UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

EM608 – Elementos de Máquinas
ES690 – Sistemas Mecânicos

TEORIA DE FALHA DINÂMICA (FADIGA)

Prof. Gregory Bregion Daniel gbdaniel@fem.unicamp.br

Prof.ª Katia Lucchesi Cavalca katia@fem.unicamp.br

Campinas, 2º semestre 2020

TEORIA DE FALHA POR FADIGA

Entalhes e Concentração de Tensão

Entalhe é um termo genérico que se refere a um contorno geométrico, que interrompe o fluxo de forças através do elemento. Pode ser um furo, uma ranhura ou mesmo uma mudança na área de seção.

Fator de sensibilidade ao entalhe (q):

$$q = \frac{\left(K_f - 1\right)}{\left(K_t - 1\right)}$$

No qual:

K_f = fator de concentração de tensão dinâmico (ou em fadiga)

K_t = fator de concentração de tensão geométrico (ou estático)

TEORIA DE FALHA POR FADIGA

Assim, conhecido o fator de concentração geométrico e obtido o fator de sensibilidade ao entalhe *q*, correspondente ao material utilizado, pode-se então estimar o fator dinâmico *Kf* como:

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

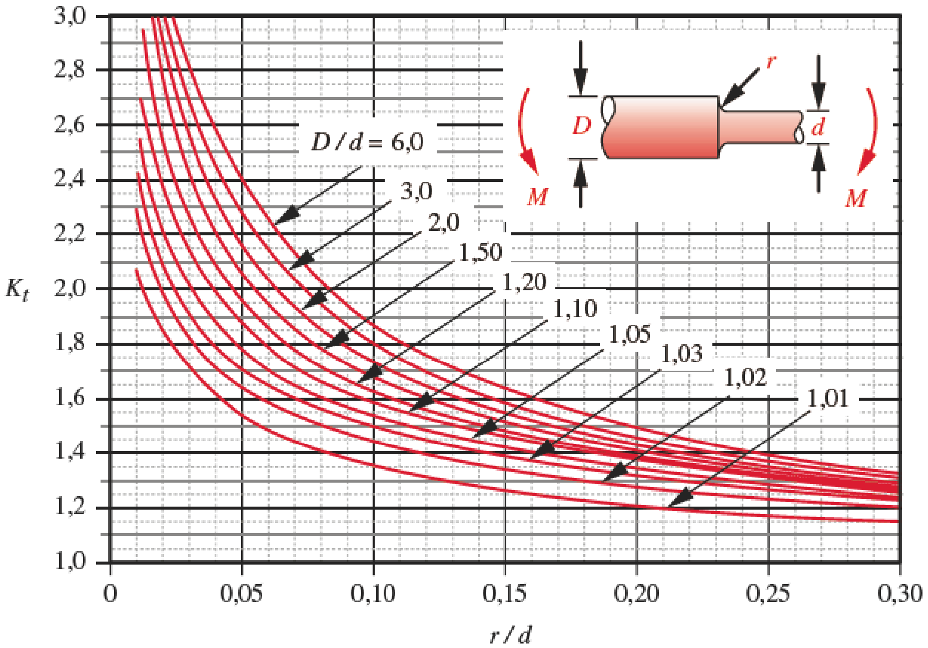
onde $0 \leq q \leq 1$

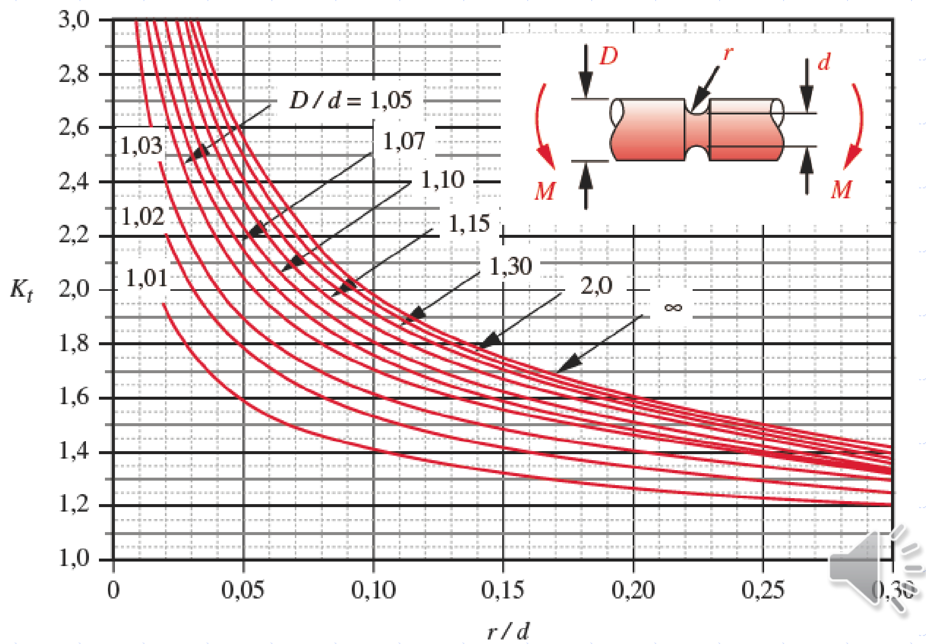
Após determinar o fator de concentração de tensão dinâmico é possível determinar as tensões reais como:

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

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

O fator de concentração geométrico K_t é determinado de acordo com a geometria funcional introduzida no elemento.





TEORIA DE FALHA POR FADIGA

A sensibilidade ao entalhe q pode ser definido pela expressão de Kunn-Hardrath (1952):

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

Onde $\sqrt{a}$ é a constante de Neuber e **r** é o raio de entalhe.

A tabela a seguir mostra os valores da constante $\sqrt{a}$, também conhecida como constantes de Neuber, para aços em função de seu limite de ruptura.

Tabela - Constante de Neuber

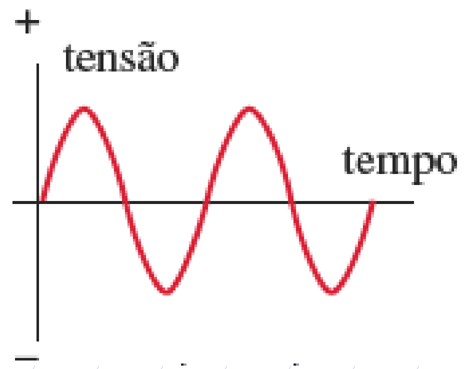
S_{ut} (ksi)	50	55	60	70	80	90	100
$\sqrt{a}$ ($in^{0,5}$)	0,130	0,118	0,108	0,093	0,080	0,070	0,062

S_{ut} (ksi)	110	120	130	140	160	180	200
$\sqrt{a}$ ($in^{0,5}$)	0,055	0,049	0,044	0,039	0,031	0,024	0,018

S_{ut} (ksi)	220	240
$\sqrt{a}$ ($in^{0,5}$)	0,013	0,009

TEORIA DE FALHA POR FADIGA

Projeto para Tensões Alternadas Simétricas ou Completamente Reversas



Recomenda-se o seguinte roteiro para o dimensionamento à fadiga:

1) Determinar o número de ciclos *N* do carregamento cíclico para o qual o elemento deverá ser projetado.

2) Determinar a faixa da carga alternada aplicada, pico a pico.

3) Determinar os fatores de concentração de tensões geométricos (K_t **ou** K_{ts}), tomando como base a geometria do peça e entalhe.

4) Selecionar o material da peça e definir as propriedades do material S_{ut} , S_y , $S_{e'}$ **ou** $S_{f'}$ e q.

5) Determinar os fatores de concentração em fadiga K_f a partir do fator de concentração geométrico K_t e da sensibilidade ao entalhe q.

TEORIA DE FALHA POR FADIGA

Projeto para Tensões Alternadas Simétricas ou Completamente Reversas

6) A partir da análise de tensões deve-se determinar a componente alternada nominal σ_{a_nom} e, através do fator de concentração de tensões em fadiga K_f, obter a componente real σ_a.

7) Determinar as tensões principais alternadas nas localizações críticas, já considerando o efeito de fatores de concentração de tensões.

8) Estimar a Tensão Efetiva de Von Mises nas regiões críticas.

9) Determinar os fatores de correção para a resistência à fadiga ($S_{e'}$ ou $S_{f'}$), a saber: C_{car}, C_{tam}, C_{sup}, C_{tem} e C_{con}.

10) Calcular a resistência à fadiga corrigida para o ciclo de vida *N* esperado. Se a curva *S-N* apresenta o cotovelo que caracteriza o limite de resistência a fadiga para vida infinita, então, $S_f = S_e$.

$$S_f = aN^b$$

$$\log S_f = \log a + b \log N$$

Para materiais sem o limite de resistência para vida infinita, escreve-se a equação da reta da curva *S-N*, em escala log-log.

TEORIA DE FALHA POR FADIGA

Projeto para Tensões Alternadas Simétricas ou Completamente Reversas

Para $N=N_1=10^3$ ciclos, tem-se $S_f=S_m$, que intercepta o eixo das ordenadas.

Para $N=N_2=10^6$ ciclos, tem-se $S_f=S_e$, para materiais com cotovelo em *S-N*.

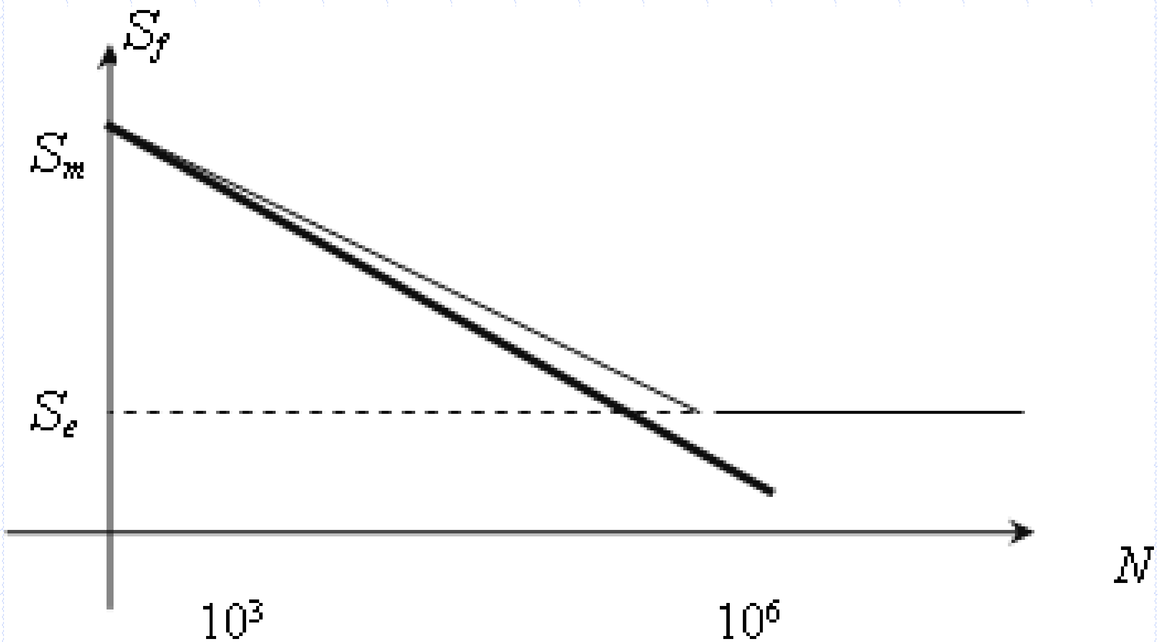


Figura – Curva *S-N* para materiais sem o limite de resistência para vida infinita

TEORIA DE FALHA POR FADIGA

Projeto para Tensões Alternadas Simétricas ou Completamente Reversas

$$S = aN^{-b} \qquad \log(S) = \log(a) - b.\log(N)$$

$$\log a = \log S_e - b \log N_2$$

$$\log a = \log S_m - b \log N_1 = \log S_m - 3b$$

$$b = \frac{\Delta \log S_f}{\Delta \log N} = \frac{\log S_m - \log S_e}{\log N_1 - \log N_2} = \frac{1}{\log N_1 - \log N_2} \log(S_m / S_e)$$

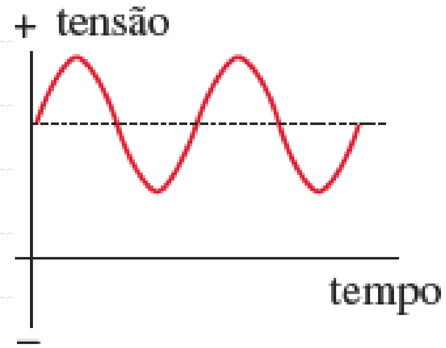
$S_m = 0{,}90 S_{ut}$ para flexão alternada
$S_m = 0{,}75 S_{ut}$ para carga axial alternada

11) Comparar a tensão alternada efetiva de Von Mises com a Resistência à Fadiga corrigida, obtida da curva *S-N*, para o ciclo de vida desejado.

12) Calcular o Fator de Segurança $\boldsymbol{N_f = S_f/\sigma_\alpha}$.

TEORIA DE FALHA POR FADIGA

Projeto para Tensões Alternadas Flutuantes



Recomenda-se o seguinte roteiro para o dimensionamento à fadiga:

1) Determinar o número de ciclos N do carregamento cíclico para o qual o elemento deverá ser projetado.

2) Determinar a faixa da carga alternada aplicada, pico a pico.

3) Determinar os fatores de concentração de tensões geométricos (K_t **ou** K_{ts}), tomando como base a geometria do peça e entalhe.

4) Selecionar o material da peça e definir as propriedades do material S_{ut} , S_y , $S_{e'}$ **ou** $S_{f'}$ e q.

5) Determinar os fatores de concentração em fadiga K_f a partir do fator de concentração geométrico K_t e da sensibilidade ao entalhe q.

TEORIA DE FALHA POR FADIGA

Projeto para Tensões Alternadas Flutuantes

6) A partir da análise de tensões deve-se determinar a componente alternada nominal σ_{a_nom} e a componente media nominal σ_{m_nom}.

7) Aplicando o fator de concentração de tensões em fadiga K_f, obter as componentes alternada σ_a e média σ_m.

8) Para proceder com o passo (7) é necessário definir K_{fm}, ou seja, o fator de concentração de tensão associado à componente média de tensões σ_m.

$$\text{a) Se} \quad K_f \left|\sigma_{max}\right| \leq S_y \text{ , então} \quad K_{fm} = K_f$$

$$\text{b) Se} \quad K_f \left|\sigma_{max}\right| \geq S_y \text{ , então } K_{fm} = \frac{S_y - K_f \sigma_a}{\left|\sigma_m\right|}$$

$$\text{c) Se} \quad K_f \left|\sigma_{max} - \sigma_{min}\right| \geq 2S_y \text{, então} \quad K_{fm} = 0$$

TEORIA DE FALHA POR FADIGA

Projeto para Tensões Alternadas Flutuantes

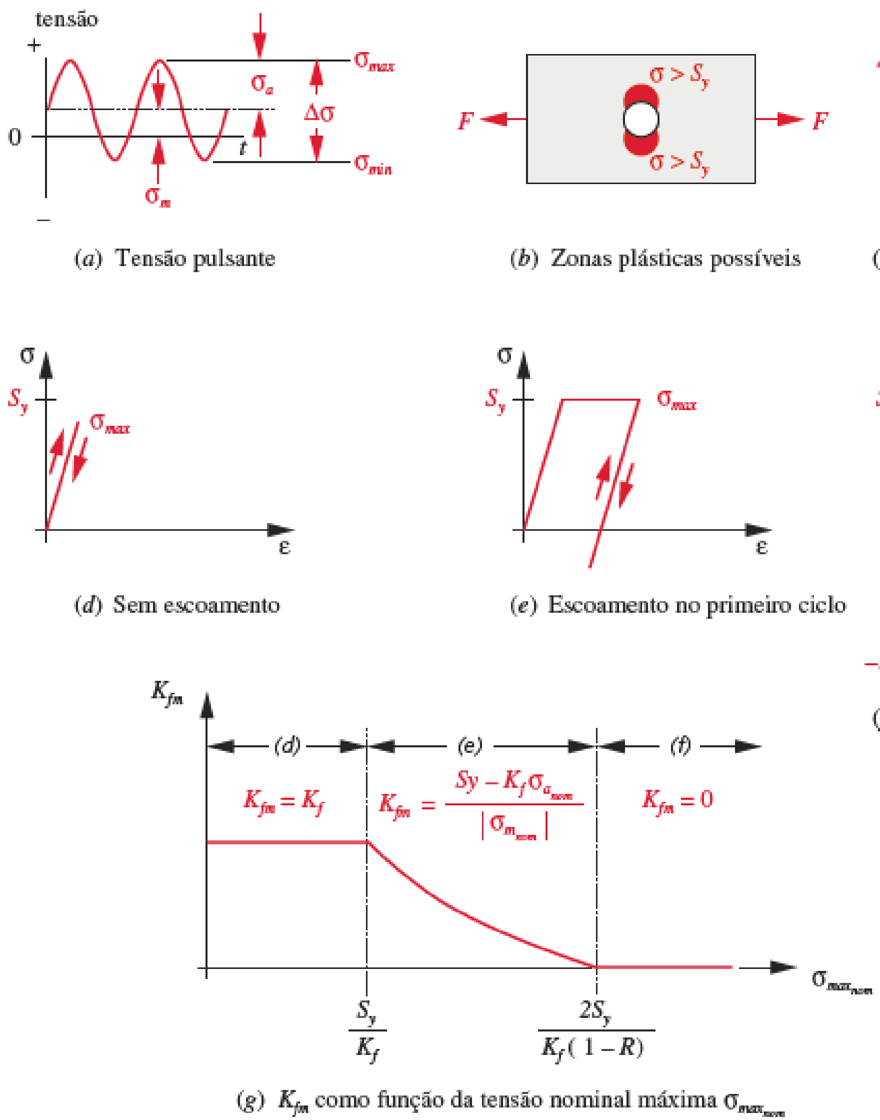


Figura – Fator de Concentração de Tensão Dinâmico para a Componente Média

TEORIA DE FALHA POR FADIGA

Projeto para Tensões Alternadas Flutuantes

9) Estimar a Tensão Efetiva de Von Mises, a partir do estado real de tensões, para as componentes média e alternada

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

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

10) Determinar os fatores de correção para a resistência à fadiga ($S_{e'}$ ou $S_{f'}$), a saber: C_{car}, C_{tam}, C_{sup}, C_{tem} e C_{con}

11) Criar o Diagrama de Goodman Modificado para a resistência a fadiga corrigida (S_e ou S_f), utilizando como limite do material, a resistência máxima à tração S_{ut}, e a correção pela curva de escoamento (S_y).

TEORIA DE FALHA POR FADIGA

Projeto para Tensões Alternadas Flutuantes

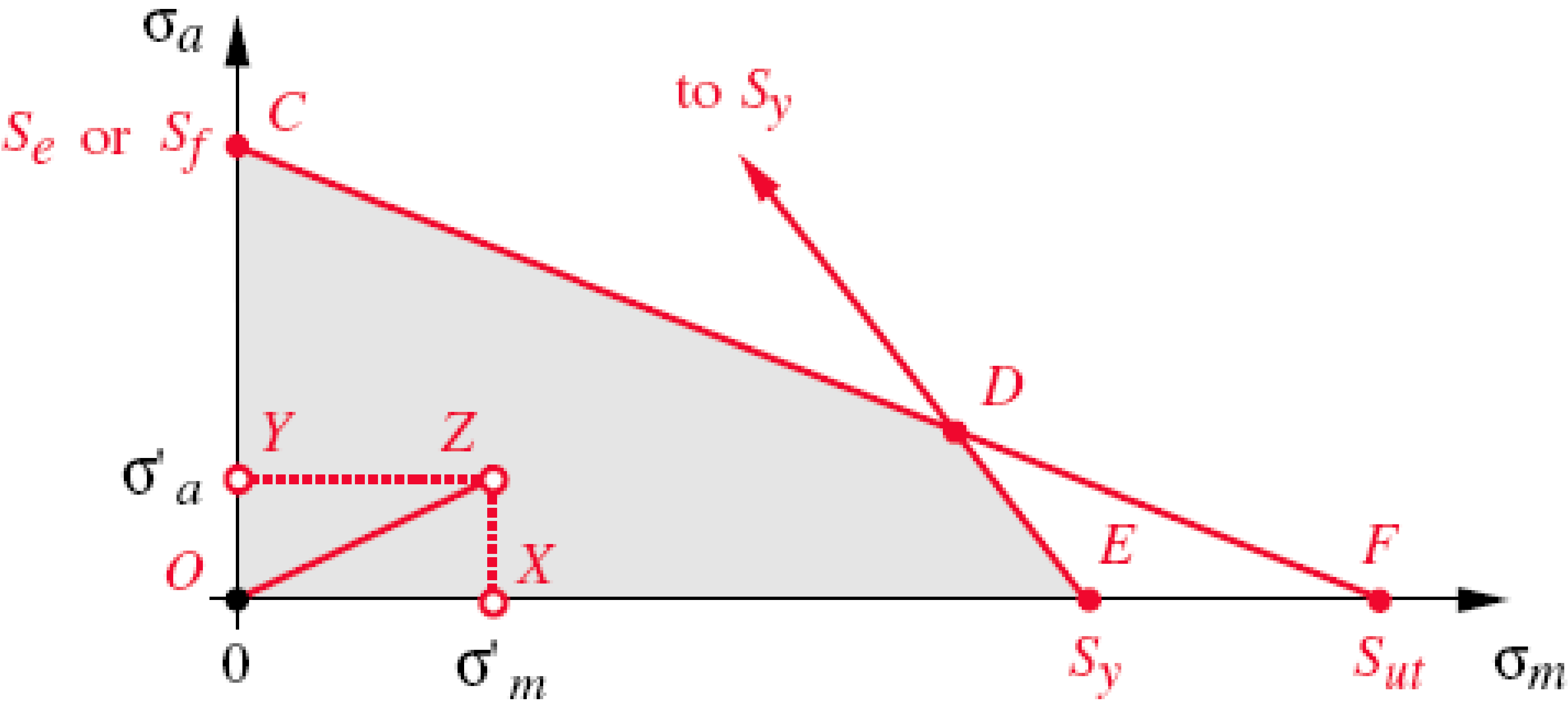


Figura – Diagrama de Goodman Modificado

Note que, para materiais dúcteis em vida infinita, $S_f = S_e$

TEORIA DE FALHA POR FADIGA

Projeto para Tensões Alternadas Flutuantes

12) Determinar os Fatores de Segurança.

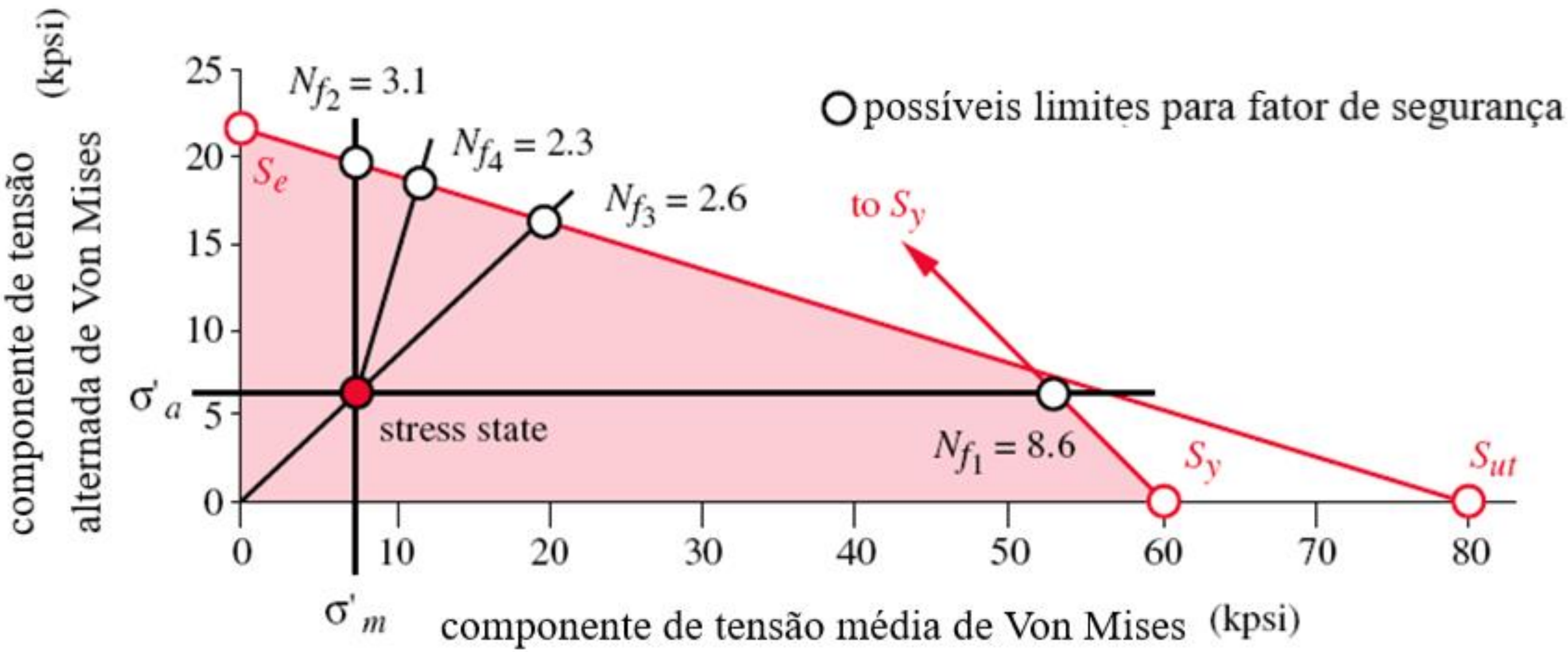


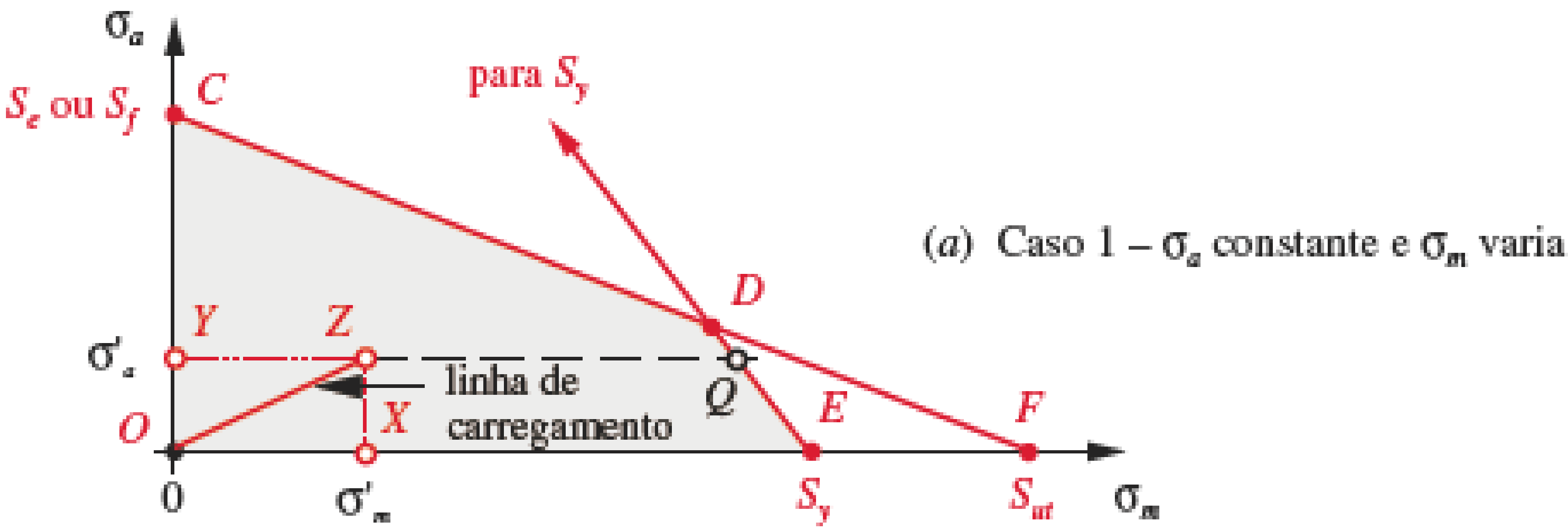
Figura – Diagrama de Goodman Modificado indicando o Estado de Tensão e os possíveis Fatores de Segurança

TEORIA DE FALHA POR FADIGA

Projeto para Tensões Alternadas Flutuantes

N_{f1} : Para componente alternada constante e componente média variável.

$$N_{f1} = \frac{S_y}{\sigma'_m}\left(1 - \frac{\sigma'_a}{S_y}\right)$$

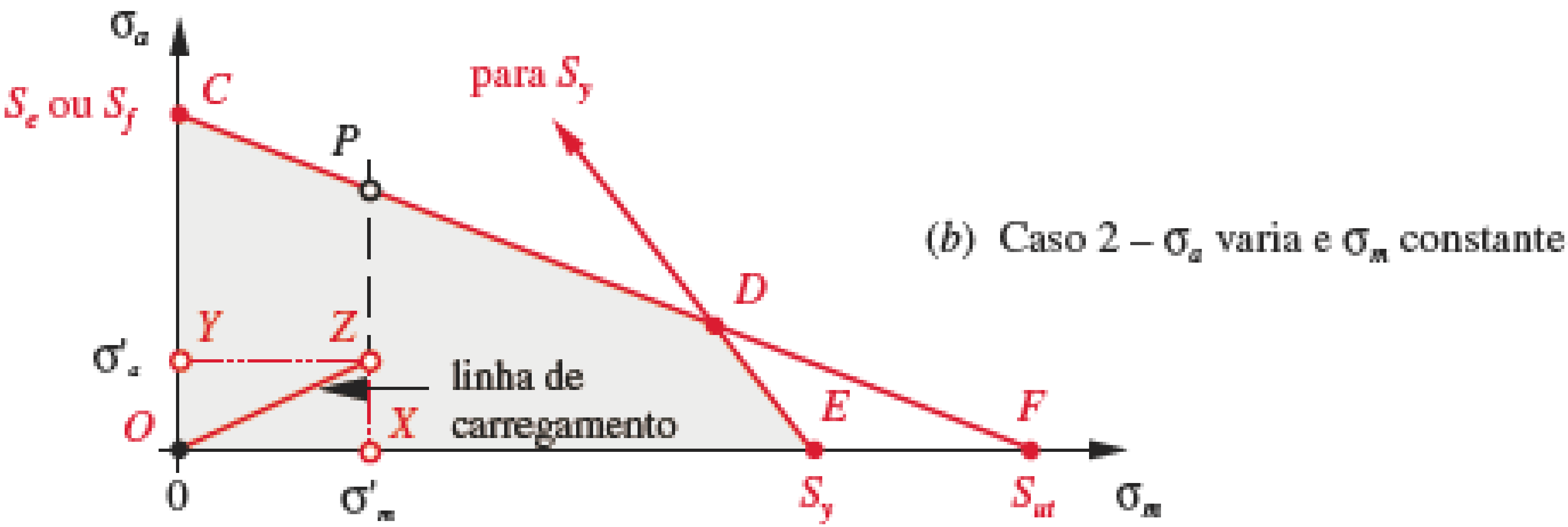


TEORIA DE FALHA POR FADIGA

Projeto para Tensões Alternadas Flutuantes

***N*f2**: Para componente média constante e componente alternada variável.

$$N_{f\,2} = \frac{S_f}{\sigma'_a}\left(1 - \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}\right)$$

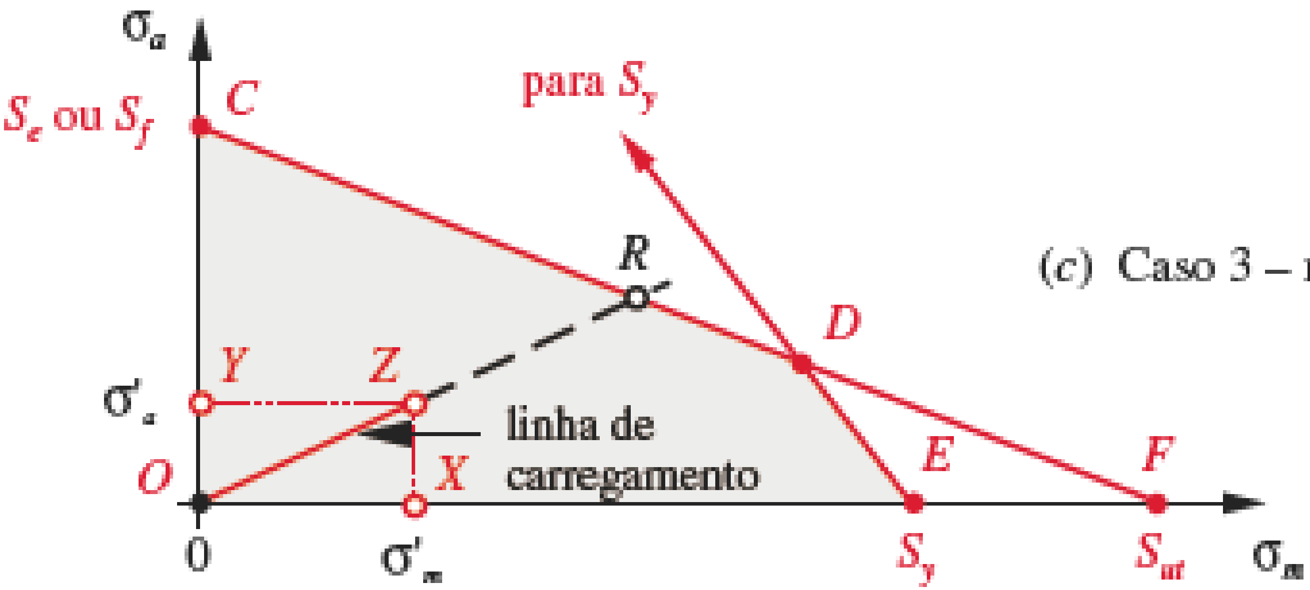


TEORIA DE FALHA POR FADIGA

Projeto para Tensões Alternadas Flutuantes

N_{f3}: Para componente média e alternada variáveis, mantendo uma relação fixa entre se ($\sigma_a' / \sigma_m' =$ cte).

$$N_{f3} = \frac{S_{ut} S_f}{\sigma_a' S_{ut} + \sigma_m' S_f}$$



(c) Caso 3 – razão σ_a / σ_m constante

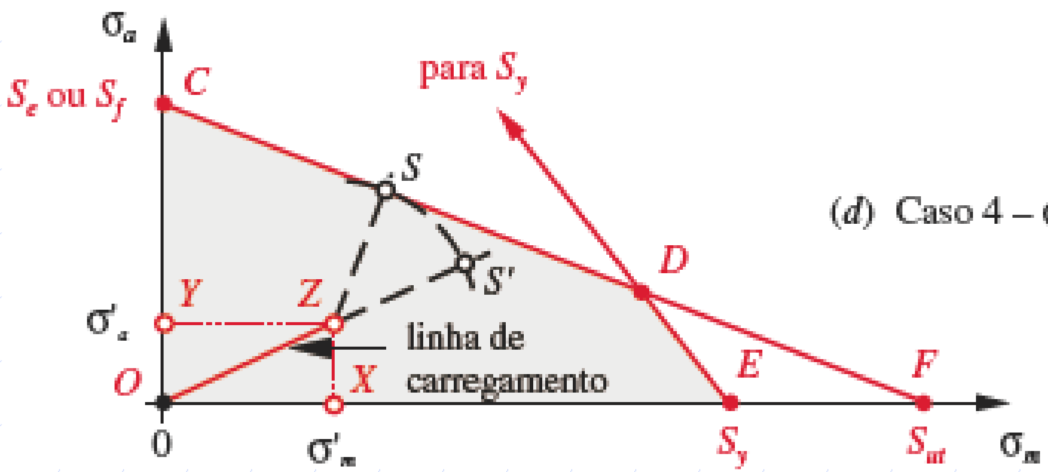
TEORIA DE FALHA POR FADIGA

Projeto para Tensões Alternadas Flutuantes

***N**f4*: Para componentes média e alternada variáveis quaisquer.

$$N_{f4} = \frac{\sqrt{\sigma_a'^2 + \sigma_m'^2} + \sqrt{(\sigma_m' - \sigma_{ms}')^2 + (\sigma_a' - \sigma_{as}')^2}}{\sqrt{\sigma_a'^2 + \sigma_m'^2}}$$

Sendo: $\sigma'_{ms} = \dfrac{S_{ut}\left(S_f^{\,2} - S_f\sigma_a' + S_{ut}\sigma_m'\right)}{S_f^{\,2} + S_{ut}^{\,2}}$ $\qquad \sigma'_{as} = -\dfrac{S_f\left(\sigma'_{ms}\right)}{S_{ut}} + S_f$



(*d*) Caso 4 – σ_a e σ_m variam independentemente