

Cap. 2 ABORDAGEM TENSÃO-VIDA

LEITURA 2: ESTIMATIVA DA CURVA S-N

Na ausência de dados experimentais S-N, métodos para estimar o comportamento em fadiga de um componente tornam-se úteis no processo de projeto. Historicamente, grandes quantidades de dados S-N foram geradas com base em ensaios de flexão rotativa em corpos-de-prova padronizados. As curvas S-N assim obtidas podem ser consideradas como consistindo de três regiões em um gráfico log-log. Uma curva típica é mostrada na Figura 1, com os dois segmentos lineares representando as regiões de alto ciclo e baixo ciclo, e a reta horizontal representando o limite de fadiga em flexão. A separação entre as regiões de alto e baixo ciclo não pode ser definida por um número de ciclos específico. Para os aços, considera-se que os valores de tensão que representam a resistência à fadiga em 1, 10^3 e 10^6 ciclos definem uma curva S-N. Esses valores serão designados, respectivamente, por S'_f , S_{1000} e S_{be} . Neste último, o índice “be” refere-se à flexão (*bending*). A inclinação da curva S-N na região de alto ciclo é designada por b e pode ser expressa pela equação (1). O inverso da inclinação da curva (denominado fator de inclinação) é designado por k e expresso pela equação (2).

$$b = \frac{\log S_{1000} - \log S_{be}}{\log 10^3 - \log 10^6} = \frac{1}{3} \log \left(\frac{S_{1000}}{S_{be}} \right) \quad (1)$$

$$k = -\frac{1}{b} \quad (2)$$

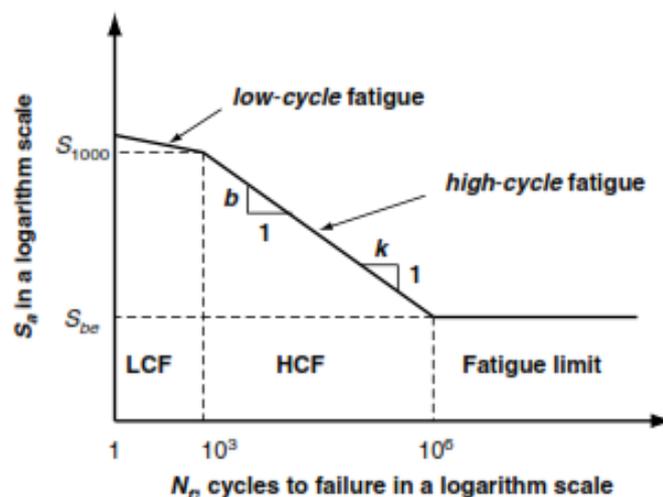


Figura 1. Curva S-N esquemática para aços.

Muitos anos de experiência acumulada permitiram a proposição de relações empíricas para relacionar a resistência à fadiga com o limite de resistência à tração do material, S_u . Essas relações não tem fundamentação científica, mas constituem ferramentas simples e úteis ao

engenheiro, que possibilitam estimar a vida em fadiga de componentes na região de alto ciclo. Pode-se estimar a curva S-N na região de alto ciclo por meio das estimativas da resistência à fadiga correspondentes às vidas de 10^3 e 10^6 ciclos. Além disso, se o componente ou condição de carregamento em questão for diferente das condições padronizadas do ensaio S-N, é necessário aplicar fatores de correção (ou fatores de modificação), relacionados ao tipo de carregamento (C_L), tamanho da peça (C_D), acabamento da superfície (C_S), existindo também um fator relacionado ao nível de confiabilidade (C_R). A Figura 2 ilustra os efeitos de tais fatores na curva S-N. Note que, nesta figura, o valor de S_{1000} foi alterado apenas pelo fator de confiabilidade C_R , ao passo que o limite de fadiga a 10^6 ciclos foi modificado por todos os fatores de correção citados. O limite de fadiga pode ainda ser negativamente afetado por outros fatores, como sobrecargas, temperatura e corrosão. Para carregamentos de amplitude variável com sobrecargas periódicas, dois métodos (Miner e Miner-Haibach) propõem estender a curva S-N para vida acima de 10^6 ciclos, de modo a levar em conta o fato de que tensões abaixo do limite de fadiga podem também causar dano neste caso.

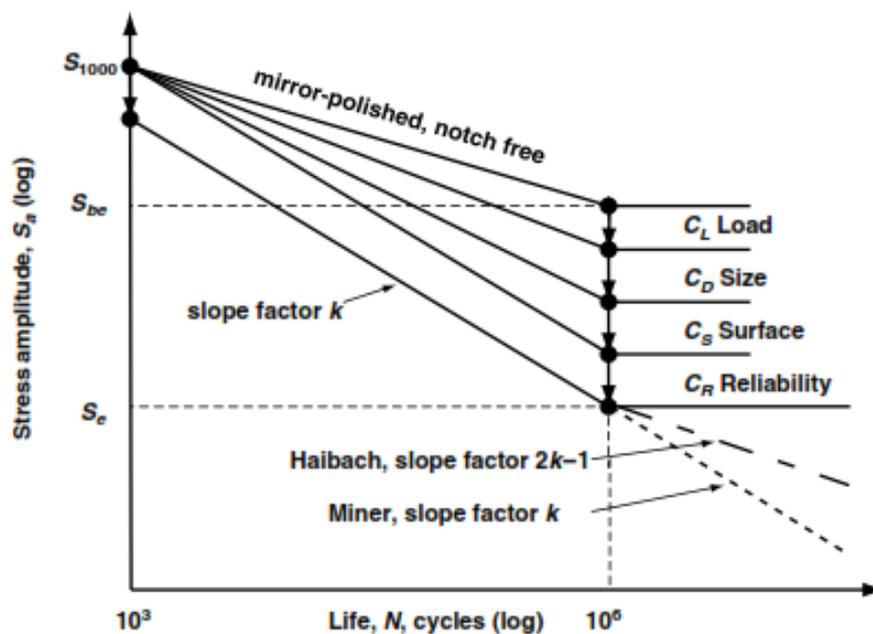


Figura 2. Curvas S-N modificadas pelos fatores de correção.

A metodologia proposta para estimar a curva S-N baseia-se no conhecimento da resistência à tração do material. Caso não seja possível realizar ensaios de tração para determinar S_u , esta também poderá ser estimada, com base em medidas de dureza, por exemplo. O primeiro ponto a ser estimado é a resistência à fadiga em 10^3 ciclos, ou seja, o valor de S_{1000} . Empiricamente, este valor fica em 90% de S_u para flexão e 75% de S_u se o carregamento for axial. Para carregamentos em torção, o valor de S_{1000} é estimado como 90% da resistência ao cisalhamento do material (obtida num ensaio de torção). Esta última depende do material e pode ser aproximada como 80%, 70% ou 130% da resistência à tração para aços, metais não ferrosos e ferro fundido, respectivamente. As estimativas para S_{1000} são sumarizadas na Tabela 1. No entanto, devido à dispersão estatística do comportamento em fadiga, o valor estimado de S_{1000} para a curva básica deve ser modificado para levar em conta o nível de confiabilidade desejado. É claro que, sem dispor dos resultados de ensaios de fadiga, não é possível realizar uma análise estatística rigorosa. No entanto, fatores de correção para diferentes níveis de confiabilidade podem ser aplicados para modificar o valor de S_{1000} . Esses fatores de correção sugeridos são apresentados na Tabela 2. A resistência à fadiga

corrigida pelo nível de confiabilidade é dada então pela equação (3). É importante salientar que os mesmos fatores de correção para o nível de confiabilidade aplicam-se também às estimativas do limite de fadiga em 10^6 ciclos.

$$S_{1000,R} = S_{1000} \cdot C_R \quad (3)$$

Tabela 1. Estimadores para S_{1000} .

Type of Material	Type of Loading	S_{1000}
All	Bending	$0.9 \times S_U$
All	Axial	$0.75 \times S_U$
Steel	Torsion	$0.9 \times S_{UT} = 0.72 \times S_U$
Nonferrous	Torsion	$0.9 \times S_{UT} = 0.63 \times S_U$
Cast iron	Torsion	$0.9 \times S_{UT} = 1.17 \times S_U$

Tabela 2. Fatores de Confiabilidade C_R .

Reliability	C_R
0.50	1.000
0.90	0.897
0.95	0.868
0.99	0.814
0.999	0.753
0.9999	0.702
0.99999	0.659
0.999999	0.620

O segundo ponto a ser estimado é o limite de fadiga a 10^6 ciclos. A Figura 3 mostra a relação entre o limite de fadiga em flexão rotativa S_{be} e o limite de resistência à tração para aços, indicando um valor de aproximadamente 0,5 se o aço tem resistência à tração menor que 1.400 MPa. Para aços com resistência à tração acima de 1.400 MPa, o limite de fadiga pode ser estimado como 700 MPa. A condição microestrutural do material também afeta a relação entre o limite de fadiga e a resistência à tração, como mostra a Tabela 3. O limite de fadiga S_e pode então ser estimado modificando a estimativa do limite de fadiga em flexão rotativa com os fatores de correção já citados, conforme mostrado na equação (4). Lembre que esses fatores são valores empíricos, que usualmente variam entre 0 e 1.

$$S_{e,R} = S_{be} \cdot C_L \cdot C_S \cdot C_D \cdot C_R \quad (4)$$

Uma interpretação do limite de fadiga, considerando o dano em fadiga para carregamentos de amplitude constante, pode ser dada da seguinte forma: Após nuclear devido ao carregamento cíclico, uma microtrinca cresce até o tamanho da ordem de um grão, quando então um contorno de grão irá impedir o crescimento subsequente. Se o contorno de grão não constitui uma barreira suficientemente forte, a microtrinca eventualmente irá propagar e se tornar uma macrotrinca, podendo levar à falha. Se o contorno de grão se constitui numa barreira forte o suficiente, a microtrinca não cresce. A amplitude mínima da tensão necessária para que a trinca supere esta barreira e continue a crescer é o limite de fadiga do material. A relação entre o limite de fadiga e o limite de resistência à tração pode ser examinada de uma

perspectiva microscópica. Para aços de média e alta resistência nos quais os defeitos (ou seja, inclusões, carbeto, nódulos de grafite, porosidade) são menores que o tamanho de grão, as trincas nucleiam e são barradas pelos contornos de grão. Neste caso, o limite de fadiga cresce de forma aproximadamente linear com o limite de resistência à tração (ver Figura 3). Quando um valor crítico da resistência à tração é atingido, o limite de fadiga ou permanece constante ou diminui com o aumento da resistência à tração. Este fenômeno é atribuído aos defeitos do material. Por exemplo, a têmpera de um aço de alta resistência para produzir um alto desempenho com relação ao desgaste pode introduzir microtrincas e promover o trincamento intergranular, que são prejudiciais para o limite de fadiga.

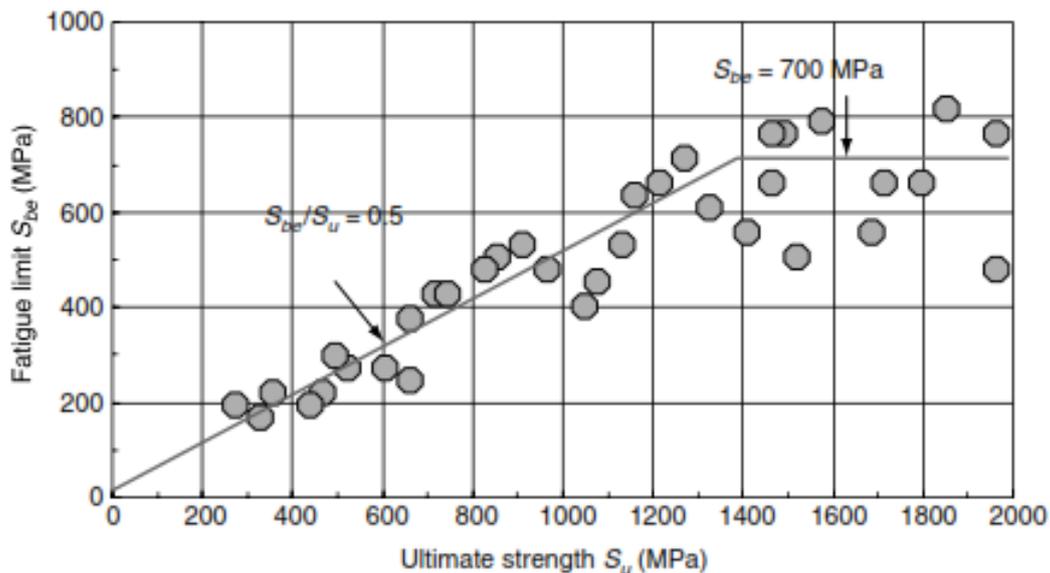


Figura 3. Resistência à fadiga para 10^6 ciclos para aços forjados.

Tabela 3. Estimativas do limite de fadiga em flexão para vários materiais.

	S_{be}	@ Cycles	Comments
<i>Type of Material</i>			
<i>Microstructure of Steels</i>			
Steel - Ferrite	$0.58 \times S_u$	10^6	
Steel - Ferrite + Pearlite	$0.38 \times S_u$	10^6	
Steel - Pearlite	$0.38 \times S_u$	10^6	
Steel - Untempered martensite	$0.26 \times S_u$	10^6	
Steel - Highly tempered Martensite	$0.55 \times S_u$	10^6	
Steel - Highly Tempered Martensite + Tempered Bainite	$0.5 \times S_u$	10^6	
Steel - Tempered Bainite	$0.5 \times S_u$	10^6	
Steel - Austenite	$0.37 \times S_u$	10^6	
<i>Type of Material</i>			
Wrought Steels	$0.5 \times S_u$	10^6	$S_u < 1400$ MPa
Wrought Steels	700 MPa	10^6	$S_u \geq 1400$ MPa
Cast iron	$0.4 \times S_u$	5×10^7	-
Aluminum alloys	$0.4 \times S_u$	5×10^8	$S_u < 336$ MPa
Aluminum alloys	130 MPa	5×10^8	$S_u \geq 336$ MPa
PM cast aluminum	80 MPa	5×10^8	-
Sand cast aluminum	55 MPa	5×10^8	-

Tipo de carregamento: Os dados básicos de fadiga historicamente referem-se a ensaios de flexão rotativa. Caso o componente real esteja submetido a outras condições de carregamento, o limite de fadiga deve ser modificado. Por exemplo, para carregamento uniaxial, o valor de C_L varia entre 0,7 e 0,9. A diferença entre carregamento axial e em flexão é consequência do gradiente de tensão que existe no carregamento em flexão. No caso de carregamento axial, considera-se que toda a seção transversal está submetida à mesma tensão máxima e como consequência apresenta condições mais favoráveis ao início de uma trinca. Assim, a resistência à fadiga em carregamento axial é menor do que em carregamento de flexão. Valores do fator de correção para o tipo de carregamento são apresentados na Tabela 4 e ilustrados na Figura 4.

Tabela 4. Fatores de carregamento C_L .

Type of Loading	C_L	Comments
Pure axial loading	0.9	
Axial loading (with slight bending)	0.7	
Bending	1.0	
Torsional	0.58	For steels
Torsional	0.8	For cast iron

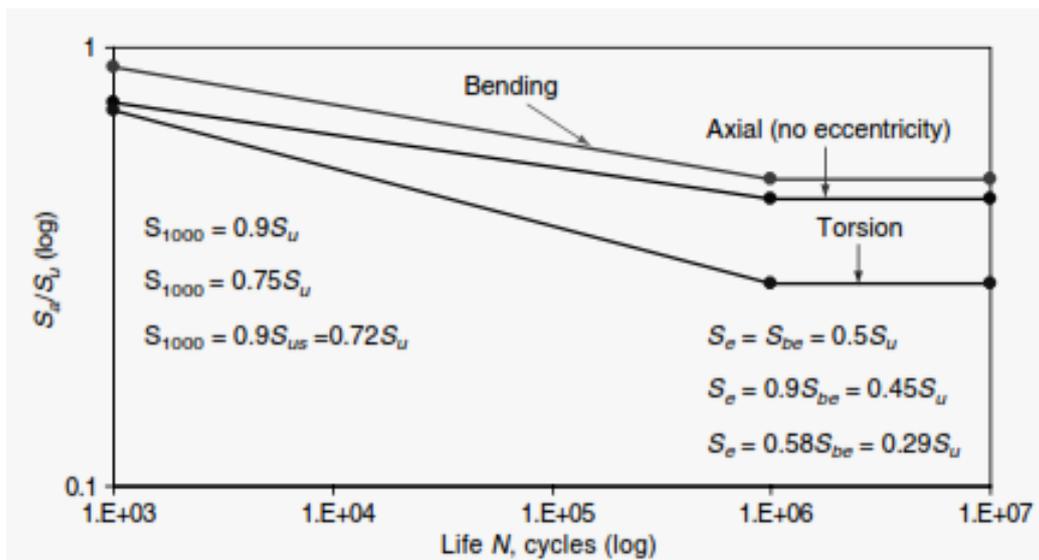


Figura 4. Curvas S-N para diferentes carregamentos.

Acabamento da superfície: As trincas de fadiga iniciam-se predominantemente (mas nem sempre) na superfície da peça. Por isso, a condição da superfície é um fator crítico para a resistência à fadiga. Esta condição pode ser caracterizada por dois fatores: i) rugosidade e outras irregularidades e ii) tensões residuais na camada superficial. Tratamentos de superfície são usados para induzir tensões residuais. Alguns processos, como os tratamentos termoquímicos e eletrodeposição podem alterar as propriedades da camada superficial dos materiais. A Figura 5 é um ábaco empírico usado para determinar o efeito do acabamento da superfície (C_S) na resistência à fadiga de aços em função de medidas da rugosidade. A Figura 6 é usada para estimar os fatores de superfície com base no processo de manufatura. Em geral, o efeito da superfície é mais crítico para aços de alta resistência e para a região de alto ciclo,

onde a iniciação da trinca domina a vida em fadiga. Em vidas curtas, o efeito do acabamento da superfície na resistência à fadiga é mínimo.

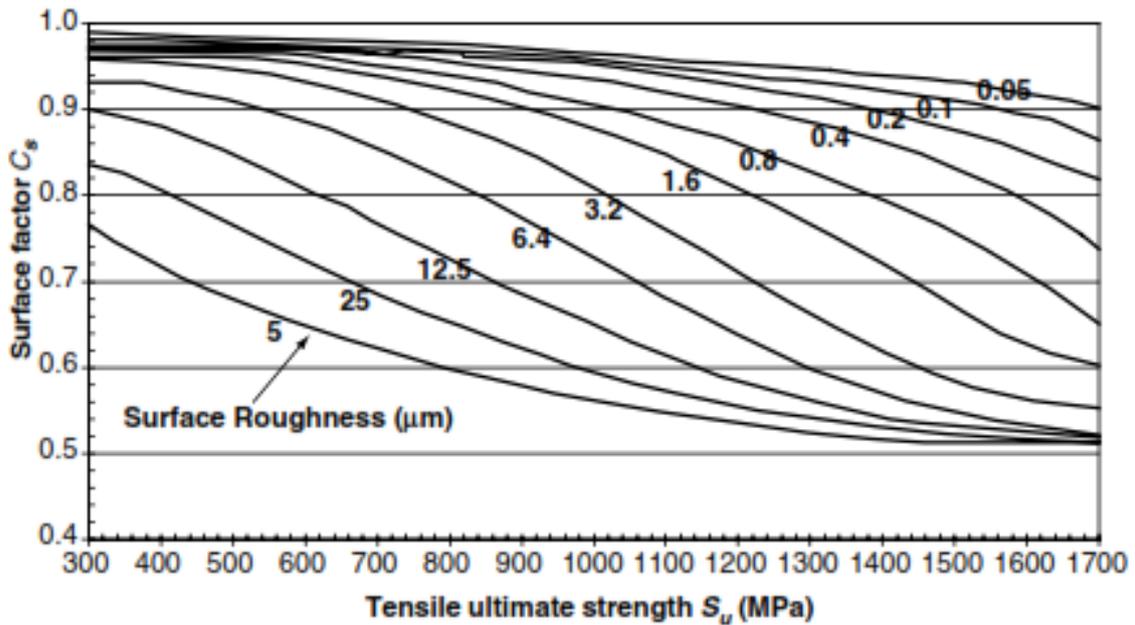


Figura 5. Efeito da rugosidade na resistência à fadiga.

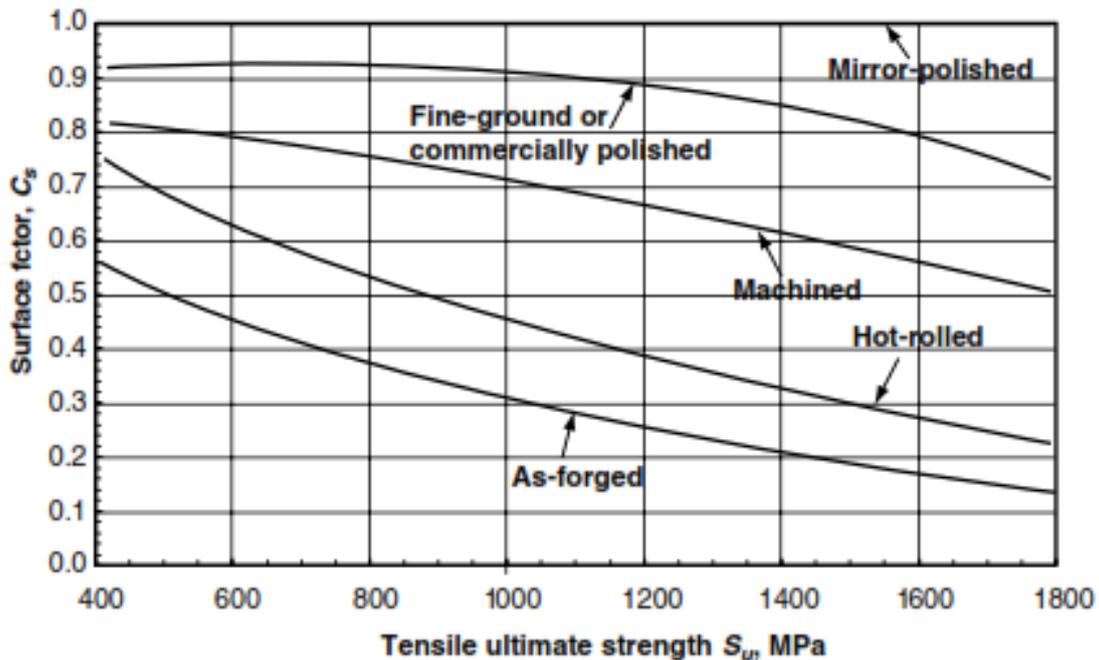


Figura 6. Efeitos do processamento na resistência à fadiga.

Efeito de tamanho: O efeito do tamanho na resistência à fadiga pode ser entendido com base na teoria do volume crítico de Kuguel, que diz que o dano em fadiga pode ser relacionado com o volume do material sujeito à faixa de tensão crítica, tomada como 95 a 100% da tensão máxima aplicada. Por exemplo, para a mesma tensão máxima em flexão, à medida em que o diâmetro da amostra aumenta, um maior volume de matéria estará sujeito à faixa de tensão crítica. Isto resulta em um dano em fadiga maior e conseqüentemente em uma

vida em fadiga menor do que numa peça de menor diâmetro. A descrição quantitativa do fator de tamanho para componentes cilíndricos sob flexão e torção é ilustrada na Figura 7 e expressa pelas equações (5) e (6). Para um componente sujeito a cargas axiais, o gradiente de tensão macroscópico não existe. Neste caso, poder-se-ia supor que a resistência à fadiga para peças maiores seria menor que para componentes pequenos (porque o volume de material é maior). No entanto, resultados experimentais indicaram que o efeito de tamanho é mínimo para componentes axialmente carregados. Assim, o valor $C_D = 1,0$ é recomendado. Para situações em que a peça não é cilíndrica, deve-se estimar um diâmetro efetivo com base na área de material da seção transversal solicitada com tensões iguais ou acima de 95% da tensão máxima aplicada.

$$C_D = 1,0, \text{ para } d < 8\text{mm} \quad (5)$$

$$C_D = 1,189 \cdot d^{-0,097}, \text{ para } 8 < d < 250\text{mm} \quad (6)$$

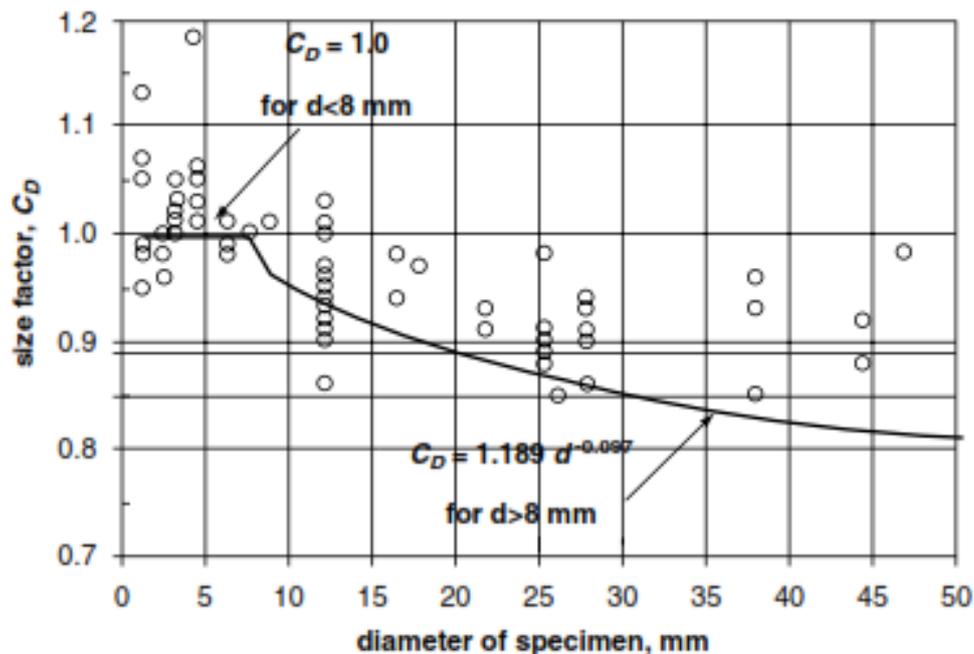


Figura 7. Efeito do tamanho na resistência à fadiga.

BIBLIOGRAFIA

LEE, Y.L.; PAN, J.; HATHAWAY, R.B.; BARKEY, M.E. “Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice”. Amsterdam: Elsevier, 402p., 2005.