S_{ut}^2}\right) \rightarrow S_n = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_m^2}{S_{ut}^2}\right)} = \frac{8174{,}2}{\left(1 - \frac{14119{,}1^2}{64000^2}\right)} = 8592{,}4\ psi$$

Calculando o coeficiente de segurança:

$$N_f(Gerber) = \frac{S_e}{S_n} = \frac{20100}{8592{,}4} = \mathbf{2,4}$$

Conclusão: Com coeficiente de segurança menor, o Critério de Goodman Modificado se apresenta como mais conservador entre os dois.