

4. Resistência à fadiga de componentes mecânica

4.1 Fatores modificadores do limite de endurance

Vimos que o espécime de viga rotativa usado em laboratório para determinar os limites de endurance é preparado muito cuidadosamente e ensaiado sob condições controladas atentamente. Não é pertinente esperar que o limite de endurance de um membro mecânico ou estrutural iguale os valores obtidos no laboratório. Algumas diferenças incluem:

- *Material*: composição, base de falha, variabilidade.
- *Manufatura*: método, tratamento térmico, corrosão de piezo-ciclofricção, condição de superfície, concentração de tensão.
- *Ambiente*: corrosão, temperatura, estado de tensão, tempo de relaxação.
- *Projeto*: tamanho, forma, vida, estado de tensão, concentração de tensão, velocidade, piezo-ciclofricção, esfolamento.

A equação de Martin para estimar o limite de endurance de um componente mecânica é dada por fatores modificadores como

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (6-18)$$

em que k_a = fator de modificação de condição de superfície

k_b = fator de modificação de tamanho

k_c = fator de modificação de carga

k_d = fator de modificação de temperatura

k_e = fator de confiabilidade¹⁴

k_f = fator de modificação por efeitos variados

S'_e = limite de endurance de espécime de teste da viga rotativa

S_e = limite de endurance no local crítico de uma peça de máquina na geometria e condição de uso

Fator de superfície k_a

A superfície de um espécime de viga rotativa é altamente polida, com um polimento final na direção axial para alisar completamente quaisquer riscos circunferenciais. O fator de modificação de superfície depende da qualidade do acabamento da superfície da peça verdadeira e da resistência à tração do material da peça.

Pelos dados experimentos, foi sugerida a equação para fator de superfície:

$$k_a = a S_{ut}^b \quad (6-19)$$

em que S_{ut} é a resistência de tração mínima e a e b são encontrados na Tabela 6-2.

Tabela 6-2

Parâmetros para o fator de modificação de superfície de Marin, Equação (6-19).

Acabamento superficial	Fator a S_{ut} , MPa	Expoente b
Retificado	1,58	-0,085
Usinado ou laminado a frio	4,51	-0,265
Laminado a quente	57,7	-0,718
Forjado	272	-0,995

EXEMPLO 6-3 Um aço tem uma resistência última mínima de 520 MPa e uma superfície usinada. Calcule k_a .

Solução Da Tabela 6-2, $a = 4,51$ e $b = -0,265$. Assim, da Equação (6-19)

Resposta $k_a = 4,51(520)^{-0,265} = 0,860$

Fator de tamanho k_b

O fator de tamanho foi avaliado usando 133 conjuntos de pontos de dados. Os resultados para flexão e torção podem ser expressos como

$$k_b = \begin{cases} (d/7,62)^{-0,107} = 1,24d^{-0,107} & 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1,51d^{-0,157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (6-20)$$

Para carregamento axial não há efeito de tamanho, assim

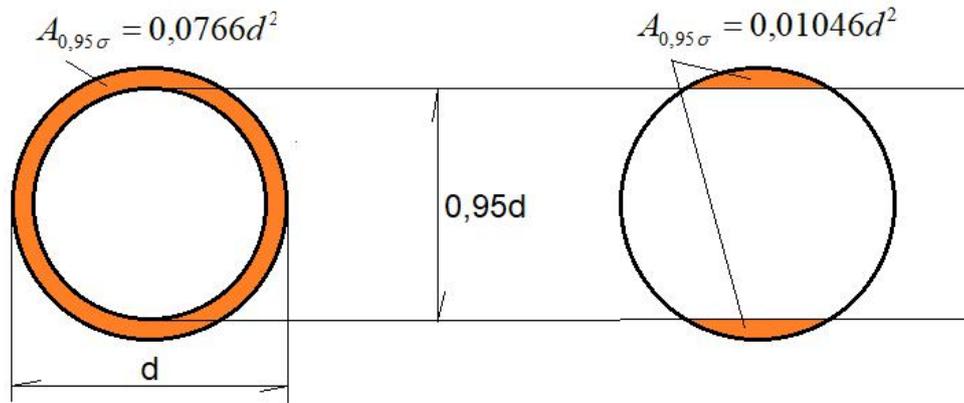
$$k_b = 1 \quad (6-21)$$

mas veja k_c .

Um dos problemas que surgem ao usar a Equação (6-20) é o que fazer quando uma barra redonda em flexão não está rodando, ou quando uma seção transversal não circular é usada. Por exemplo, qual é o fator de tamanho para uma barra de 6 mm de espessura e 40 mm de largura?

O enfoque a ser usado aqui emprega uma dimensão efetiva d_e obtida igualando-se o volume de material tensionado a, e acima de, 95% da tensão máxima ao mesmo volume no espécime de viga rotativa. Porém, quando esses dois volumes são igualados, os comprimentos se cancelam, assim necessitamos somente considerar as áreas. Para uma seção redonda girando, a área de tensão de 95% é a área em um anel com um diâmetro externo d e um diâmetro interno de $0,95d$. Assim, designando a área de tensão de 95% como $A_{0,95\sigma}$, temos

(veja a figura abaixo)



(a) Área $A_{0,95\sigma}$ para um eixo circular rodando (b) Área $A_{0,95\sigma}$ para um eixo circular não rodando

Figura X Comparação das áreas $A_{0,95\sigma}$ de eixos circular rodando e não rodando.

$$A_{0,95\sigma} = \frac{\pi}{4}[d^2 - (0,95d)^2] = 0,0766d^2 \quad (6-22)$$

Essa equação também é válida para um círculo vazado rodando. Para um sólido não rotativo ou elementos circulares vazados, a área de tensão de 95% é duas vezes a área externa a duas cordas paralelas com um espaçamento de $0,95d$, em que d é o diâmetro. Usando uma computação exata, isto é

$$A_{0,95\sigma} = 0,01046d^2 \quad (6-23)$$

com d_e na Equação (6-22), igualando as Equações (6-22) e (6-23) entre si, permite-nos resolver para o diâmetro efetivo. Isso nos dá

$$d_e = 0,370d \quad (6-24)$$

como o tamanho efetivo de um círculo correspondente a um sólido não rodando ou círculo vazado.

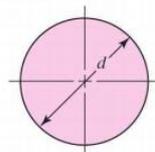
Uma seção retangular de dimensões $h \times b$ tem $A_{0,95\sigma} = 0,05hb$. Usando o mesmo enfoque que antes, temos

$$d_e = 0,808 (hb)^{1/2} \quad (6-25)$$

A Tabela 6-3 apresenta valores de $A_{0,95\sigma}$ de formas estruturais comuns, sob flexão não rotativa.

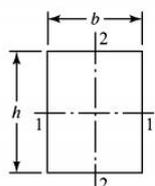
Tabela 6-3

Áreas $A_{0,95\sigma}$ de formas estruturais não rotativas comuns.



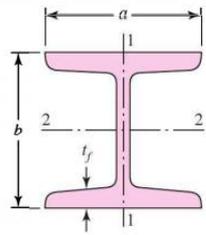
$$A_{0,95\sigma} = 0,01046d^2$$

$$d_e = 0,370d$$

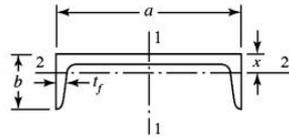


$$A_{0,95\sigma} = 0,05hb$$

$$d_e = 0,808 \sqrt{hb}$$



$$A_{0,95\sigma} = \begin{cases} 0,10at_f & \text{eixo 1-1} \\ 0,05ba & t_f > 0,025a \quad \text{eixo 2-2} \end{cases}$$



$$A_{0,95\sigma} = \begin{cases} 0,05ab & \text{eixo 1-1} \\ 0,052x\alpha + 0,1t_f(b-x) & \text{eixo 2-2} \end{cases}$$

- EXEMPLO 6-4** Um eixo de aço carregado em flexão tem 32 mm de diâmetro, tocando um anteparo filetado de 38 mm de diâmetro. O material do eixo tem uma resistência média última à tração de 690 MPa. Calcule o fator de tamanho de Marin k_b se o eixo for usado em
- um modo rotativo.
 - um modo não rotativo.

Solução (a) Da Equação (6-20)

Resposta
$$k_b = \left(\frac{d}{7,62}\right)^{-0,107} = \left(\frac{32}{7,62}\right)^{-0,107} = 0,858$$

(b) Com base Tabela 6-3

$$d_e = 0,37d = 0,37(32) = 11,84 \text{ mm}$$

Com base na Equação (6-20)

Resposta
$$k_b = \left(\frac{11,84}{7,62}\right)^{-0,107} = 0,954$$

Fator de carregamento k_c

Quando ensaios de fadiga são realizados com flexão rotativa, carregamento axial (puxar-empurrar) e carregamento torcional, os limites de endurance diferem com relação a S_{ut} . Isso será discutido na Seção 6-17. Aqui, especificaremos valores médios do fator de carregamento na forma

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexão} \\ 0,85 & \text{axial} \\ 0,59 & \text{torção}^{18} \end{cases} \quad (6-26)$$

¹⁸Use somente este para carregamento de fadiga torcional pura. Quando a torção está combinada com outras tensões, tais como flexão, $k_c = 1$ e o carregamento combinado é tratado usando-se a tensão efetiva de von Mises como na Seção 5-5. Nota: para torção pura, a energia de distorção prediz que $(k_c)_{\text{torção}} = 0,577$.

Fator de temperatura k_d

Quando as temperaturas operacionais estão abaixo da temperatura ambiente, a fratura frágil é uma possibilidade forte e deve ser investigada primeiro. Quando as temperaturas operacionais são mais altas que a temperatura ambiente, o escoamento deve ser investigado primeiro porque a resistência ao escoamento cai muito rapidamente com a temperatura; ver Figura 2–9. Qualquer tensão induzirá fluência em um material que opere a altas temperaturas; assim, esse fator deve ser considerado também.

Tabela 6–4

Efeito da temperatura de operação na resistência à tração do aço.*
(S_T = resistência à tração na temperatura de operação;
 S_{RT} = resistência à tração à temperatura ambiente,
 $0,099 \leq \hat{\sigma} \leq 0,110$.)

Temperatura, °C	S_T/S_{RT}
20	1,000
50	1,010
100	1,020
150	1,025
200	1,020
250	1,000
300	0,975
350	0,943
400	0,900
450	0,843
500	0,768
550	0,672
600	0,549

Finalmente, pode ser verdade que não haja limite de endurance para materiais que operam a altas temperaturas. Por causa da reduzida resistência à fadiga, o processo de falha é, até certo ponto, dependente do tempo.

A quantidade limitada de dados disponíveis mostra que o limite de endurance para aços aumenta ligeiramente à medida que a temperatura sobe e, então, começa a despençar no intervalo de 205 °C a 370 °C, não distinto do comportamento da resistência à tração mostrada na Figura 2–9. Por essa razão, provavelmente é verdade que o limite de endurance esteja relacionado à resistência à tração a elevadas temperaturas da mesma maneira que em temperatura ambiente.

A Tabela 6–4 foi obtida da Figura 2–9 usando somente os dados de resistência à tração. Note que a tabela representa 145 ensaios de 21 diferentes aços-carbono e liga. Um ajuste por curva polinomial de quarta ordem aos dados que produziram a Figura 2–9 nos dá

$$k_d = 0,9877 + 0,6507(10^{-3})T_C - 0,3414(10^{-5})T_C^2 + 0,5621(10^{-8})T_C^3 - 6,246(10^{-12})T_C^4 \quad (6-27)$$

em que $37 \leq T_C \leq 540^\circ \text{C}$.

Dois tipos de problemas surgem quando a temperatura é considerada. Se o limite de endurance da viga rodando for conhecido à temperatura ambiente, use

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}} \quad (6-28)$$

da Tabela 6-4 ou a Equação (6-27) e proceda como de costume. Se o limite de endurance da viga rotativa não for conhecido, compute-o usando a Equação (6-8) e a resistência à tração, corrigida a temperatura, obtida usando o fator proveniente da Tabela 6-4, depois use $k_d = 1$.

EXEMPLO 6-5 Um aço 1035 tem uma resistência última à tração de 490 MPa e deve ser usado em uma peça exposta a 230° C em serviço. Calcule o fator de modificação de temperatura de Marin e $(S_e)_{230^\circ}$ se

- (a) O limite de endurance à temperatura ambiente por ensaio é $(S'_e)_{37^\circ} = 270$ MPa.
 (b) Somente a resistência última à tração em temperatura ambiente for conhecida.

Solução (a) Primeiro, por meio da Equação (6-27),

$$k_d = 0,9877 + 0,6507(10^{-3})(230) - 0,3414(10^{-5})(230)^2 + 0,5621(10^{-8})(230^3) - 6,246(10^{-12})(230^4) = 1,00767$$

assim,

Resposta $(S_e)_{230^\circ} = k_d (S'_e)_{37^\circ} = 1,00767(270) = 272,07$ MPa

(b) Interpolação com base na Tabela 6-4 nos dá

$$(S_T/S_{RT})_{230^\circ} = 1,02 + (1,0 - 1,02) \frac{230 - 200}{250 - 200} = 1,0197$$

Assim, a resistência à tração a 230° C é calculada como

$$(S_{ut})_{230^\circ} = (S_T/S_{RT})_{230^\circ} (S_{ut})_{37^\circ} = 1,0197(490) = 499,7$$
 MPa

Da Equação (6-8), então

Resposta $(S_e)_{230^\circ} = 0,5(S_{ut})_{230^\circ} = 0,5(499,7) = 249,9$ MPa

A parte (a) oferece uma estimativa melhor em razão do ensaio real do material específico.

Fator de confiabilidade k_e

A discussão apresentada aqui leva em conta o espalhamento de dados como mostrado na Figura 6-17, em que o limite de endurance médio é mostrado como $S'_e/S_{ut} \doteq 0,5$, ou como dado pela Equação (6-8). A maior parte dos dados de resistência à fadiga é relacionada como valores médios. Os dados apresentados por Haugen e Wirching²⁰ mostram desvios padrão da resistência à fadiga de menos que 8%. Assim, o fator modificador de confiabilidade para levar em conta esse fato pode ser escrito como

$$k_e = 1 - 0,08z_a \quad (6-29)$$

em que z_a é definido pela Equação (20-16) e valores para qualquer confiabilidade desejada podem ser determinados a partir da Tabela A-10. A Tabela 6-5 apresenta fatores de confiabilidade para algumas confiabilidades-padrão especificadas.

Para um procedimento mais completo relativo à confiabilidade, ver Seção 6-17.

Tabela 6-5

Fatores de confiabilidade k_c correspondentes a 8% de desvio padrão do limite de endurance.

Confiabilidade, %	Variante de transformação z_a	Fator de confiabilidade k_c
50	0	1,000
90	1,288	0,897
95	1,645	0,868
99	2,326	0,814
99,9	3,091	0,753
99,99	3,719	0,702
99,999	4,265	0,659
99,9999	4,753	0,620

Fator de efeitos diversos k_f

Embora o fator k_f se destine a levar em conta a redução no limite de endurance em razão de todos os outros efeitos, ele é realmente proposto como um lembrete de que eles devem ser levados em conta, porque os valores reais de k_f não estão sempre disponíveis.

Tensões residuais podem ou melhorar o limite de endurance ou afetá-lo adversamente. Geralmente, se a tensão residual na superfície da peça for de compressão, o limite de fadiga será melhorado. Falhas por fadiga parecem ser falhas por tração, ou pelo menos ser causadas por tensão por tração, e assim qualquer coisa que reduza a tensão por tração reduzirá também a possibilidade de falha por fadiga. Operações tais como jateamento de granalha, martelamento e laminação a frio constroem tensões compressivas na superfície da peça e melhoram significativamente o limite de endurance. Evidentemente, o material não deve ser trabalhado à exaustão.

Os limites de endurance de peças que são feitas de chapas laminadas ou repuxadas ou barras, bem como de peças que são forjadas, podem ser afetados pelas assim chamadas *características direcionais* da operação. Peças laminadas ou repuxadas, por exemplo, têm um limite de endurance na direção transversal que pode ser 10% a 20% menor que o limite de endurance na direção longitudinal.

Peças que são endurecidas superficialmente podem falhar na superfície ou no raio máximo do núcleo, dependendo do gradiente de tensão. A Figura 6-19 mostra a distribuição de tensão triangular típica de uma barra sob flexão ou torção. Também traçados, como uma linha grossa nessa figura, estão os limites de endurance S_e para a superfície endurecida e para o núcleo. Para esse exemplo o limite de endurance do núcleo domina o projeto porque a figura mostra que a tensão σ ou τ , qualquer que se aplique, no raio externo do núcleo, é apreciavelmente maior que o limite de endurance do núcleo.

Corrosão

É de esperar que peças que operem em uma atmosfera corrosiva terão uma resistência à fadiga diminuída. Isto é verdade e se deve ao encrespamento ou crateramento da superfície por material corrosivo. Entretanto, o problema não é tão simples quanto o de encontrar o limite de endurance de um espécime que tenha sido corroído. A razão para isso é que a corrosão e o tensionamento ocorrem ao mesmo tempo. Basicamente, isso significa que, com o tempo, qualquer peça falhará quando sujeita ao tensionamento repetido em uma atmosfera corrosiva. Não há limite de endurance. Assim, o problema do desenhador é

tentar minimizar os fatores que afetam a vida de fadiga; esses são:

- Tensão média ou estática.
- Tensão alternante.
- Concentração de eletrólito.
- Oxigênio dissolvido no eletrólito.
- Propriedades do material e composição.
- Temperatura.
- Frequência cíclica.
- Taxa de fluxo de fluido ao redor do espécime.
- Fendas locais.

Chapeamento eletrolítico

Revestimentos metálicos, tais como chapeamento de cromo, chapeamento de níquel ou chapeamento de cádmio, reduzem o limite de endurance em até 50%. Em alguns casos a redução por revestimentos foi tão severa que se fez necessário eliminar o processo de chapeamento. Chapeamento de zinco não afeta a resistência à fadiga. Oxidação anódica de ligas leves reduz os limites de endurance sob flexão em algo como 39%, mas não tem efeito no limite de endurance torcional.

Pulverização de metal

Pulverização de metal resulta em imperfeições de superfície que podem iniciar trincas. Ensaio limitado mostram redução de 14% na resistência à fadiga.

Frequência cíclica

Se, por qualquer razão, o processo de fadiga se tornar dependente do tempo, então ele também se tornará dependente da frequência. Sob condições normais, a falha por fadiga é independente da frequência. Mas quando corrosão ou altas temperaturas, ou ambas, forem encontradas, a razão de ciclo se torna importante. Quanto menor a frequência e mais alta a temperatura, mais alta a taxa de propagação de trinca e mais curta a vida a um dado nível de tensão.

Corrosão de piezo-ciclofricção

O fenômeno de corrosão de piezo-ciclofricção é o resultado de movimentos microscópicos de peças ou estruturas montadas apertadamente. Juntas parafusadas, ajustes mancal-pista, cubos de roda e qualquer conjunto de peças ajustadas apertadamente são exemplos. O processo envolve descoloração superficial, crateramento e eventual fadiga. O fator de piezo-ciclofricção k_f depende do material das peças unidas e varia entre 0,24 e 0,90.

Exercícios

- 6-6** Calcule a resistência à fadiga de um eixo de 32 mm de diâmetro de aço AISI 1035, com um acabamento usinado e termo tratado para uma resistência à tração de 710 MPa.