

Concentração de tensão e sensibilidade de entalhe

Na Seção 3-13 foi mencionado que a existência de irregularidades ou descontinuidades, tais como orifícios, sulcos ou entalhes, em uma peça, aumentam as tensões teóricas significativamente nas proximidades imediatas da descontinuidade. A Equação (3-48) definiu um fator de concentração de tensão K_t (ou K_{ts}), que é usado com a tensão nominal para obter a tensão resultante máxima por irregularidade ou defeito. Resulta que alguns materiais não são totalmente sensíveis à presença de entalhes, logo, para esses, um valor reduzido de K_t pode ser usado. Para esses materiais, a tensão máxima é, de fato,

$$\sigma_{\max} = K_f \sigma_0 \quad \text{ou} \quad \tau_{\max} = K_{fs} \tau_0 \quad (6-30)$$

em que K_f é um valor reduzido de K_t e σ_0 é a tensão nominal. O fator K_f é comumente chamado de *fator de concentração de tensão de fadiga*, e daí o subscrito f . Assim, é conveniente pensar em K_f como um fator de concentração de tensão reduzido de K_t por causa da reduzida sensibilidade a entalhes. O fator resultante é definido por meio da equação

$$K_f = \frac{\text{tensão máxima no espécime entalhado}}{\text{tensão no espécime sem entalhe}} \quad (a)$$

Sensibilidade de entalhe q é definida pela equação

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad \text{ou} \quad q_{\text{cisalhamento}} = \frac{K_{fs} - 1}{K_{ts} - 1} \quad (6-31)$$

na qual q está usualmente entre zero e a unidade. A Equação (6-31) mostra que se $q = 0$, então $K_f = 1$, e o material não tem sensibilidade a entalhes em absoluto. Por outro lado, se $q = 1$, $K_f = K_t$, e o material tem sensibilidade completa a entalhe. Em trabalho de análise ou projeto, encontre K_t primeiro, a partir da geometria da peça. Depois especifique o material, encontre q e resolva para K_f a partir da equação

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad \text{ou} \quad K_{fs} = 1 + q_{\text{cisalhamento}}(K_{ts} - 1) \quad (6-32)$$

Para aços e ligas de alumínio 2024, use a Figura 6-20 para encontrar q para carregamento de flexão e axial. Para carregamento de cisalhamento, use a Figura 6-21. Ao usar essas cartas é bom saber que os resultados dos ensaios reais a partir dos quais as curvas foram derivadas exibem uma grande quantidade de espalhamento. Por causa desse espalhamento é sempre seguro usar $K_f = K_t$ se houver qualquer dúvida acerca do valor verdadeiro de q . Note, também, que q não está longe da unidade para raios grandes de entalhe.

A sensibilidade de entalhe de ferros fundidos é muito baixa, variando de 0 a cerca de 0,20, dependendo da resistência à tração. Para estar no lado conservativo, é recomendável que o valor de $q = 0,20$ seja usado para todos os graus de ferro fundido.

A Figura 6-20 tem como base a *equação de Neuber*, que é dada por

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{a/r}} \quad (6-33)$$

em que \sqrt{a} é definida como a *constante de Neuber* e é uma constante do material. Igualando a Equação (6-31) à (6-33), produz-se a equação de sensibilidade de entalhe

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}} \quad (6-34)$$

Para aço, com S_{ut} em MPa, as constantes de Neuber para vários tipos de entalhe são dadas na Tabela 6-15.

Tabela 6-15

Parâmetro de Heywood \sqrt{a} e coeficientes de variação C_{kf} para aços.

Tipo de entalhe	$\sqrt{a}(\sqrt{\text{mm}})$ S_{ut} em MPa	Coefficiente de variação C_{kf}
Furo transversal	$174/S_{ut}$	0,10
Ressalto	$139/S_{ut}$	0,11
Fenda	$104/S_{ut}$	0,15

Figura 6-20

Cartas de sensibilidade ao entalhe de aços e ligas de alumínio forjado UNS A92024-T submetidas à flexão reversa ou cargas axiais reversas. Para raios de entalhe maiores, utilize os valores de q correspondentes à ordenada $r = 0,16$ in (4 mm).

(Extraído de George Sines e J. L. Waisman (eds.), Metal Fatigue, McGraw-Hill, New York. Copyright © 1969, The McGraw-Hill Companies, Inc. Reimpresso com permissão.)

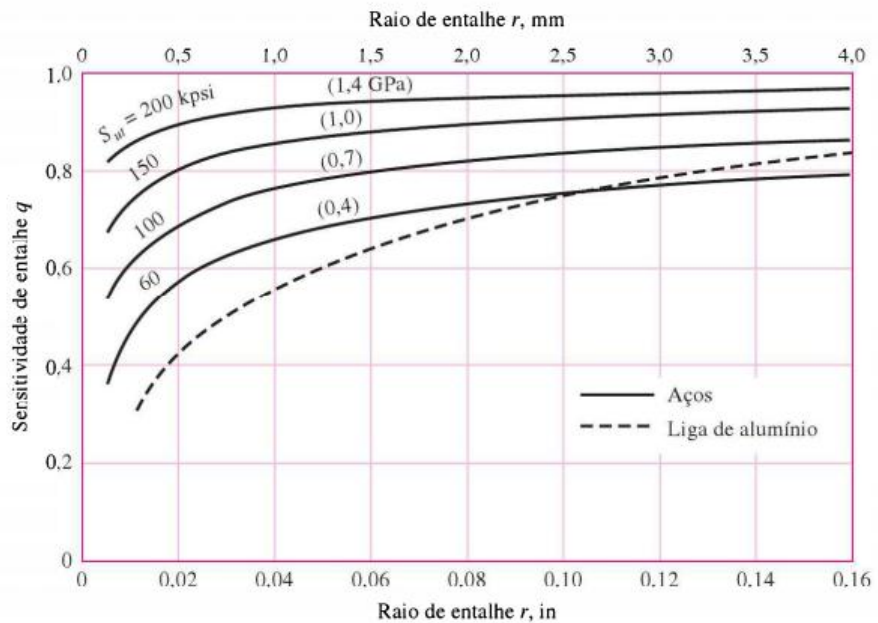
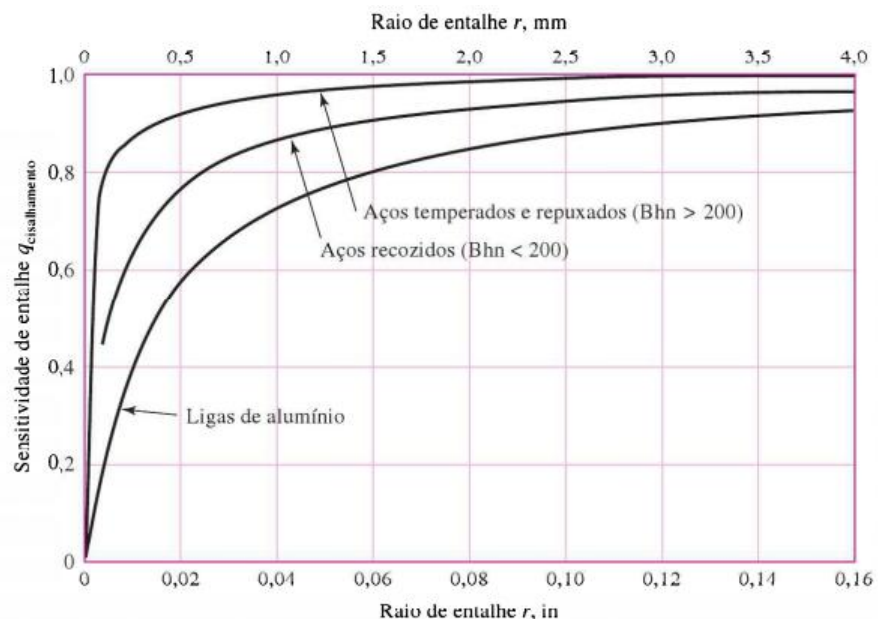


Figura 6-21

Curvas de sensibilidade ao entalhe para materiais em torção reversa. Para raios grandes de entalhe, use valores de $q_{\text{cisalhamento}}$ correspondente a $r = 0,16$ in (4 mm).



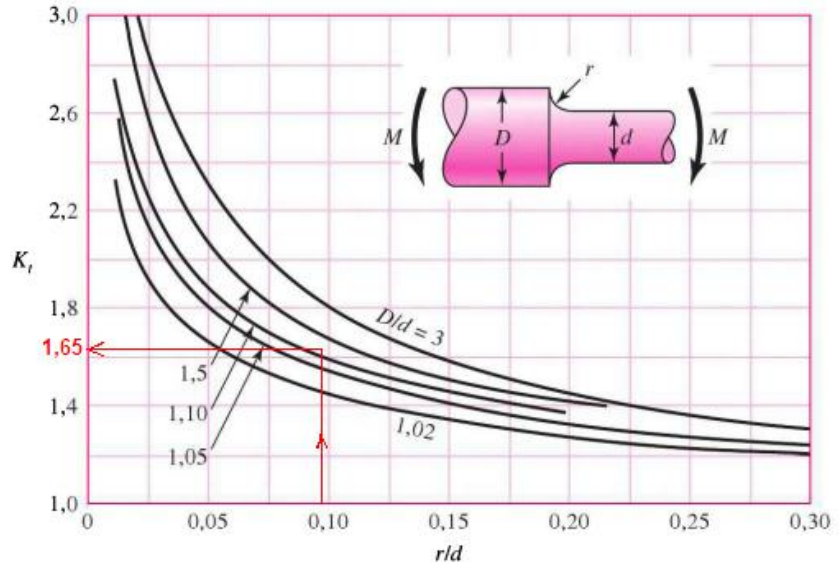
EXEMPLO 6-6 Um eixo de aço em flexão tem uma resistência última de 690 MPa e um ressalto com um raio de arredondamento de 3 mm conectando um diâmetro de 32 mm com um diâmetro de 38 mm. Calcule K_t usando:

(a) a Figura 6-20.

Solução Da Figura A-13-9, usando $D/d = 38/32 = 1,1875$, $r/d = 3/32 = 0,09375$, lemos o gráfico para encontrar $K_t \doteq 1,65$.

Figura A-13-9

Eixo redondo com filetagem (adelgaçamento) do ressalto em flexão.
 $\sigma_0 = Mc/I$, sendo
 $c = d/2$ e $I = \pi d^4/64$.



(a) Com base na Figura 6-20, para $S_{ut} = 690$ MPa e $r = 3$ mm, $q \doteq 0,84$. Assim, da Equação (6-32)

Resposta

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \doteq 1 + 0,84(1,65 - 1) = 1,55$$

Para carregamento simples, é aceitável reduzir o limite de endurance quer dividindo o limite de endurance do espécime sem entalhe por K_f , quer multiplicando a tensão de reversão por K_f . Contudo, ao tratar de problemas de tensões combinadas que podem envolver mais de um valor do fator de concentração de fadiga, as tensões são multiplicadas por K_f .

EXEMPLO 6-7 Considere um espécime não entalhado com um limite de endurance de 380 MPa. Se o espécime fosse entalhado de maneira que $K_f = 1,6$, qual seria o fator de segurança contra falha para $N > 10^6$ ciclos a uma tensão reversa de 200 MPa?

- (a) Solucionar reduzindo S'_e .
- (b) Solucionar aumentando a tensão aplicada.

Solução (a) O limite de endurance de um espécime entalhado é dado por

$$S_e = \frac{S'_e}{K_f} = \frac{380}{1,6} = 237,5 \text{ MPa}$$

e o fator de segurança é

Resposta

$$n = \frac{S_e}{\sigma_a} = \frac{237,5}{200} = 1,1875$$

(b) A tensão máxima pode ser escrita como

$$(\sigma_a)_{\max} = K_f \sigma_a = 1,6(200) = 320 \text{ MPa}$$

e o fator de segurança é

Resposta

$$n = \frac{S'_e}{K_f \sigma_a} = \frac{380}{320} = 1,1875$$

Até este ponto, os exemplos ilustraram cada fator na equação de Marin e nas concentrações de tensão isoladas. Vamos considerar um número de fatores ocorrendo simultaneamente.

EXEMPLO 6-8

Uma barra de aço 1015 laminada a quente foi usinada a um diâmetro de 25 mm. É para ser colocada em carregamento axial reverso por 70 000 ciclos até falhar em um ambiente operacional de 300°C. Usando propriedades mínimas ASTM e confiabilidade de 99%, calcule a resistência à fadiga a 70 000 ciclos.

Solução

Da tabela A-18, $S_{ut} = 340$ MPa a 20°C. Visto que o limite de endurance do espécime de viga rotativa não é conhecido à temperatura ambiente, determinamos a resistência última à temperatura elevada usando a Tabela 6-4. Da Tabela 6-4, temos

$$\left(\frac{S_T}{S_{RT}} \right)_{300^\circ} = 0,975$$

A resistência última a 300°C é então

$$(S_{ut})_{300^\circ} = (S_T/S_{RT})_{300^\circ} (S_{ut})_{20^\circ} = 0,975(340) = 331,5 \text{ MPa}$$

O limite de endurance do espécime de viga rotativa a 300°C é calculado com base na Equação (6-8) como

$$S'_e = 0,5(331,5) = 165,8 \text{ MPa}$$

A seguir, determinamos os fatores de Marin. Para a superfície usinada, a Equação (6-19) com a Tabela 6-2, temos

$$k_a = aS_{ut}^b = 4,5(331,5^{-0,265}) = 0,969$$

Para carregamento axial, da Equação (6-21), o fator de tamanho $k_b = 1$, e com base na Equação (6-26), o fator de carregamento é $k_c = 0,85$. O fator de temperatura $k_d = 1$, visto que levamos em conta a temperatura ao modificar a resistência última e, consequentemente, o limite de endurance. Para confiabilidade de 99%, da Tabela 6-5, $k_e = 0,814$. Finalmente, visto que outras condições não foram dadas, o fator de efeitos diversos é $k_f = 1$. O limite de endurance para a peça é calculado pela Equação (6-18) como

Resposta

$$\begin{aligned} S_e &= k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \\ &= 0,969(1)(0,85)(1)(0,814)(1)165,8 = 111 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Para a resistência à fadiga a 70 000 ciclos necessitamos construir a equação $S-N$. Sendo $S_{ut} = 331,5 < 490$ MPa, então $f = 0,9$. Da Equação (6-14)

$$a = \frac{(f S_{ut})^2}{S_e} = \frac{[0,9(331,5)]^2}{111} = 891 \text{ MPa}$$

e a Equação (6-15)

$$b = -\frac{1}{3} \log \left(\frac{f S_{ut}}{S_e} \right) = -\frac{1}{3} \log \left[\frac{0,9(331,5)}{111} \right] = -0,1431$$

Finalmente, para a resistência à fadiga a 70 000 ciclos, a Equação (6-13) nos dá

Resposta

$$S_f = a N^b = 891 (70\,000)^{-0,1431} = 180,5 \text{ MPa}$$

EXEMPLO 6-9

A Figura 6-22a mostra um eixo rotativo simplesmente apoiado em mancais de esferas em A e D e carregado por uma força não rotativa F de 6,8 kN. Usando resistências “mínimas” da ASTM, calcule a vida da peça. **Material SAE 1050 CD (Laminado a frio)**

Solução

Da Figura 6-22b aprendemos que a falha provavelmente ocorrerá em B em vez de C ou no ponto de momento máximo. O ponto B tem uma seção transversal menor, um momento flexor maior e um fator de concentração de tensão maior que C, e o local de momento máximo tem uma dimensão maior e nenhum fator de concentração de tensão.

Primeiro devemos resolver o problema calculando a resistência no ponto B, visto que ela será diferente em qualquer outro lugar, e comparando essa resistência com a tensão no mesmo ponto.

Da Tabela A-18 encontramos $S_{ut} = 690 \text{ MPa}$ e $S_y = 580 \text{ MPa}$. O limite de endurance S'_e é calculado como

$$S'_e = 0,5 (690) = 345 \text{ MPa}$$

Da Equação (6-19) e Tabela 6-2,

$$k_a = 4,51 (690)^{-0,265} = 0,798$$

Da Equação (6-20),

$$k_b = (32/7,62)^{-0,107} = 0,858$$

Visto que $k_c = k_d = k_e = k_f = 1$,

$$S_e = 0,798(0,858)345 = 236 \text{ MPa}$$

Para encontrarmos o fator geométrico de concentração de tensão K_t , entramos na Figura A-13-9 com $D/d = 38/32 = 1,1875$ e $r/d = 3/32 = 0,09375$ e lemos $K_t \doteq 1,65$. Usando $S_{ut} = 690 \text{ MPa}$ e $r = 3 \text{ mm}$ e usando a Figura 6-20 temos $q = 0,84$. Substituindo na Equação (6-32), encontramos

$$K_f = 1 + 0,84(1,65 - 1) = 1,55$$

como o exemplo 6-6

Para a seção C, $D/d = 38/35 = 1,0857$ e $r/d = 3/35 = 0,0857$ e temos K_t pouquinho menor que 1,65 da seção B. Por isso K_t na seção C é menor que na seção B também. Pela estática, temos

$$R_1 = F \times \frac{OD}{L} \quad e \quad R_2 = F \times \frac{OA}{L}$$

$$M_B = R_1 \times AB = F \times \frac{OD}{L} \times AB = \frac{6,8kN \times (100 + 125) \times 250mm^2}{(250 + 75 + 100 + 125)mm} = 695,5 Nm$$

$$M_c = R_2 \times CD = F \times \frac{OA}{L} \times CD = \frac{6,8kN \times (250 + 75) \times 125mm^2}{(250 + 75 + 100 + 125)mm} = 502,27 Nm$$

Figura A-13-9

Eixo redondo com filetagem (adelgaçamento) do ressalto em flexão.

$\sigma_0 = Mc/l$, sendo $c = d/2$ e $I = \pi d^4/64$.

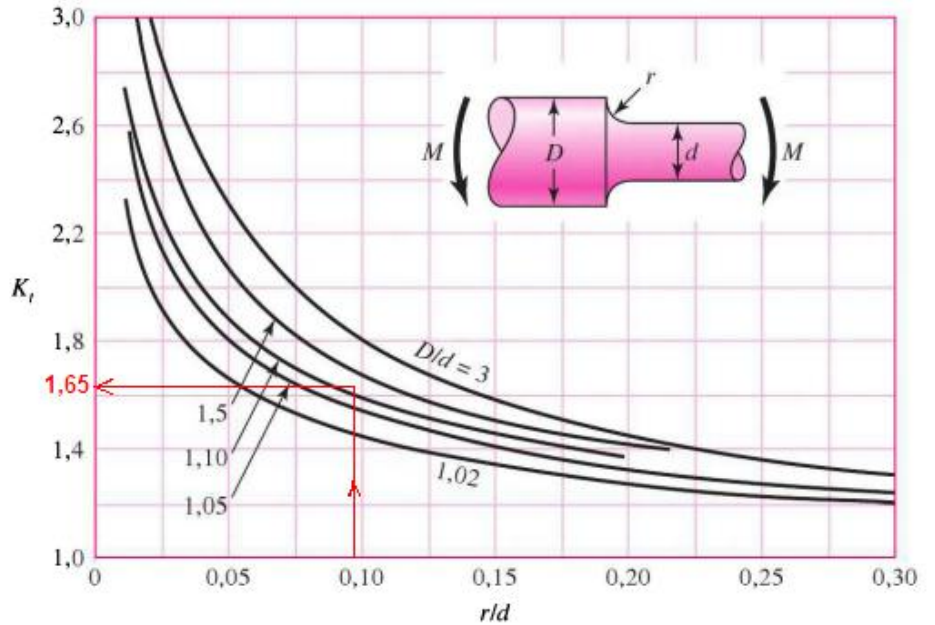
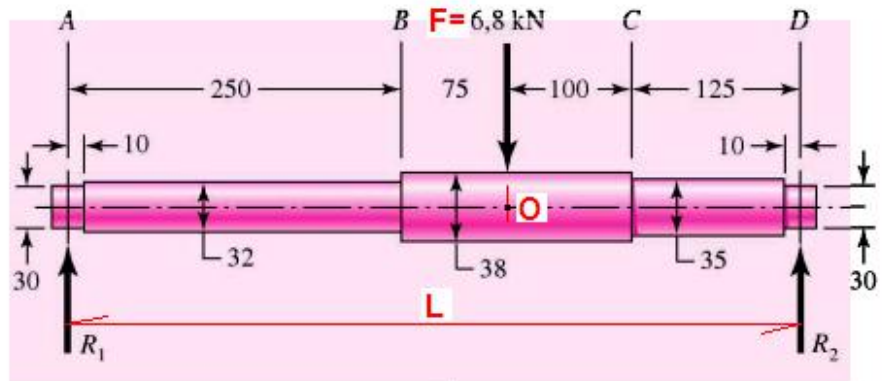


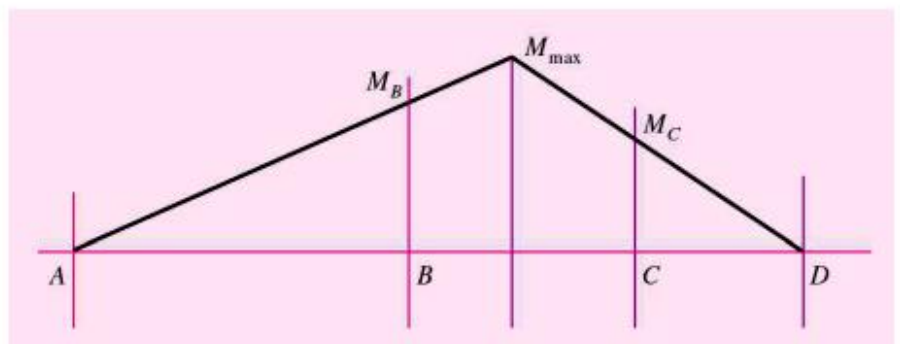
Figura 6-22

(a) Eixo desenhado que mostra todas as dimensões em milímetros; todos os raios de filetes de 3 mm. O eixo roda, porém a carga é estacionária; o material é usinado de aço AISI 1050 estirado a frio.

(b) Diagrama de momento flexor.



(a)



(b)

Exatamente à esquerda de B o módulo da seção é $I/c = \pi d^3/32 = \pi 32^3/32 = 3,217 (10^3) \text{mm}^3$.
A tensão de momento reverso é,

$$\sigma_a = K_f \frac{M_B}{I/c} = 1,55 \frac{695,5}{3,217} (10)^{-6} = 335,1 (10^6) \text{ Pa} = 335,1 \text{ MPa}$$

Essa tensão é maior que S_e e menor que S_y . Isso significa que temos nenhum escoamento no primeiro ciclo.

Para vida finita, necessitaremos usar a Equação (6-16). A resistência última, $S_{ut} = 690$ MPa. Da Figura 6-18, $f = 0,844$. Da Equação (6-14)

$$a = \frac{(f S_{ut})^2}{S_e} = \frac{[0,844(690)]^2}{236} = 1437 \text{ MPa}$$

e da Equação (6-15)

$$b = -\frac{1}{3} \log \left(\frac{f S_{ut}}{S_e} \right) = -\frac{1}{3} \log \left[\frac{0,844(690)}{236} \right] = -0,1308$$

Da Equação (6-16),

Resposta
$$N = \left(\frac{\sigma_a}{a} \right)^{1/b} = \left(\frac{335,1}{1437} \right)^{-1/0,1308} = 68 (10^3) \text{ ciclos}$$

Exercícios

- 6-10** Uma barra retangular é cortada de uma chapa de aço AISI 1018 estirada a frio. A barra tem largura de 60 mm por 10 mm de espessura e tem um orifício perfurado de 12 mm pelo centro, como está representado na Tabela A-13-1. A barra é carregada concentricamente em fadiga de puxa-empurra por forças axiais F_a , uniformemente distribuídas pela largura. Usando um fator de projeto de $n_d = 1,8$, calcule a maior força F_a que pode ser aplicada ignorando a ação de coluna.
- 6-11** As reações de mancal R_1 e R_2 são exercidas no eixo mostrado na figura, que roda a 1150 rev/min e suporta uma força de flexão de 45 kN. Use um aço 1095 HR (laminado a quente). Especifique um diâmetro d usando um fator de desenho de $n_d = 1,6$ para uma vida de 3 min. As superfícies são usinadas.

