

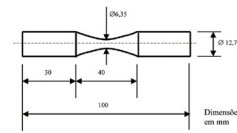
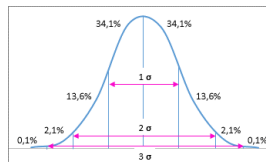
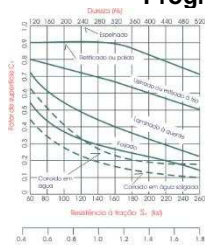
# 9. RESISTÊNCIA À FADIGA DE COMPONENTES

Prof. Dr. Julio Almeida

Universidade Federal do Paraná

Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica

PGMEC



## CORPOS DE PROVA x COMPONENTES



## CORPO DE PROVA x COMPONENTE

VARIÁVEIS	CORPO DE PROVA	COMPONENTE
<b>Acabamento superficial</b>	Retificado ou polido	Estado bruto de fabricação ou usinado
<b>Tamanho</b>	Secção circular com $\phi = 7,62\text{mm}$	Secções e dimensões variáveis
<b>Confiabilidade</b>	Normalmente elevada	Variável
<b>Temperatura</b>	Controlada na faixa dos $20^{\circ}\text{C}$	Variável podendo atingir valores relativamente elevados
<b>Geometria</b>	Secção transversal uniforme com transições suaves	Diversas e com variações de secção bruscas
<b>Tipo de carga</b>	Flexão rotativa, torção ou cargas axiais	Esforços combinados
<b>Efeitos diversos</b>	Não existem	Tensões residuais, tratamentos superficiais, ambientes agressivos, etc

3

## FATORES DE CORREÇÃO EMPIRÍCOS

As discrepâncias nas expectativas de vida entre corpos de prova e os componentes mecânicos são consideradas pelo uso de fatores empíricos obtidos normalmente de forma experimental.

Não se dispõem, até o momento, de modelos matemáticos que façam a previsão real de componentes sujeitos à ação da fadiga.

4

**FATOR DE ACABAMENTO SUPERFICIAL**

- a fadiga se inicia, quase que na totalidade dos casos, a partir da superfície das peças;
- as irregularidades superficiais atuam como concentradores de tensão;
- a rugosidade superficial do componente tem influencia direta no processo de fadiga;
- existem diversas metodologias disponíveis para a determinação do fator de acabamento superficial.

5

**FATOR DE ACABAMENTO SUPERFICIAL**

$R_a$  = rugosidade média

$R_z$  = rugosidade média em profundidade

- peça torneada/fresada –  $R_a = 0,4$  a  $6,3 \mu\text{m}$
- peça retificada –  $R_a = 0,1$  a  $1,6 \mu\text{m}$
- peça laminada a quente/forjada –  $R_a = 3,2$  a  $25 \mu\text{m}$

$$R_z = (4 \text{ à } 7)R_a$$

6

## FATOR DE ACABAMENTO SUPERFICIAL

segundo *Jonhson*:

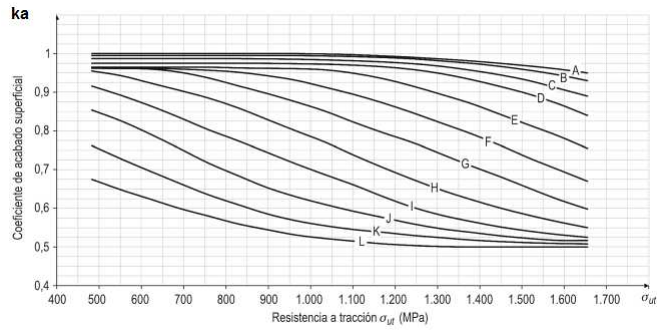


Tabla Rugosidades  $R_a$  (average roughness)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25,5	51

7

## FATOR DE ACABAMENTO SUPERFICIAL

Segundo *Budynas*:

Tipo de acabamento superficial	$k_a$	Equação
Polido	1	
Retificado	$k_a = 1,58 \sigma_{rup}^{-0,085}$	(6.8)
Laminado a frio ou usinado	$k_a = 4,51 \sigma_{rup}^{-0,265}$	(6.9)
Laminado a quente	$k_a = 57,7 \sigma_{rup}^{-0,718}$	(6.10)
Forjado	$k_a = 272 \sigma_{rup}^{-0,995}$	(6.11)

Fonte: Adaptado de Budynas (2006).

8

**FATOR DE TAMANHO**

- o tamanho da peça está diretamente associado ao volume de material submetido a tensões variáveis (maior volume de material com níveis elevados de tensões);

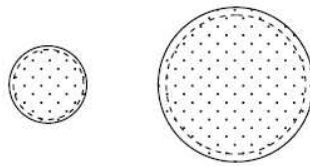


Figura 5.12 El número de defectos en la zona de mayor esfuerzo de una probeta sometida a flexión giratoria tiende a ser mayor en una probeta de mayor diámetro

9

**FATOR DE TAMANHO**

- peças de maior dimensão tem maior probabilidade de apresentar fissuras e outros defeitos;
- a fabricação de peças maiores é mais complicado, possibilitando uma maior gama de defeitos, bem como, uma maior dificuldade nas inspeções finais.

10

## FATOR DE TAMANHO

segundo *Budynas*:

Tabela 6.4 Equações válidas para o fator de tamanho

Limites	$k_b$	Equação
$2,79 \text{ mm} \leq d \leq 51 \text{ mm}$	$k_b = \left( \frac{d}{7,62} \right)^{-0,107}$	(6.15)
$51 \text{ mm} \leq d \leq 254 \text{ mm}$	$k_b = (1,51d)^{-0,157}$	(6.16)
Carregamentos axiais	1	

Fonte: Adaptado de *Budynas* (2006).

11

## FATOR DE TAMANHO

Peças não circulares:

.....

Tabela 6.3 Seções transversais típicas e o seu correspondente diâmetro equivalente

Tipo de seção transversal	$d_{eq}$	Equação
Retangular (b x h)	$d_{eq} = 0,808\sqrt{hb}$	(6.12)
Quadrada (b x b)	$d_{eq} = 0,808b$	(6.13)
Cilíndrica não rotativa	$d_{eq} = 0,370d$	(6.14)

Fonte: Adaptado de *Budynas* (2006).

12

## FATOR DE CARGA

- o corpo de prova de flexão rotativa é considerado como referência para comparação do comportamento à fadiga mediante outras formas de trabalho de corpos de prova e peças não necessariamente cilíndricas;
- especificamente para forma cilíndricas, as formas de trabalho podem ser: flexão rotativa, flexão sem rotação, carregamento axial, torção e cargas combinadas;

13

## FATOR DE CARGA

- segundo **González**:

Tabela 6.5 Fator de carga

Tipo de carregamento	$k_e$
Flexão	1,000
Cargas axiais com $\sigma_{m.p.} \leq 1520$ MPa	0,923
Cargas axiais com $\sigma_{m.p.} > 1520$ MPa	1,000
Torção pura ou cisalhamento	0,590
Flexo-torção	1,000

Fonte: Adaptado de González et al. (2003).

14

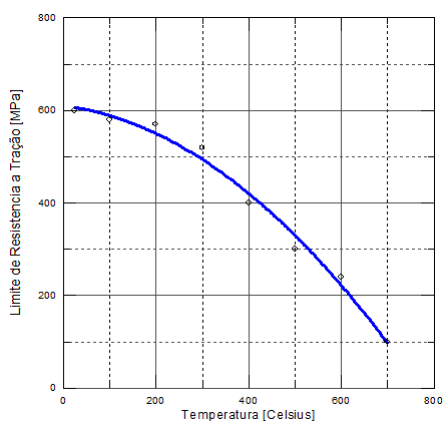
## FATOR DE TEMPERATURA

- as propriedades mecânicas dos materiais se alteram com a variação de temperatura, fazendo com que a resistência à fadiga também seja influenciada;
- o efeito da temperatura deve, sempre que possível, ser obtido a partir de dados experimentais;
- na prática, quando isso não for possível, recomendações empíricas (para altas temperaturas) encontram-se disponíveis na literatura.

15

## FATOR DE TEMPERATURA

- segundo *Budynas*:



$$37 \leq T \leq 540^{\circ} C$$

$$k_d = 0,9877 + 0,6507 \cdot 10^{-3} \cdot T - 0,3414 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 0,5621 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 - 6,246 \cdot 10^{-12} \cdot T^4 \quad 16$$



## FATOR DE CONFIABILIDADE

- as cargas de fadiga são de natureza aleatórias;
- devido a falta de dados específicos, admite-se um desvio padrão de 8% para o limite de fadiga dos aços, segundo uma distribuição Gaussiana.

$$k_e = 1 - 0,08Z$$

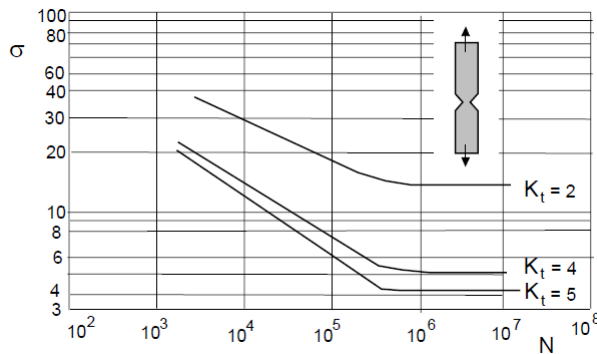
Tabela 6.7 Relação entre a variável padronizada Z e a confiabilidade esperada

Z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,50000	0,50399	0,50798	0,51197	0,51595	0,51994	0,52392	0,52791	0,53188	0,53586
0,1	0,53983	0,54380	0,54776	0,55172	0,55567	0,55962	0,56356	0,56749	0,57142	0,57535
0,2	0,57926	0,58317	0,58706	0,59095	0,59483	0,59871	0,60257	0,60642	0,61026	0,61409
0,3	0,61791	0,62172	0,62552	0,62930	0,63307	0,63683	0,64058	0,64431	0,64803	0,65173
0,4	0,65542	0,65910	0,66276	0,66640	0,67003	0,67364	0,67724	0,68082	0,68439	0,68793
0,5	0,69146	0,69497	0,69847	0,70194	0,70540	0,70884	0,71226	0,71566	0,71904	0,72240
0,6	0,72575	0,72907	0,73237	0,73565	0,73891	0,74215	0,74537	0,74857	0,75175	0,75490
0,7	0,75804	0,76115	0,76424	0,76730	0,77035	0,77337	0,77637	0,77935	0,78230	0,78524
0,8	0,78814	0,79103	0,79389	0,79673	0,79955	0,80234	0,80511	0,80785	0,81057	0,81327
0,9	0,81594	0,81859	0,82121	0,82381	0,82639	0,82894	0,83147	0,83398	0,83646	0,83891
1,0	0,84134	0,84375	0,84614	0,84849	0,85083	0,85314	0,85543	0,85769	0,85993	0,86214
1,1	0,86433	0,86650	0,86864	0,87076	0,87286	0,87493	0,87698	0,87900	0,88100	0,88298
1,2	0,88493	0,88686	0,88877	0,89065	0,89251	0,89435	0,89617	0,89796	0,89973	0,90147
1,3	0,90320	0,90490	0,90658	0,90824	0,90988	0,91149	0,91308	0,91466	0,91621	0,91774
1,4	0,91924	0,92073	0,92220	0,92364	0,92507	0,92647	0,92785	0,92922	0,93056	0,93189
1,5	0,93319	0,93448	0,93574	0,93699	0,93822	0,93943	0,94062	0,94179	0,94295	0,94409
1,6	0,94520	0,94630	0,94738	0,94845	0,94950	0,95053	0,95154	0,95254	0,95352	0,95449
1,7	0,95543	0,95637	0,95728	0,95818	0,95907	0,95994	0,96080	0,96164	0,96246	0,96327
1,8	0,96407	0,96485	0,96562	0,96638	0,96712	0,96784	0,96856	0,96926	0,96995	0,97062
1,9	0,97128	0,97193	0,97257	0,97320	0,97381	0,97441	0,97500	0,97558	0,97615	0,97670
2,0	0,97725	0,97778	0,97831	0,97882	0,97932	0,97982	0,98030	0,98077	0,98124	0,98169
2,1	0,98214	0,98257	0,98300	0,98341	0,98382	0,98422	0,98461	0,98500	0,98537	0,98574
2,2	0,98610	0,98645	0,98679	0,98713	0,98745	0,98778	0,98809	0,98840	0,98870	0,98899
2,3	0,98928	0,98956	0,98983	0,99010	0,99036	0,99061	0,99086	0,99111	0,99134	0,99158
2,4	0,99180	0,99202	0,99224	0,99245	0,99266	0,99286	0,99305	0,99324	0,99343	0,99361
2,5	0,99379	0,99396	0,99413	0,99430	0,99446	0,99461	0,99477	0,99492	0,99506	0,99520
2,6	0,99534	0,99547	0,99560	0,99573	0,99585	0,99598	0,99609	0,99621	0,99632	0,99643
2,7	0,99653	0,99664	0,99674	0,99683	0,99693	0,99702	0,99711	0,99720	0,99728	0,99736
2,8	0,99744	0,99752	0,99760	0,99767	0,99774	0,99781	0,99788	0,99795	0,99801	0,99807
2,9	0,99813	0,99819	0,99825	0,99831	0,99836	0,99841	0,99846	0,99851	0,99856	0,99861
3,0	0,99865	0,99869	0,99874	0,99878	0,99882	0,99886	0,99889	0,99893	0,99896	0,99900
3,1	0,99903	0,99906	0,99910	0,99913	0,99916	0,99918	0,99921	0,99924	0,99926	0,99929
3,2	0,99931	0,99934	0,99936	0,99938	0,99940	0,99942	0,99944	0,99946	0,99948	0,99950
3,3	0,99952	0,99953	0,99955	0,99957	0,99958	0,99960	0,99961	0,99962	0,99964	0,99965
3,4	0,99966	0,99968	0,99969	0,99970	0,99971	0,99972	0,99973	0,99974	0,99975	0,99976
3,5	0,99977	0,99978	0,99978	0,99979	0,99980	0,99981	0,99981	0,99982	0,99983	0,99983
3,6	0,99984	0,99985	0,99985	0,99985	0,99986	0,99987	0,99987	0,99988	0,99988	0,99989
3,7	0,99989	0,99990	0,99990	0,99990	0,99991	0,99991	0,99991	0,99992	0,99992	0,99992
3,8	0,99993	0,99993	0,99993	0,99994	0,99994	0,99994	0,99994	0,99995	0,99995	0,99995
3,9	0,99995	0,99995	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99997	0,99997
4,0	0,99997	0,99997	0,99997	0,99997	0,99997	0,99997	0,99997	0,99998	0,99998	0,99998

- segundo Aviles:

## FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES

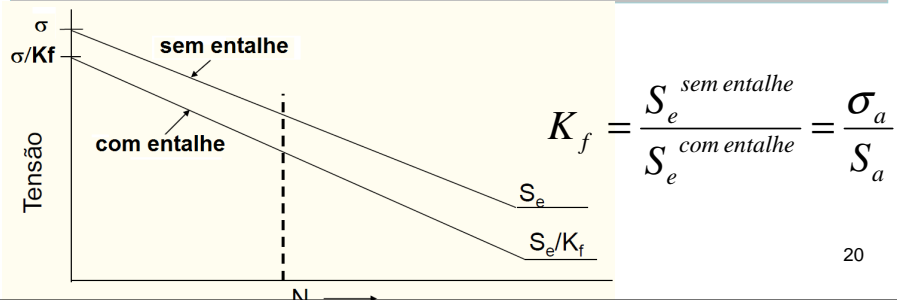
- a maneira como um entalhe em uma peça altera a vida em fadiga pode ser observado pelos exemplos da figura:



19

## FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES EM FADIGA

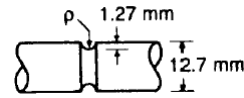
- tal condição sugere o uso de um fator concentração de tensões em fadiga ( $K_f$ ), relacionando a tensão nominal alternante, que leva à falha o corpo de prova, na condição com entalhe e sem entalhe:



20

## FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES EM FADIGA

$$K_f = \frac{S_e^{\text{sem entalhe}}}{S_e^{\text{com entalhe}}} = \frac{\sigma_a}{S_a}$$



**Exceção:** para elevados valores de “ $\rho$ ”,  $K_f \rightarrow K_t$

O fator de concentração de tensões em fadiga depende das propriedades do material, da geometria da peça e do modo de carregamento.

**Importante:**  $1 \leq K_f \leq K_t$

21

## FATOR DE SENSIBILIDADE AO ENTALHE

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad 0 \leq q \leq 1$$

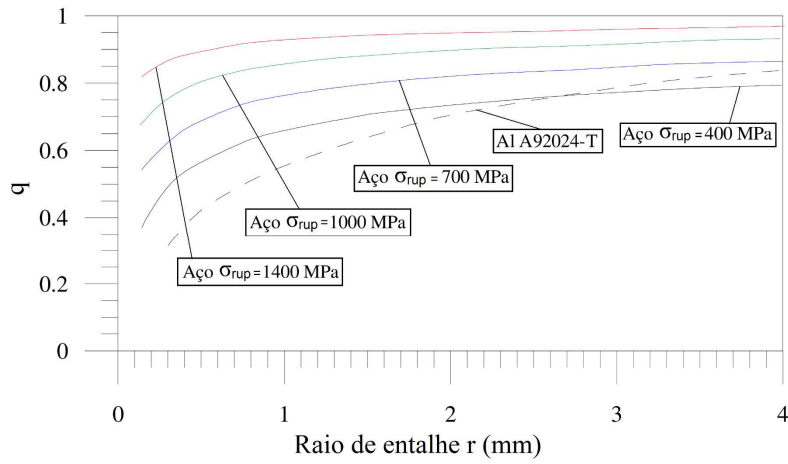
$q = 0$  – sem efeito do entalhe (equivalente à condição de um material muito dúctil)

$q = 1$  – efeito do entalhe significativo (equivalente à condição de um material muito frágil)

22

## FATOR DE SENSIBILIDADE AO ENTALHE

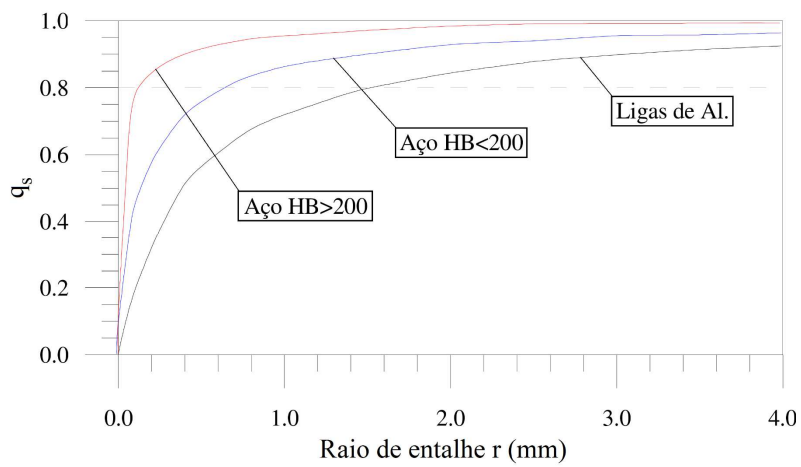
- sensibilidade ao entalhe para tensões normais:



23

## FATOR DE SENSIBILIDADE AO ENTALHE

- sensibilidade ao entalhe para tensões tangenciais:



24

## FATOR DE SENSIBILIDADE AO ENTALHE

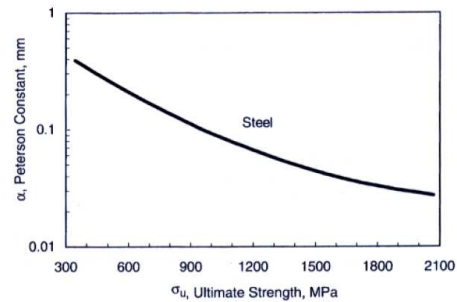
Relação empírica de *Peterson* (1974)

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{\rho}}$$

$\alpha$  – constante do material

$$\alpha \cong 0,025 \left( \frac{2070}{\sigma_{rup} (MPa)} \right) (mm)$$

$$\log \alpha \cong 2,654 \cdot 10^{-7} \sigma_{rup}^2 - 1,309 \cdot 10^{-3} \sigma_{rup} + 0,001103$$



25

## FATOR DE SENSIBILIDADE AO ENTALHE

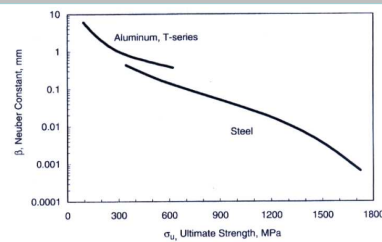
Relação empírica de *Neuber* (1958)

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{\beta}}{\sqrt{\rho}}}$$

$\beta$  – constante de *Neuber* (função do material)

Aços carbono ( $345 \leq \sigma_{rup} \leq 1725$ ) (MPa)

$$\log \beta \cong -1,079 \cdot 10^{-9} \sigma_{rup}^3 + 2,74 \cdot 10^{-6} \sigma_{rup}^2 - 3,74 \cdot 10^{-3} \sigma_{rup} + 0,6404$$



26

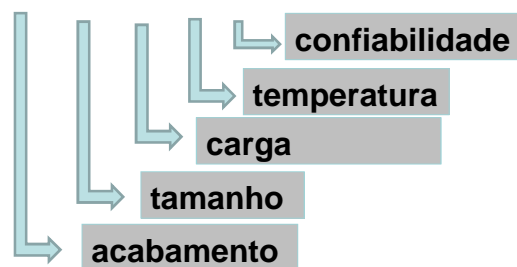
## DEMAIS FATORES

- fator de tratamento mecânico (*shot-peening*, brunimento);
- fator de *fretting* (contatos abrasivos);
- fator de polimento;
- fator de choque;
- fator de soldagem;
- fator de corrosão.

27

## EQUAÇÃO DE MARIN

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot S_e'$$



$S_e$  – limite de resistência a fadiga da peça real

$S_e'$  – limite de resistência a fadiga do corpo de prova

28

## EQUAÇÃO DE MARIN

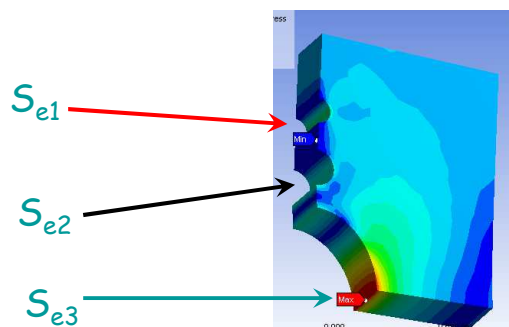
$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot \frac{1}{k_f} S_e'$$



concentração  
de tensões

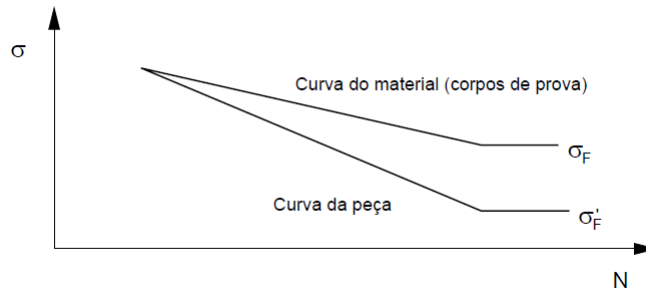
29

## RESISTÊNCIA À FADIGA DE COMPONENTES



: cada ponto material do componente terá a sua própria  
resistência à fadiga

30

**EFEITO DOS FATORES DE CORREÇÃO SOBRE O DIAGRAMA SN**

31

**EFEITO DOS FATORES DE CORREÇÃO SOBRE O DIAGRAMA  $\epsilon N$** 

- fator de acabamento superficial – considerar a correção apenas na parcela elástica da deformação total, dado que a parcela plástica tende a mascarar o efeito das irregularidades superficiais;
- fator de tamanho – irrelevante visto que as deformações são calculadas para o ponto mais solicitado da peça;

32



## EFEITO DOS FATORES DE CORREÇÃO SOBRE O DIAGRAMA $\epsilon N$

- fator de concentração de tensões – extremamente crítico e importante;
- demais fatores – irrelevantes.

33

## EFEITO DOS FATORES DE CORREÇÃO SOBRE O DIAGRAMA $\epsilon N$

....

Regra de *Neuber* com 2 incógnitas

$$k_\epsilon \cdot k_\sigma = k_f^2 \quad x(\Delta\epsilon_o)^2$$

$$k_\epsilon \cdot \Delta\epsilon_o \cdot k_\sigma \cdot \Delta\epsilon_o = k_f^2 (\Delta\epsilon_o)^2$$

$$k_\epsilon = \Delta\epsilon / \Delta\epsilon_o$$

$$\Delta\epsilon \cdot k_\sigma \cdot \Delta\epsilon_o = k_f^2 (\Delta\epsilon_o)^2$$

34

## EFEITO DOS FATORES DE CORREÇÃO SOBRE O DIAGRAMA $\epsilon N$

....

Regra de *Neuber* com 2 incógnitas

$$\Delta \epsilon \cdot k_{\sigma} \cdot \Delta \epsilon_o = k_f^2 (\Delta \epsilon_o)^2$$

$$k_{\sigma} = \Delta \sigma / \Delta \sigma_o$$

$$\Delta \epsilon = \frac{k_f^2 (\Delta \epsilon_o)^2}{k_{\sigma} \cdot \Delta \epsilon_o} = \frac{k_f^2 \cdot \Delta \epsilon_o \cdot \Delta \sigma_o}{\Delta \sigma} \quad (I)$$

35

## EFEITO DOS FATORES DE CORREÇÃO SOBRE O DIAGRAMA $\epsilon N$

....

Regra de *Neuber* com 2 incógnitas

curva tensão-deformação cíclica do material

$$\Delta \epsilon = \frac{\Delta \sigma}{E} + 2 \left( \frac{\Delta \sigma}{K'} \right)^{1/n} \quad (II)$$

$f(\sigma) = II - I$

$$f(\sigma) = \frac{\Delta \sigma}{E} + 2 \left( \frac{\Delta \sigma}{K'} \right)^{1/n} - k_f^2 \frac{\Delta \epsilon_o \cdot \Delta \sigma_o}{\Delta \sigma}$$

36

## EFEITO DOS FATORES DE CORREÇÃO SOBRE O DIAGRAMA $\epsilon$ N

....

Regra de *Neuber* com 2 incógnitas

$$\text{para: } f(\sigma) = 0 \Rightarrow \Delta \epsilon$$

por Newton:

$$\Delta \sigma_{i+1} = \Delta \sigma_i - \frac{f_i}{f'_i}$$

$$f'_i = \frac{df}{d\Delta \sigma} = \frac{1}{E} + \frac{2^{1-1/n}}{K'n} \left( \frac{\Delta \sigma}{K'} \right)^{(1/n)-1} + k_f^2 \frac{\Delta \epsilon_o \cdot \Delta \sigma_o}{\Delta \sigma^2}$$

37

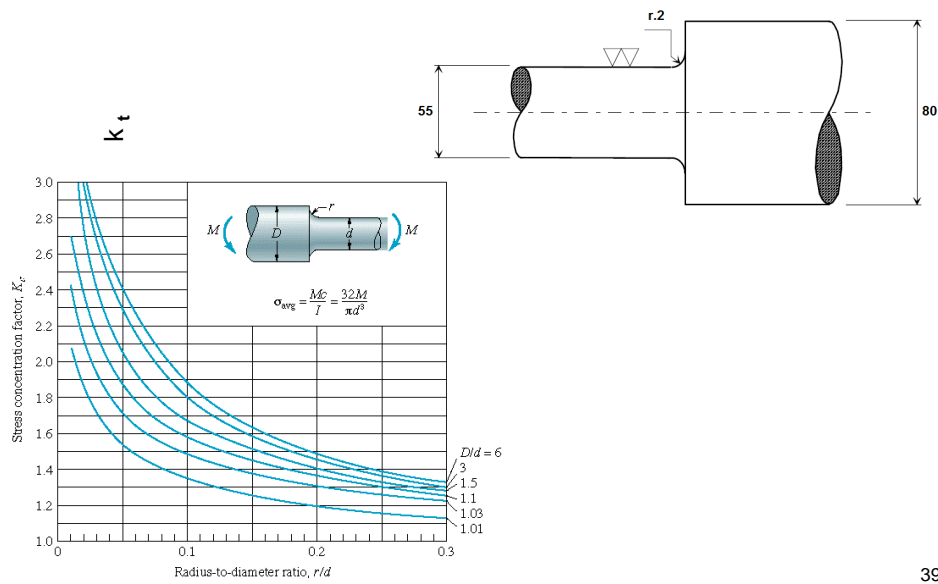
## EXEMPLO 01

Qual o coeficiente de segurança para vida infinita do eixo, cuja seção crítica está esquematizada em figura, submetido à flexão, se a tensão nominal varia ciclicamente com amplitude de 65 MPa (tensão média zero)? Supor uma confiabilidade de 95%.

Material: HB = 225,  $\sigma_{rup} = 724$  MPa,  $\sigma_e = 634$  MPa

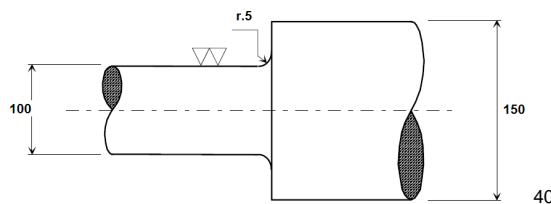
38

**EXEMPLO 01 - continuação**



**EXEMPLO 02**

Determinar o momento fletor que provoca uma fissura de fadiga em  $10^5$  ciclos, usando o diagrama deformação-número de ciclos e o método das inclinações universais, na peça esquematizada em figura. Material: HB = 350,  $\sigma_{rup} = 1240$  MPa,  $\sigma_e = 758$  MPa,  $\epsilon_f = 0,84$ ,  $E = 200$  GPa



**EXEMPLO 03**

Para a peça do exemplo 02, determinar o momento fletor alternante que provoca uma fissura de fadiga em  $10^5$  ciclos, usando o diagrama tensão-número de ciclos.

41

**EXEMPLO 04**

Uma peça de aço com entalhe ( $K_f = 3,2$ ) é submetida a carga alternante que provoca uma flutuação da tensão nominal  $\Delta\sigma_0 = 756$  MPa. Qual a faixa de deformação ( $\Delta\varepsilon$ ) no fundo do entalhe? Qual a faixa de flutuação da tensão? Qual a vida estimada da peça? Supor EPT.

Dados do material:

$E = 210$  GPa,  $K' = 1434$  MPa,  $n' = 0,14$ ,  $\sigma_f' = 1240$  MPa,  
 $\varepsilon_f' = 0,66$ ,  $b = -0,12$ ,  $c = -0,60$

42

## BIBLIOGRAFIA DE REFERÊNCIA

**Almeida, J.C.** *Projeto Mecânico – Enfoque baseado na Mecânica da Fratura e Fadiga - 1ª Ed.*, Elsevier (2018).

**Aviles, R.** *Métodos de Cálculo de Fatiga para Ingeniería*, Paraninfo, Madrid (2015).

**Budynas, R.G., Nisbett, J.K.** *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 8ª Ed, McGraw-Hill.

**Juvinall, R., Marshek, K.** – *Projeto de Componentes de Máquinas*, 4ª Ed, LTC.

**Rosa, E.**, *Análise de Resistência Mecânica*, UFSC, Dpto Engenharia Mecânica, GRANTE, Santa Catarina (2002).