



Introdução aos Elementos de Máquinas

PMR3320

Aula 3

Fadiga dos Materiais



1. Entalhes e Concentração de Tensões

2. Tensões Média e Alternada Combinadas

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

1. Entalhes e Concentração de Tensões

Entalhes \Rightarrow furo, ranhura, chanfro, mudança abrupta na seção



Causam concentração de tensões

Carregamento estático \Rightarrow em materiais dúcteis, o escoamento localizado alivia as tensões

Carregamento cíclico \Rightarrow materiais dúcteis se comportam como se fossem frágeis em falhas por fadiga



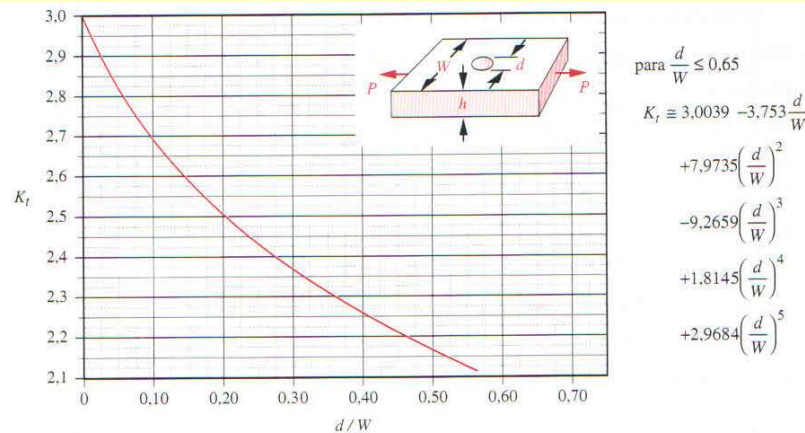
1. Entalhes e Concentração de Tensões

2. Tensões Média e Alternada Combinadas

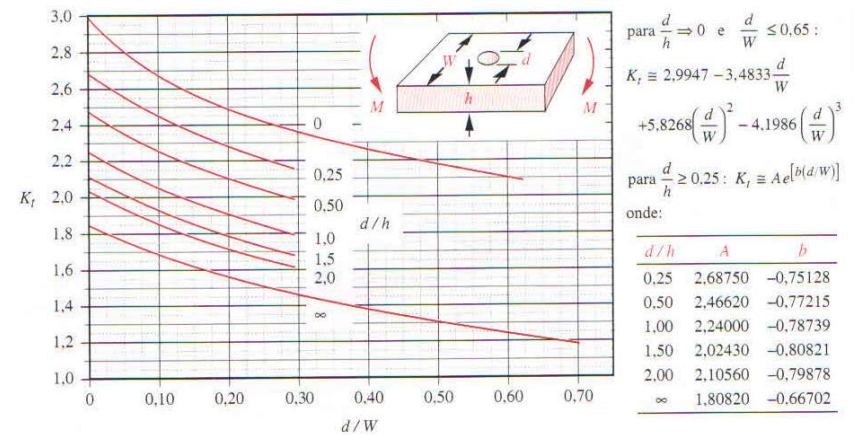
- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

Definindo

Fator de concentração de tensão (K_t) \Rightarrow fornece uma identificação do grau de concentração de tensão em um entalhe



Fator geométrico de concentração de tensão K_t para uma barra plana com orifício transversal em tração axial.



Fator geométrico de concentração de tensão K_t para uma barra plana com orifício transversal em flexão.

**1. Entalhes e Concentração de Tensões****2. Tensões Média e Alternada Combinadas**

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

Voltando

É necessário **mudar K_t para cargas dinâmicas**: define-se o **fator de concentração de tensão em fadiga K_f**

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1}$$

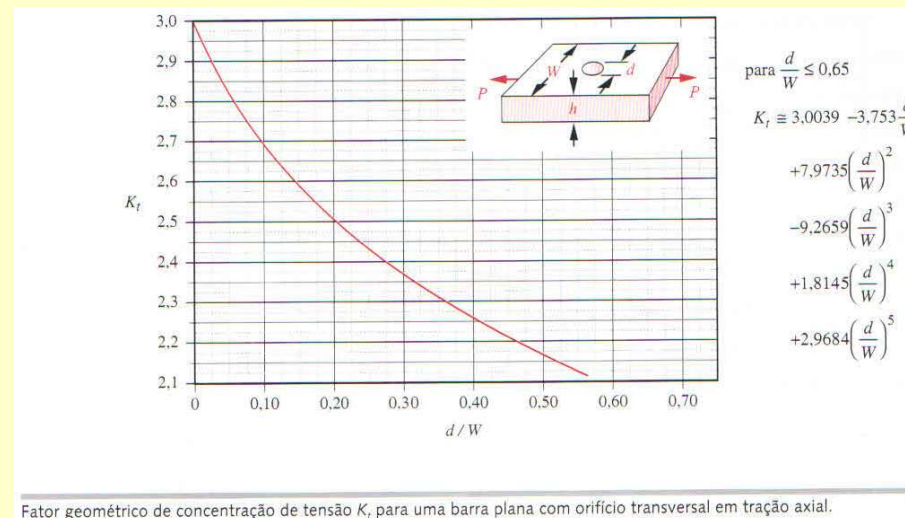
$$K_f = 1 + q(K_t - 1)$$

**1. Entalhes e Concentração de Tensões****2. Tensões Média e Alternada Combinadas**

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

Procedimento

- determinar K_t (fator de concentração de tensão estático) \Rightarrow tabelas



$$K_f = 1 + q(K_t - 1)$$

**1. Entalhes e Concentração de Tensões****2. Tensões Média e Alternada Combinadas**

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

- determinar q (fator de sensibilidade ao entalhe)

Constante de Neuber para aços

S_{ur} (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

Constante de Neuber para alumínio recozido

S_{ur} (kpsi)	\sqrt{a} (in ^{0,5})
10	0,500
15	0,341
20	0,264
25	0,217
30	0,180
35	0,152
40	0,126
45	0,111

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}}$$

onde: a = constante de Neuber (Tabela)
 r = raio do entalhe

$$K_f = 1 + q(K_t - 1)$$

**1. Entalhes e Concentração de Tensões****2. Tensões Média e Alternada Combinadas**

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

- determinar K_f (fator de concentração de tensão em fadiga)

$$K_f = 1 + q(K_t - 1)$$

Desta forma, no ponto de concentração de tensão, a mesma pode ser calculada como:

$$\sigma = K_f \sigma_{nom}$$

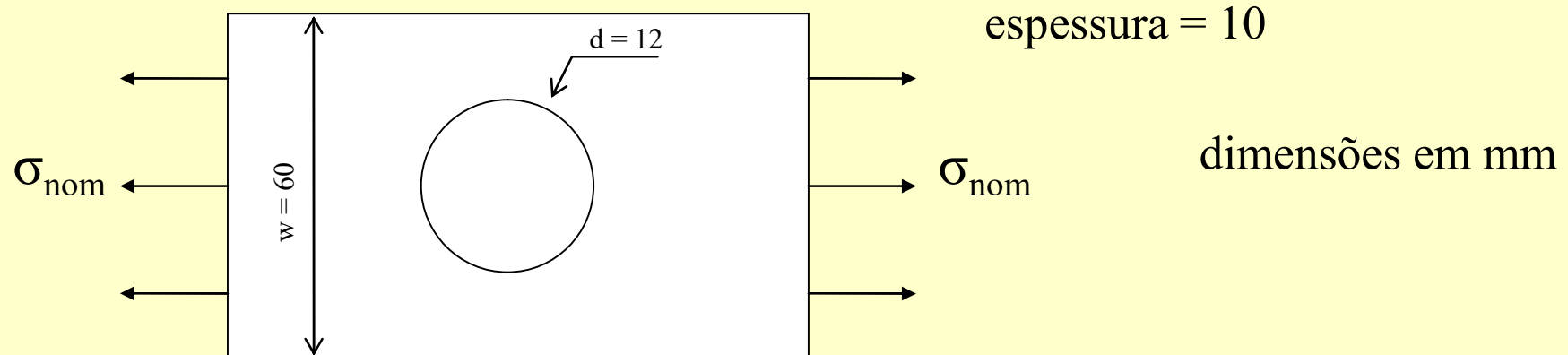
$$\tau = K_{fs} \tau_{nom}$$

nada foi dito, ainda, sobre K_{fs}

**1. Entalhes e Concentração de Tensões****2. Tensões Média e Alternada Combinadas**

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

Exercício 1: Uma parte de um componente de máquina é mostrada na figura. Ela é carregada por uma força axial (alternada simétrica) que é uniformemente distribuída na seção. O material é um aço BS 070M20 ($S_{ut} = 430$ MPa e $S_y = 225,5$ MPa) trabalhado a frio. Para uma confiabilidade de 90% e vida infinita, determinar a força F que pode ser aplicada.



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

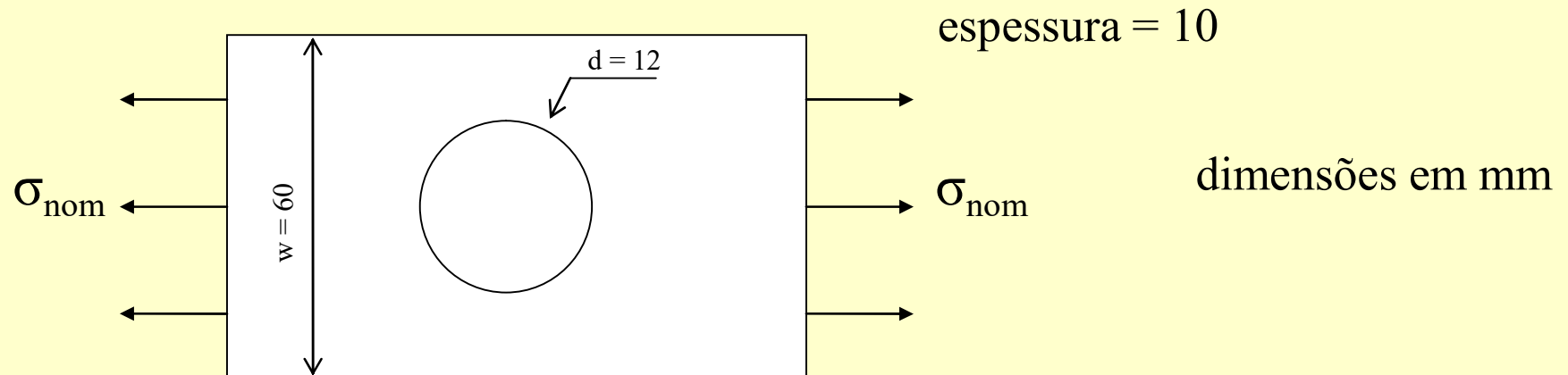


1. Entalhes e Concentração de Tensões

2. Tensões Média e Alternada Combinadas

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

Exercício 1a: Refaça o exercício anterior para uma vida finita ($N = 10^5$ ciclos)

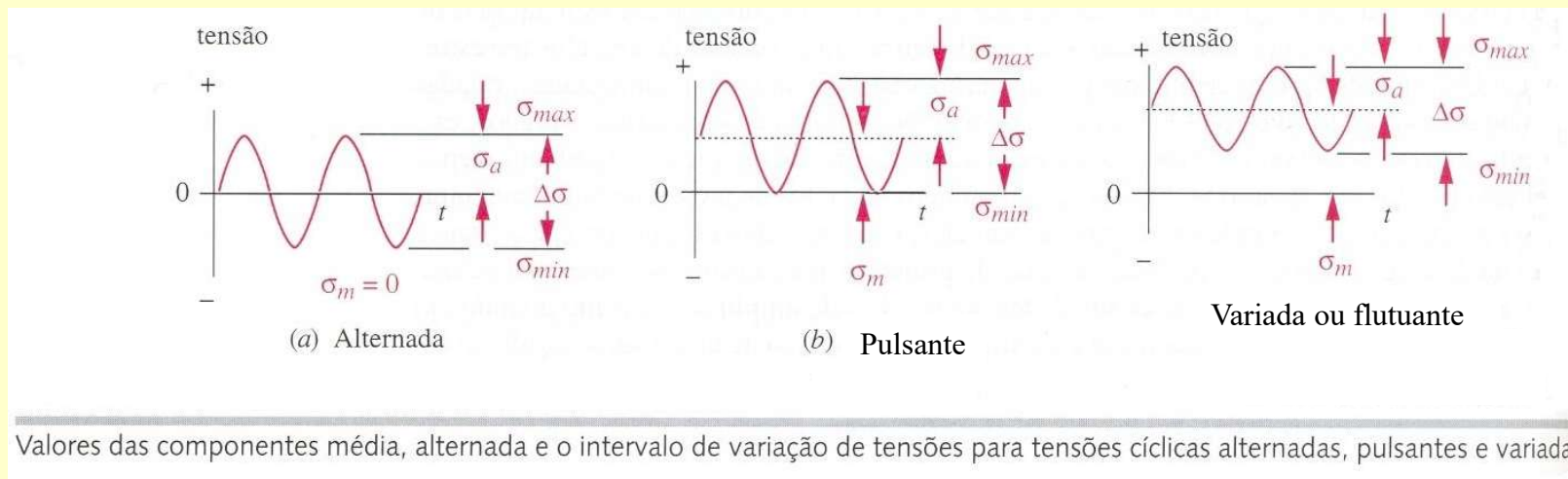


**1. Entalhes e Concentração de Tensões****2. Tensões Média e Alternada Combinadas**

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

2. Tensões Média e Alternada Combinadas

Se uma componente de **tensão média** (σ_m) de tração é **somada** à **componente alternada** (σ_a), o material falha com tensões alternadas (σ_a) inferiores às que ocorreriam sob um carregamento puramente alternado



**1. Entalhes e Concentração de Tensões****2. Tensões Média e Alternada Combinadas**

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

Projeto para Fadiga de Alto Ciclo

	Tensões alternadas ($\sigma_m = 0$)	Tensões variadas ($\sigma_m \neq 0$)
Tensões uniaxiais	Categoria I	Categoria II
Tensões multiaxiais	Categoria III	Categoria IV

Categoria I - Projeto para tensões uniaxiais alternadas

Comentário na lousa \Rightarrow “revisão”

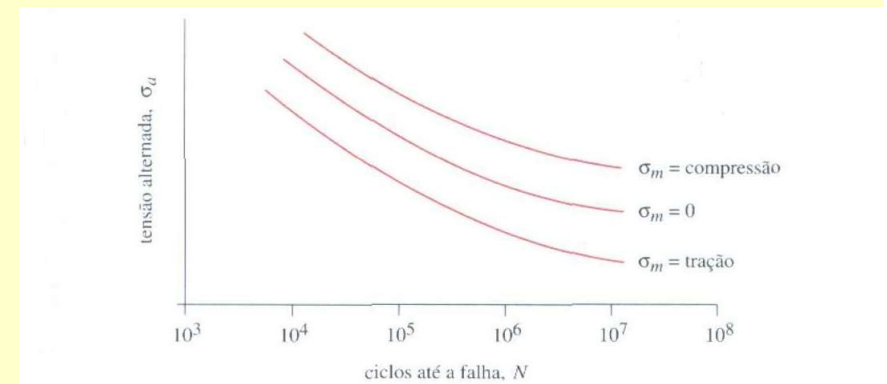
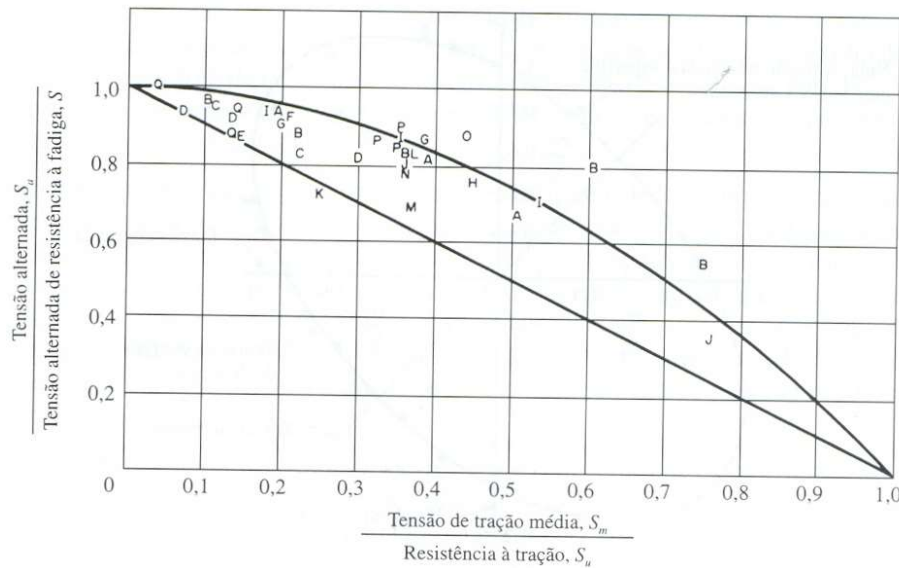


1. Entalhes e Concentração de Tensões

2. Tensões Média e Alternada Combinadas

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

Categoria II - Projeto para tensões uniaxiais variadas



Efeito da tensão média na vida de fadiga. (Extraído de Fuchs e Stephens, *Metal Fatigue in Engineering*, New York, 1980, reimpresso com permissão da John Wiley & Sons, Inc.)

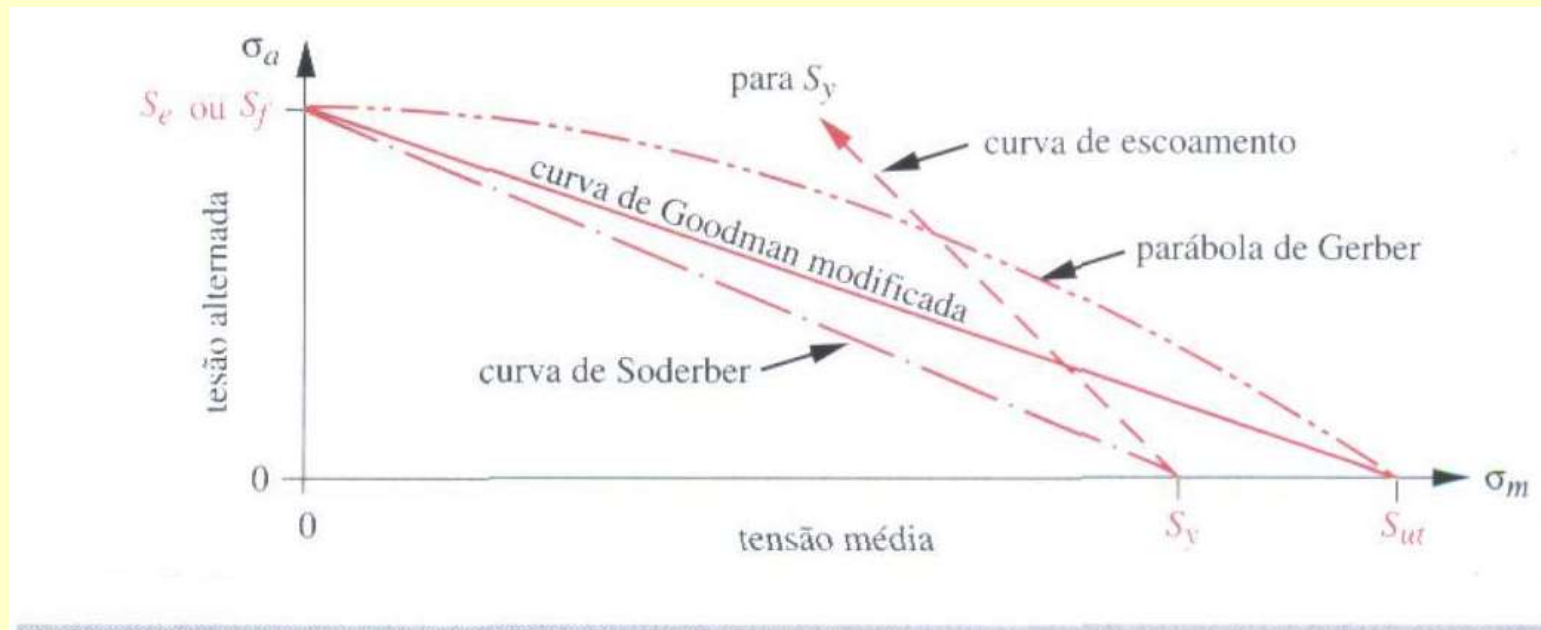
Curva de Gerber (Parábola) e Curva de Goodman (reta) para aços



1. Entalhes e Concentração de Tensões

2. Tensões Média e Alternada Combinadas

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV



Diversas curvas de falha para tensões pulsantes.

Curva de Gerber : ajusta-se melhor aos dados experimentais de falha

Curva de **Goodman** : ajusta-se **abaixo da dispersão de dados**

**1. Entalhes e Concentração de Tensões****2. Tensões Média e Alternada Combinadas**

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

As curvas de falha são definidas por:

Parábola de Gerber

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

$n = e =$ vida infinita
 $n = f =$ vida finita

Curva de Goodman modificada

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



Mais conservador e mais **usado** no projeto de peças sujeitas a **tensões médias em adição às alternadas**



1. Entalhes e Concentração de Tensões

2. Tensões Média e Alternada Combinadas

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

Apenas para comentar

Curva de Soderberg

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

**1. Entalhes e Concentração de Tensões****2. Tensões Média e Alternada Combinadas**

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

Aplicação dos efeitos de concentração de tensão às tensões variadas

Componente de **tensão alternada**

$$\sigma_a = K_f \sigma_{a_{nom}}$$

(como antes, acrescido do subscrito ***a***)

**1. Entalhes e Concentração de Tensões****2. Tensões Média e Alternada Combinadas**

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

Componente de *tensão média*

Material *frágil*: o valor total de K_t é aplicado à tensão média nominal

$$\sigma_m = K_t \sigma_{m_{nom}}$$

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

Relação entre $\sigma_{máx}$ e S_y

$$\sigma_m = K_{fm} \sigma_{m_{nom}}$$

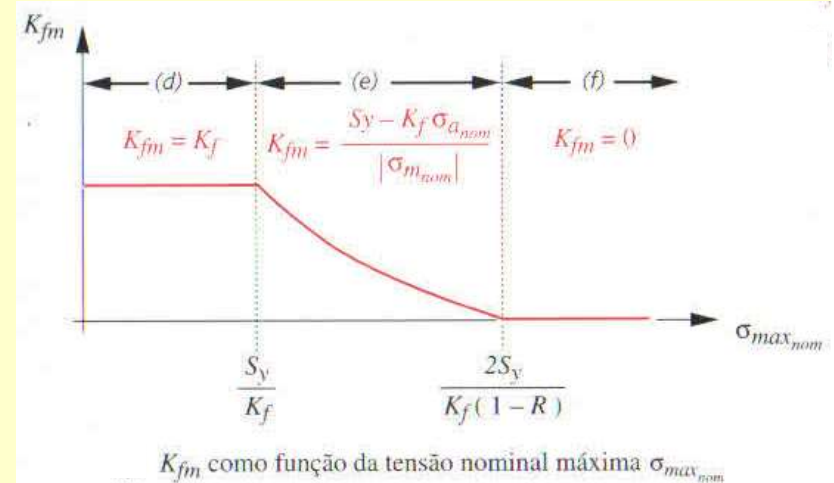
**1. Entalhes e Concentração de Tensões****2. Tensões Média e Alternada Combinadas**

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

❑ 1ª Possibilidade $\sigma_{m\acute{a}x} < S_y \Rightarrow K_{fm} = K_f$

❑ 2ª Possibilidade $\sigma_{m\acute{a}x} > S_y$ e $|\sigma_{m\acute{i}n}| < S_y \Rightarrow K_{fm} = \frac{S_y - K_f \sigma_{a_{nom}}}{|\sigma_{m_{nom}}|}$

❑ 3ª Possibilidade $\Delta\sigma_{m\acute{a}x} > 2S_y \Rightarrow K_{fm} = 0$



**1. Entalhes e Concentração de Tensões****2. Tensões Média e Alternada Combinadas**

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

Exercício 2

Utilizando o critério de falha de Goodman, determine o número de ciclos para falha quando aplicada uma carga de $\sigma_a = 50$ kpsi e $\sigma_m = 60$ kpsi. São dados:

$S_e = 60$ kpsi – limite de fadiga alternada simétrica (10^6 ciclos)

$S_{ut} = 150$ kpsi – limite de ruptura à tração

$S_y = 100$ kpsi – limite de escoamento

$S_m = 110$ kpsi – resistência à fadiga para 10^3 ciclos

**1. Entalhes e Concentração de Tensões****2. Tensões Média e Alternada Combinadas**

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

Exercício 3 – p/ o lar

A figura da lousa mostra uma mola formada por um arame torcido sujeito à uma força variável. O material do arame é um aço com $S_{ut} = 1410$ MPa e $S_y = 1200$ MPa. Não há concentração de tensão devido aos detalhes de forma e uma inspeção visual indica que o acabamento superficial corresponde ao laminado a quente. Baseado numa confiabilidade de 50% e assumindo que a seção crítica ocorre no final do comprimento útil da mola, encontre o número de ciclos de carga aplicada que possivelmente causará falha.

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

**1. Entalhes e Concentração de Tensões****2. Tensões Média e Alternada Combinadas**

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

	Tensões alternadas ($\sigma_m = 0$)	Tensões variadas ($\sigma_m \neq 0$)
Tensões uniaxiais	Categoria I	Categoria II
Tensões multiaxiais	Categoria III	Categoria IV

No caso de tensões **combinadas** sob **esforços estáticos**, foi utilizada a tensão equivalente de **von Mises** para converter essas tensões em uma tensão de tração equivalente. Existem **técnicas similares** para lidar com tensões **combinadas** em **carregamento dinâmico**.



1. Entalhes e Concentração de Tensões

2. Tensões Média e Alternada Combinadas

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

Categoria III - Projeto para tensões multiaxiais alternadas

Dados experimentais \Rightarrow para tensões multiaxiais simples em materiais dúcteis, a teoria da energia de distorção é aplicável

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{1a}^2 + \sigma_{2a}^2 + \sigma_{3a}^2 - \sigma_{1a}\sigma_{2a} - \sigma_{1a}\sigma_{3a} - \sigma_{2a}\sigma_{3a}} \quad 3D$$

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{1a}^2 + \sigma_{2a}^2 - \sigma_{1a}\sigma_{2a}} \quad 2D$$

$$N_f = \frac{S_n}{\sigma'_a}$$

Coeficiente de segurança

**1. Entalhes e Concentração de Tensões****2. Tensões Média e Alternada Combinadas**

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

	Tensões alternadas ($\sigma_m = 0$)	Tensões variadas ($\sigma_m \neq 0$)
Tensões uniaxiais	Categoria I	Categoria II
Tensões multiaxiais	Categoria III	Categoria IV

Categoria IV - Projeto para tensões multiaxiais variadas

- Método de Sines
- **Método de von Mises**

**1. Entalhes e Concentração de Tensões****2. Tensões Média e Alternada Combinadas**

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

Método de von Mises

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{xxa}^2 + \sigma_{yya}^2 - \sigma_{xxa} \sigma_{yya} + 3\tau_{xya}^2}$$

2D

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_{xxm}^2 + \sigma_{yym}^2 - \sigma_{xxm} \sigma_{yym} + 3\tau_{xym}^2}$$

**1. Entalhes e Concentração de Tensões****2. Tensões Média e Alternada Combinadas**

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

Método de von Mises

3D

$$\sigma'_a = \sqrt{\frac{(\sigma_{xxa} - \sigma_{yya})^2 + (\sigma_{yya} - \sigma_{z za})^2 + (\sigma_{z za} - \sigma_{xxa})^2 + 6(\tau_{xya}^2 + \tau_{yza}^2 + \tau_{zxa}^2)}{2}}$$

$$\sigma'_m = \sqrt{\frac{(\sigma_{xxm} - \sigma_{yym})^2 + (\sigma_{yym} - \sigma_{zzm})^2 + (\sigma_{zzm} - \sigma_{xxm})^2 + 6(\tau_{xym}^2 + \tau_{yzm}^2 + \tau_{zxm}^2)}{2}}$$

**1. Entalhes e Concentração de Tensões****2. Tensões Média e Alternada Combinadas**

- ❖ Categoria I
- ❖ Categoria II
- ❖ Categoria III
- ❖ Categoria IV

Exercício 4

Uma barra de aço apresenta as propriedades mínimas $S_e = 276$ MPa, $S_y = 413$ MPa e $S_{ut} = 551$ MPa. Ela é submetida a uma tensão torcional fixa de 103 MPa e a uma tensão flexional alternante de 172 MPa. Encontre o fator de segurança para falha por fadiga ou a vida esperada da peça, utilizando:

- critério de Goodman modificado
- critério de Gerber



PERGUNTAS?

