

PARTE II FALHA POR DE FADIGA resultante de carregamento variável

1. Introdução

Definição: Se chama fadiga o fenômeno que a ruptura ocorre enquanto a tensão causada por uma repetida é bem baixo da tensão de ruptura (comumente abaixo da tensão de escoamento obtida com carregamento estático).

A fadiga é uma redução gradual da capacidade de carga do componente, pela ruptura lenta do material, conseqüência do avanço quase infinitesimal das fissuras que se formam no seu interior. Este crescimento ocorre para cada flutuação do estado de tensões. As cargas variáveis, sejam cíclicas ou não, fazem com que, ao menos em alguns pontos, tenhamos deformações plásticas também variáveis como tempo. Estas deformações levam o material a uma deterioração progressiva, dando origem à trinca, a qual cresce até atingir um tamanho crítico, suficiente para a ruptura final, em geral brusca, apresentando características macroscópicas de uma fratura frágil.

Figuras 6-1, 6-3 até 6-7 Ilustram algumas peças falhadas por fadiga.

Figura 6-1

Falha por fadiga de um parafuso de porca em razão de flexão unidirecional repetida. A falha começou na raiz da rosca em A, propagou-se ao longo da maior parte da seção transversal como evidenciado pelas marcas de praia em B, antes da fratura rápida final em C.

(Extraído do ASM Handbook, vol. 12: Fractography, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, figura 50, p. 120. Reimpressa com permissão da ASM Internacional®, www.asminternational.org).

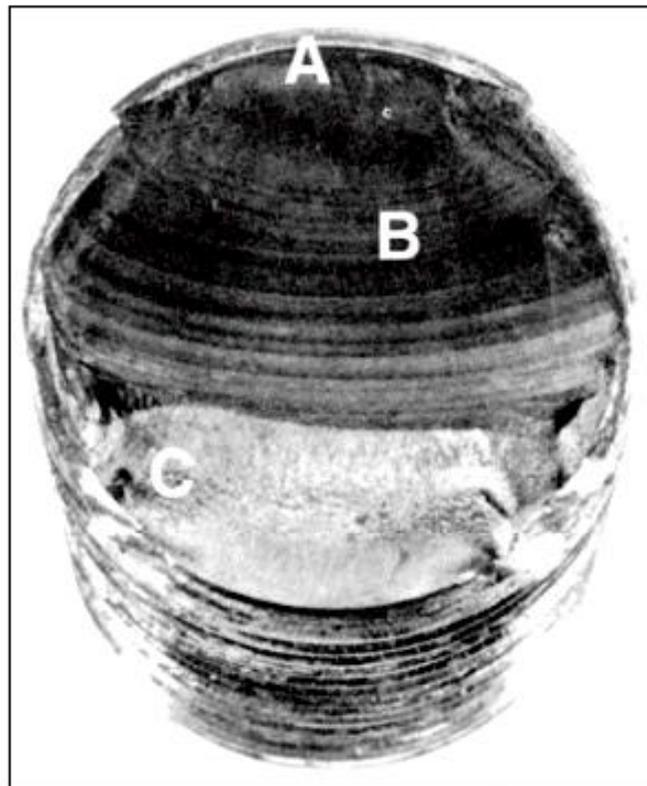


Figura 6-3

Fratura por fadiga de um eixo motor de aço AISI 4320. A falha por fadiga iniciou na extremidade de chaveta nos pontos B e progrediu até a ruptura final em C. A zona de ruptura final é pequena, indicando que as cargas eram baixas. (Extraído do ASM Handbook, vol. 11: Failure Analysis and Prevention, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, figura 18, p. 111. Reimpresso com permissão da ASM International®, www.asminternational.org.)

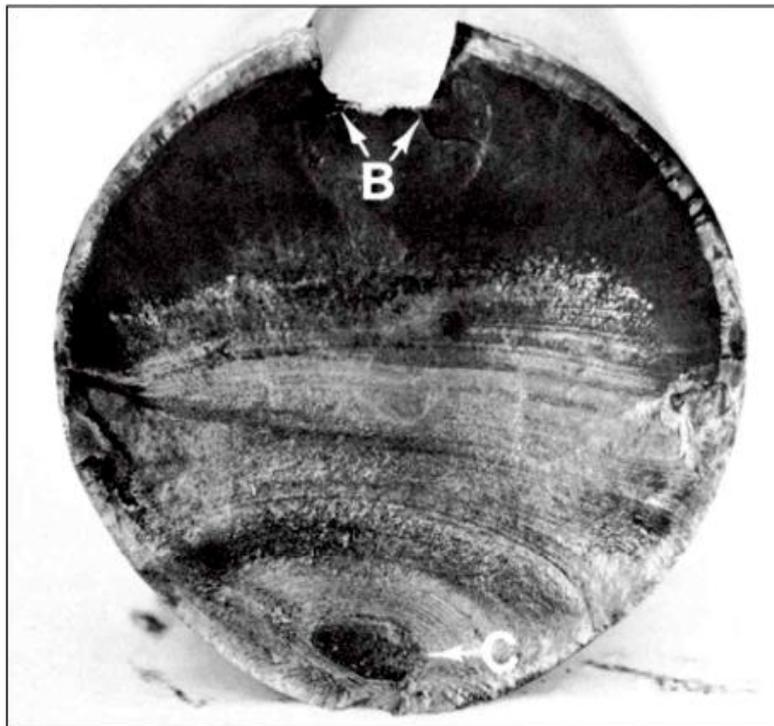


Figura 6-4

Superfície de fratura por fadiga de um pino de aço AISI 8640. Cantos vivos de orifícios de graxa desencontrados proporcionaram concentrações de tensão que iniciaram duas trincas de fadiga indicadas pelas setas. (Extraído do ASM Handbook, vol. 12: Fractography, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, figura 520, p. 331. Reimpresso com permissão da ASM International®, www.asminternational.org.)

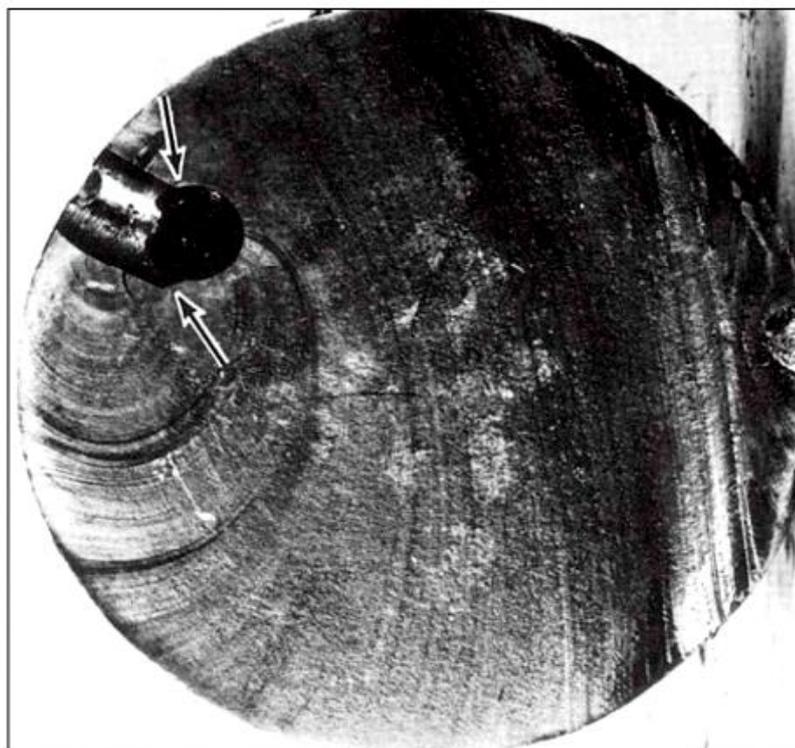


Figura 6-5

Superfície de fratura por fadiga de uma barra conectora forjada de aço AISI 8640. A origem da trinca por fadiga está na borda esquerda, na linha de rebarbas do forjamento, mas nenhuma aspereza incomum de aparas de rebarbas foi indicada. A trinca por fadiga progrediu meio caminho ao redor do furo de óleo à esquerda, indicado pelas marcas de praia, antes que a fratura rápida final ocorresse. Observe o lábio pronunciado de cisalhamento na fratura final na borda direita. (Extraído do ASM Handbook, vol. 12: Fractography, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, figura 523, p. 332. Reimpresso com permissão da ASM International®, www.asminternational.org.)

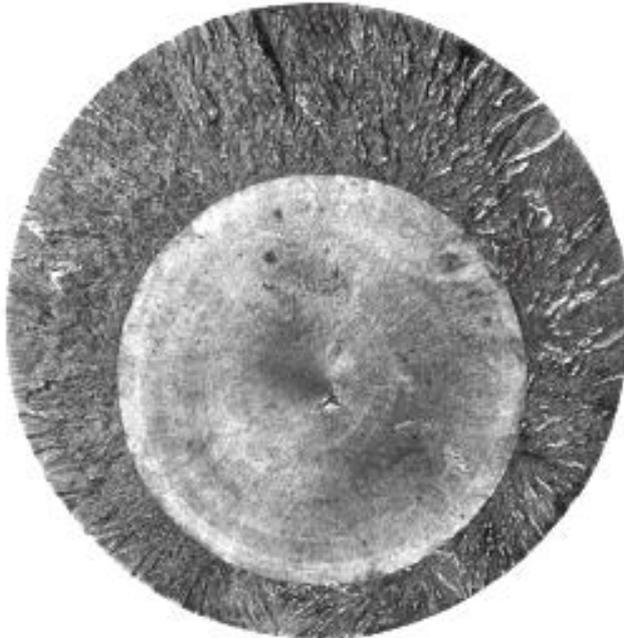
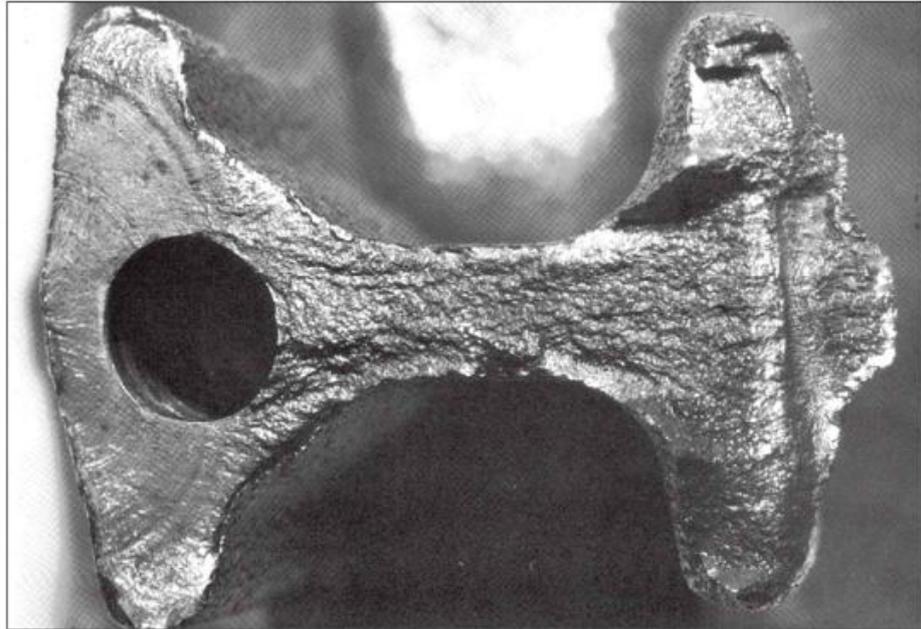


Figura 6-6

Superfície de fratura por fadiga de uma barra de pistão, de diâmetro de 200 mm (8 in) de um martelo de vapor de liga de aço, usada em forja. Este é um exemplo de uma fratura por fadiga causada por tração pura em que concentrações de tensão superficial estão ausentes e uma trinca pode iniciar-se em qualquer lugar na seção transversal. Neste exemplo, a trinca inicial formouse em um fragmento de forjamento ligeiramente abaixo do centro, cresceu para fora simetricamente e, por fim, produziu uma fratura frágil sem aviso. (Extraído do ASM Handbook, vol. 12: Fractography, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, figura 570, p. 342. Reimpresso com permissão da ASM International®, www.asminternational.org.)

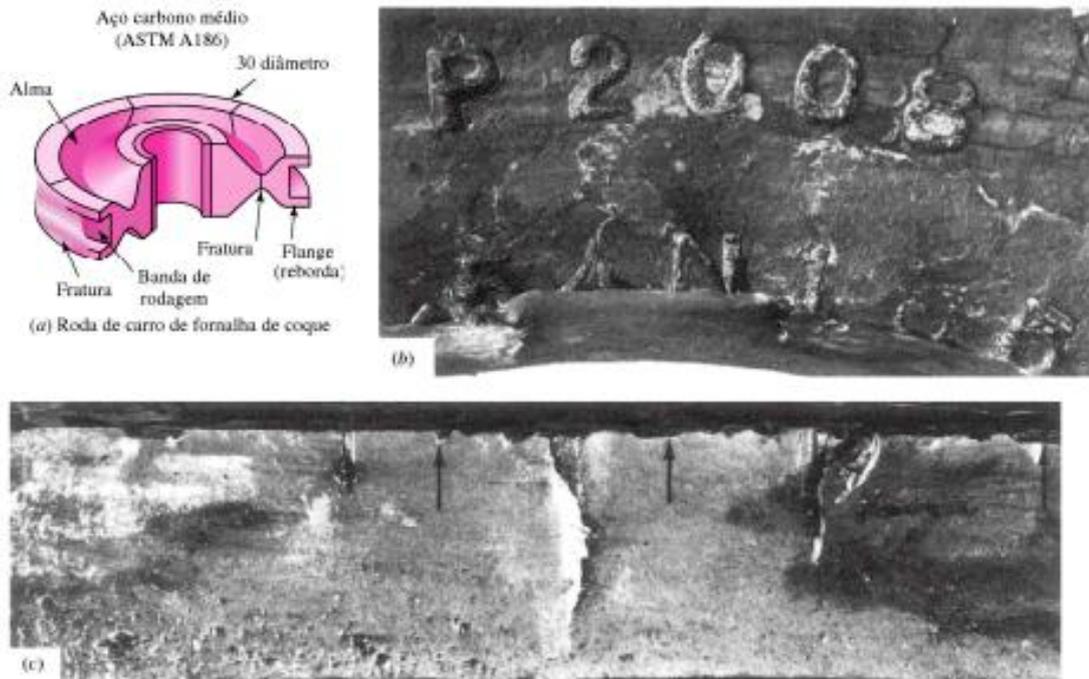


Figura 6-7

Falha por fadiga de uma roda de reboque de flange dupla, de aço ASTM A186, causada por marcas de estampo. (a) Roda de carro feita em fornalha de coque mostrando a posição de marcas do estampo e fraturas na alma e nervura. (b) Marca do estampo mostrando a impressão profunda e a fratura estendendo-se ao longo da base da fila inferior de números. (c) Entalhes, indicados por meio de flechas, criadas a partir do marcas profundamente endentadas do estampo, das quais as trincas se iniciaram ao longo do topo na superfície de fratura.

[Extraído do ASM Handbook, vol. 11: Failure Analysis and Prevention, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, figura 51, p. 130. Reimpresso com permissão da ASM International®, www.asminternational.org.]

Figura 6-8

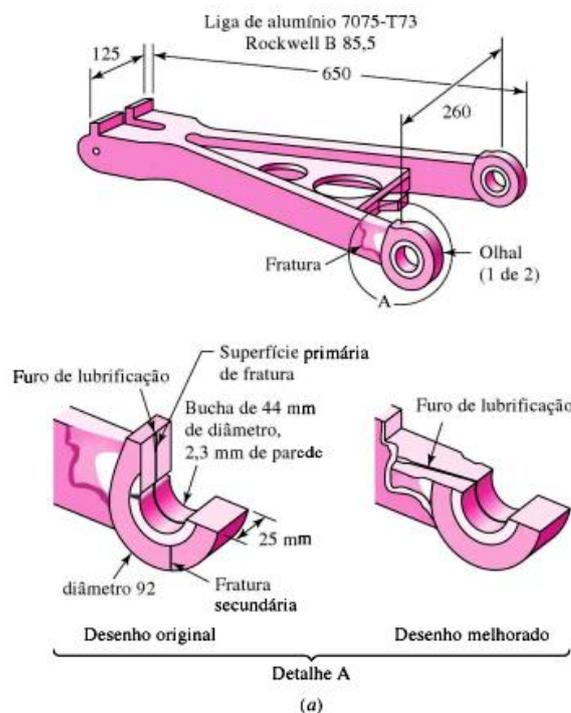
Redesenho do conjunto do braço de torque da engrenagem de pouso de liga de alumínio 7075-T73 a fim de eliminar fratura de fadiga no furo de lubrificação.

(a) Configuração do braço, projeto original e melhorado (dimensões dadas em polegadas).

(b) Superfície de fratura na qual as flechas indicam origens de múltiplas trincas.

[Extraído do ASM Handbook, vol. 11: Failure Analysis and Prevention, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, figura 23, p. 114.

Reimpresso com permissão da ASM International®, www.asminternational.org.]



O número de ciclos de carregamento que pode ocorrer durante a vida útil de uma peça é muito variável.

EXEMPLO 6.1 Vaso de pressão, cada mês carrega e descarrega uma vez (1 ciclo). Supor a vida útil é 20 anos, então, o número de ciclos é 240.

EXEMPLO 6.2 Implemento agrícola: 50 dias por ano a ser usado e duas vezes cada dia. Então 1000 vezes à sobre carga por 10 anos de vida útil.

EXEMPLO 6.3 A vida de uma mola elástica de suspensão de automóvel é projetada em ordem de 200.000 ciclos para carga máxima esperada em serviço = 50 ciclos por dia para uma vida de 10 anos.

EXEMPLO 6.4 O eixo de um motor elétrico a 1750 rpm é usado intensamente 50 horas semanais, então, $2,7 \times 10^9$ ciclos ao longo de 10 anos de vida.

2. Nucleação de trincas

O mecanismo de nucleação de micro trincas (Figura 9):

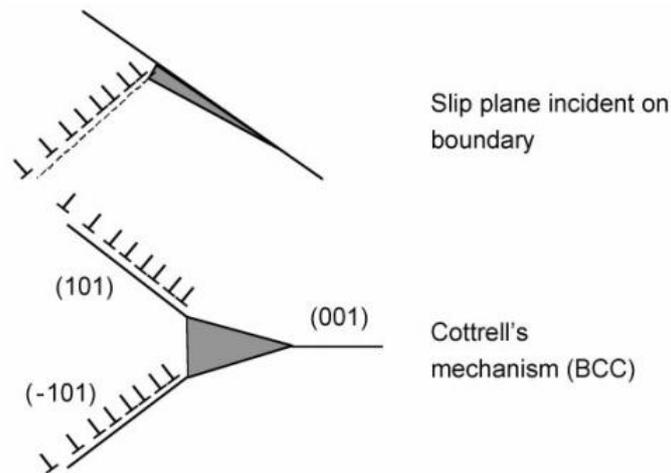
(a) Ruptura de inclusões ou expelidos de base e de inclusões (mais casos de material frágil);

(b) Retardamento de discordâncias nos contornos de cristalinas (casos de material dúctil);

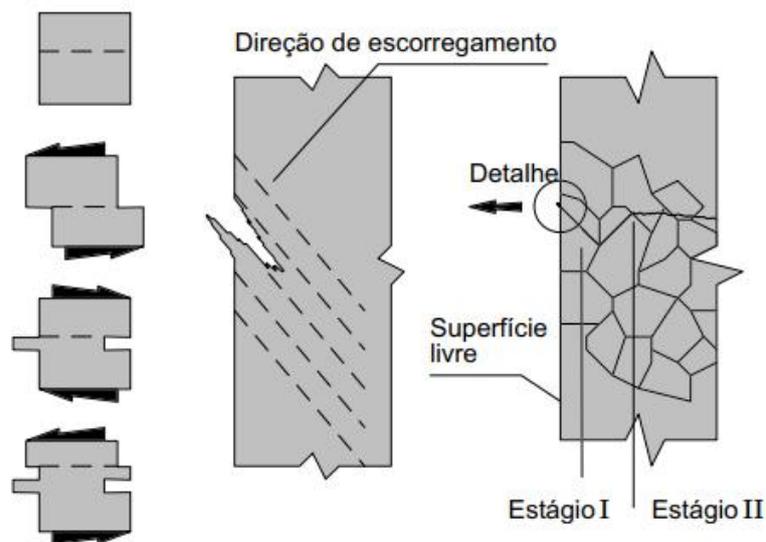
(c) Deslizamento da superfície (casos de material dúctil);.



(a) Inclusão quebra ou expelida da base



(b) retardamento de discordância nos contornos de cristalinas



(c) Formação das bandas de deslizamento pela solitação cíclica e seu aspecto.

Estágios de propagação de uma trinca de fadiga.

Figura 9 Mecanismos de nucleação de micro trincas

Desenvolvimento da fratura por fadiga (materiais dúctis): deslizamento de superfície de metal -> nucleação de micro trincas -> propagação das micro trincas ($a < 0,05$ mm) -> propagação das macro trincas ($a > 0,05$ mm) -> fratura de peça.

2. Curva tensão-deformação cíclica

No caso da fadiga, o efeito do tipo de controle no ensaio é mais importante do que no caso de ensaio estático de tração. Há dois tipos de controle típico:

(i) Controle de força (ou tensão): deformação é a resposta mecânica do material naturalmente.

(ii) Controle de deslocamento (deformação).

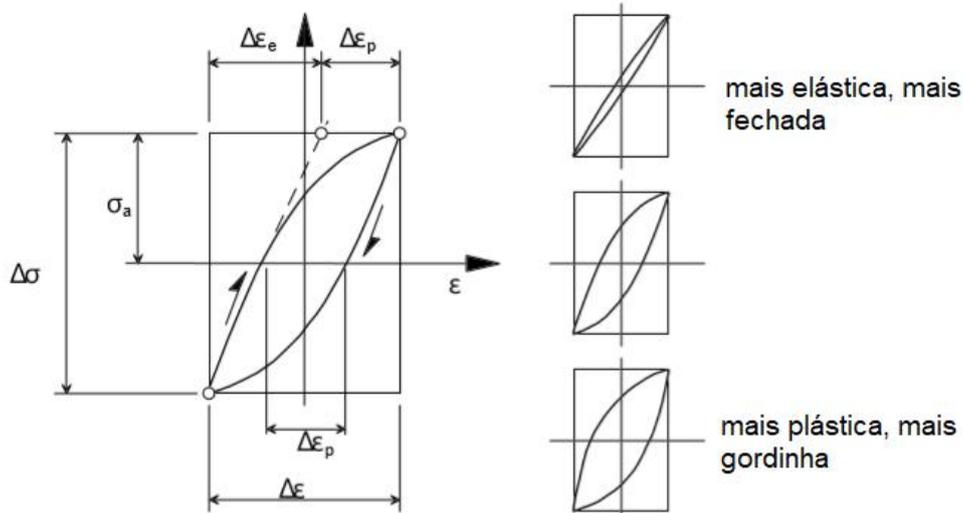


Figura 10 Esquema de um laço de histerese típico com os parâmetros envolvidos.

Exemplo de laços com idênticos $\Delta\sigma$ e $\Delta\epsilon$.

$$\Delta\sigma = 2\sigma_a \quad (1)$$

$$\Delta\epsilon_e = \Delta\sigma/E \quad (2)$$

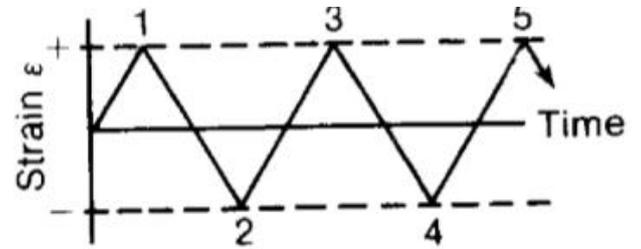
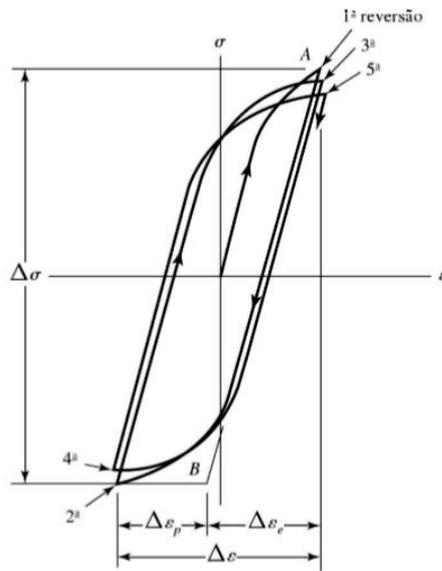
$$\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_p \quad (3)$$

ou
$$\Delta\epsilon_p = \Delta\epsilon - \Delta\epsilon_e \quad (4)$$

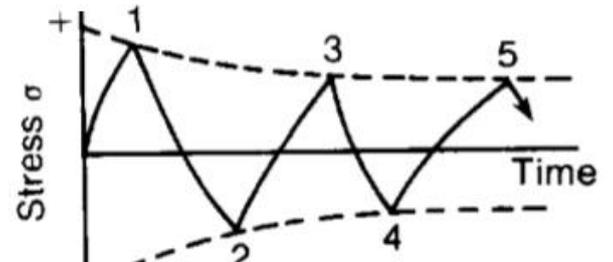
Figura 6-12 foi construída para mostrar a aparência geral de gráficos de **tensão-deformação cíclica** para os primeiros poucos ciclos de deformação cíclica controlada. Nesse caso, a resistência decresce com as repetições de tensão (amolecimento), o que foi evidenciado pelo fato de que as reversões ocorrem em níveis de tensão sempre menores. Como previamente notamos, outros materiais podem, pelo contrário, ser enrijecidos por reversões cíclicas de tensão (encruamento).

Figura 6-12

Os ciclos de histerese da tensão verdadeira – deformação verdadeira mostrando as primeiras cinco reversões de tensão de um material com amolecimento cíclico. O gráfico está ligeiramente exagerado para dar clareza. Note que a inclinação da linha AB é o módulo de elasticidade E . O intervalo da tensão é $\Delta\sigma$, $\Delta\epsilon_p$ é o intervalo de deformação plástica e $\Delta\epsilon_e$ é o intervalo de deformação elástica. O intervalo total de deformação é $\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_p + \Delta\epsilon_e$.



Controle de deformação



Amolecimento

A curva tensão-deformação cíclica da maioria dos materiais usados em Engenharia pode ser descrita pelo *modelo com encruamento potencial*, ou seja,

$$\Delta\sigma/2 = k'(\Delta\epsilon_p/2)^{n'} \quad (5)$$

sendo k' o coeficiente de resistência cíclica e n' o expoente de encruamento cíclico, obtidos experimentalmente. A deformação plástica é obtida da equação (5),

$$\Delta\epsilon_p/2 = (\Delta\sigma/2k')^{1/n'} \quad (6)$$

onde temos

$$\Delta\epsilon_e/2 = \Delta\sigma/(2E) \quad (7)$$

e, pela (3) resulta

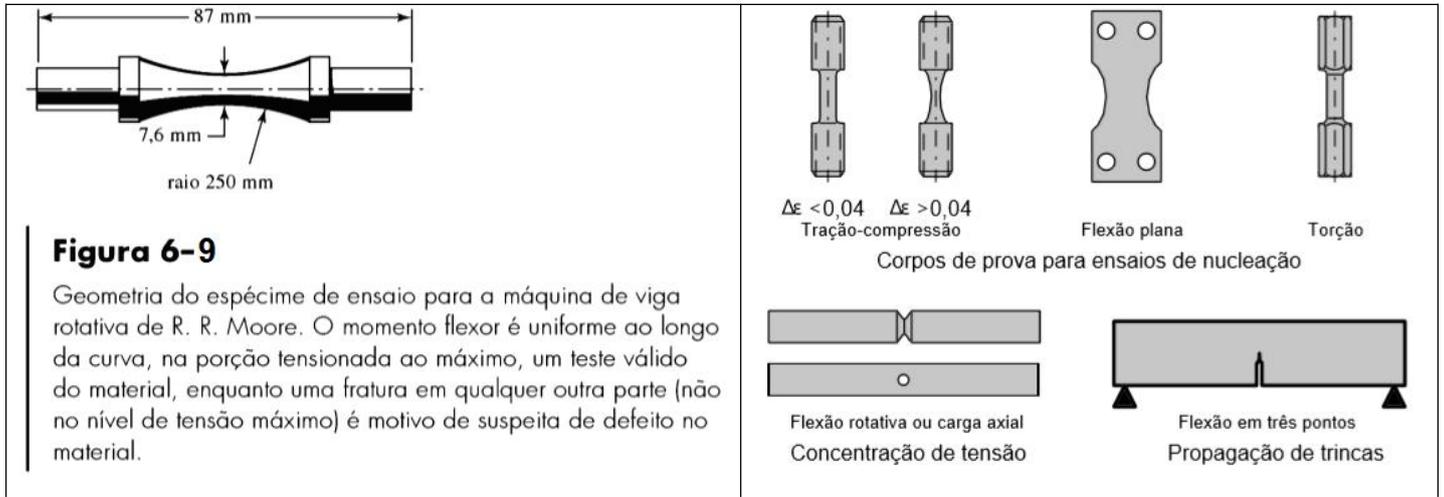
$$\Delta\epsilon/2 = \Delta\sigma/(2E) + (\Delta\sigma/2k')^{1/n'} \quad (8)$$

3. Resistência à fadiga dos materiais

Em qualquer projeto quanto à fadiga, um dos pontos fundamentais é determinar, seja experimentalmente ou não, a resistência a fadiga do material.

3.1 Corpo de prova

Um dos corpos principais de prova é mostrado na Figura 6-10, que deve ser cuidadosamente usinado e polido, com um polimento final em uma direção axial para evitar riscos circunferenciais.



3.2 Dispositivos de ensaio de resistência a fadiga do material

Figura 13 mostra alguns dispositivos de ensaio de resistência a fadiga do material.

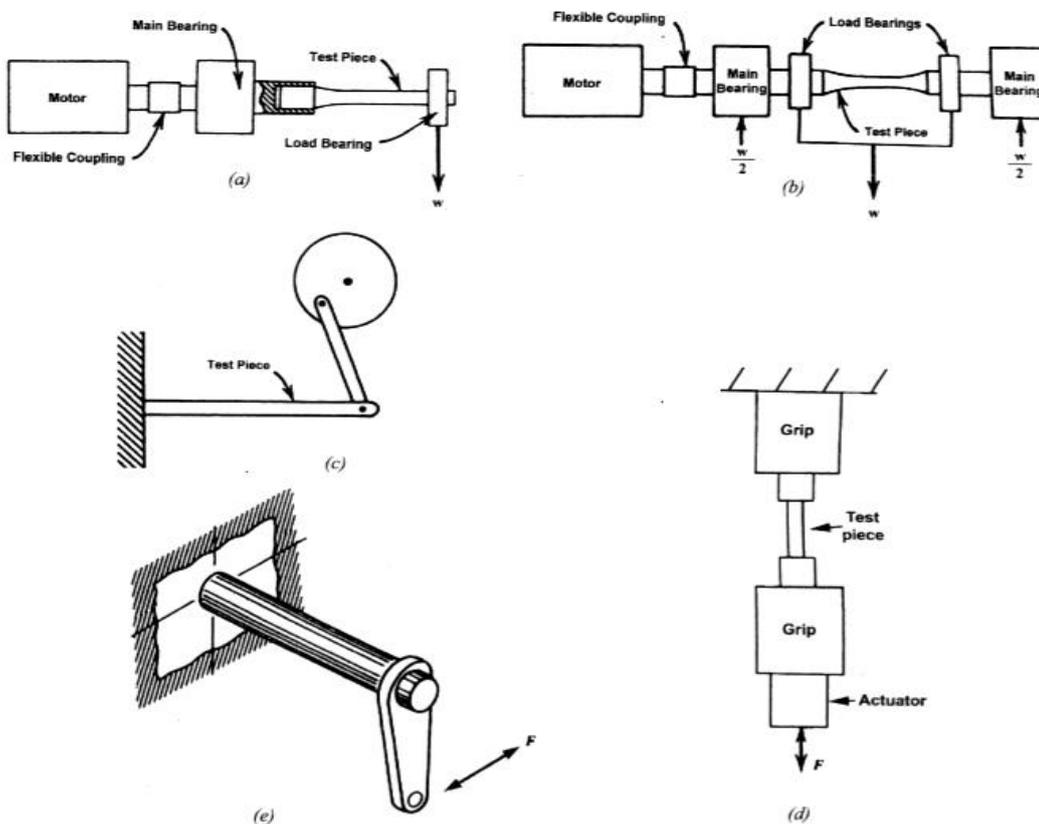


Figura 13

Dispositivos de ensaio de resistência a fadiga do material. (a) Viga em balanço com rotação e flexão; (b) Rotação com flexão pura; (c) Viga em balanço com manivela excêntrica; (d) carregamento axial; (e) combinação de torção e flexão

3.3 Carregamentos cíclicos

Os primeiros ensaios de fadiga para pesquisar a resistência a carregamentos cíclicos foram feitos com corpos de prova de seção circular, submetidos a esforços de flexão e postos a girar. Contando-se o número de rotações até a ruptura do corpo de prova, temos o número de ciclos que o material suportou, até a falha, correspondente ao nível de tensão cíclica atuante. Neste tipo de ensaio, embora a carga seja constante, a tensão varia senoidalmente com o tempo, devido a rotação do corpo de prova, conforme mostra pela Figura 14. Em outras situações a tensão varia ciclicamente sobre um valor de tensão média que não é zero, fazendo com que a alternância não seja simétrica. Isto faz com que seja necessário considerar não só a influência da amplitude da tensão alternante, como também a intensidade da tensão média sobre a resistência à fadiga. A nomenclatura adotada para identificar as tensões atuantes neste caso está ilustrada na Figura 6-15.

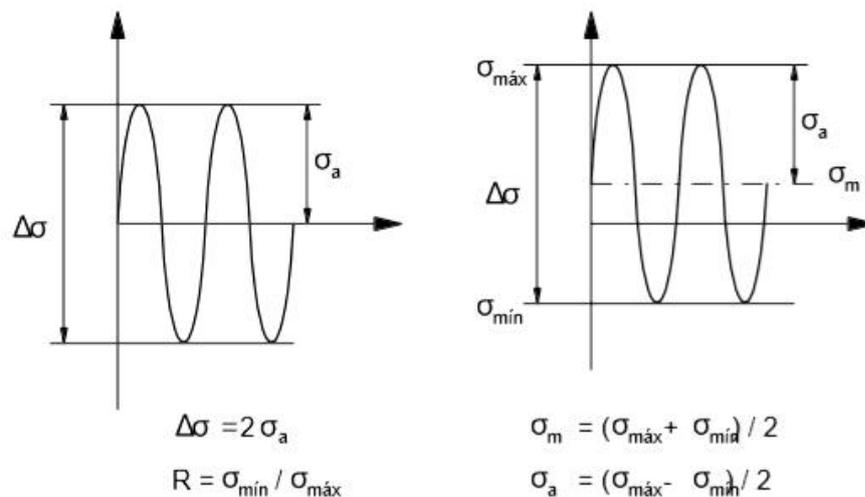


Figura 14- Variação da tensão em um ensaio de flexão rotativa e definição das tensões em um caso geral. R se chama fator de simetria de carga.

No ensaio da resistência a fadiga do material, a carga deve ser simétrica, ou seja, $R=-1$.

3.4 Método de tensão - Vida: Diagrama S-N do material sob controle de tensão

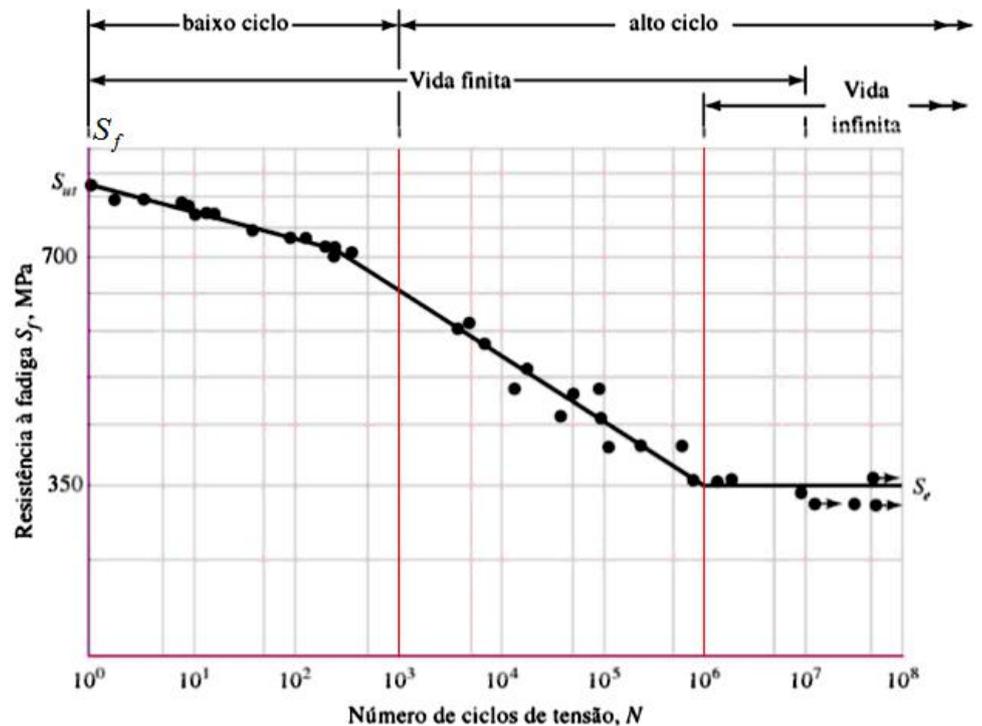
Para estabelecer a resistência à fadiga de um material, um número grande de testes é necessário por causa da natureza estatística da fadiga. Para o ensaio de viga rotativa, uma carga de flexão constante é aplicada, e o número de revoluções N da viga requerido até a falha é registrado. O primeiro ensaio é feito com uma tensão algo inferior à resistência última do material. O segundo teste é feito com

uma tensão menor que a utilizada no primeiro teste. O processo é continuado, e os resultados são traçados em um diagrama S-N (Figura 6-10). Esse diagrama pode ser traçado em papel semi log ou em papel log-log. No caso de metais ferrosos e ligas, o gráfico torna-se horizontal depois que o material tiver sido tensionado por certo número de ciclos. Traçando em papel log enfatiza-se a flexão na curva, que pode não ser aparente se os resultados forem traçados usando-se coordenadas cartesianas.

Figura 6-10

Diagrama S-N traçado com base nos resultados de ensaios de fadiga axial completamente reversa. Material: aço UNS G41 300, normalizado; $S_{ut} = 810$ MPa; máximo $S_{ut} = 105$ MPa. (Dados da NACA Tech. Nota 3866, dezembro 1966.)

A ordenada do diagrama S-N é chamada de Resistência à fadiga S_f .



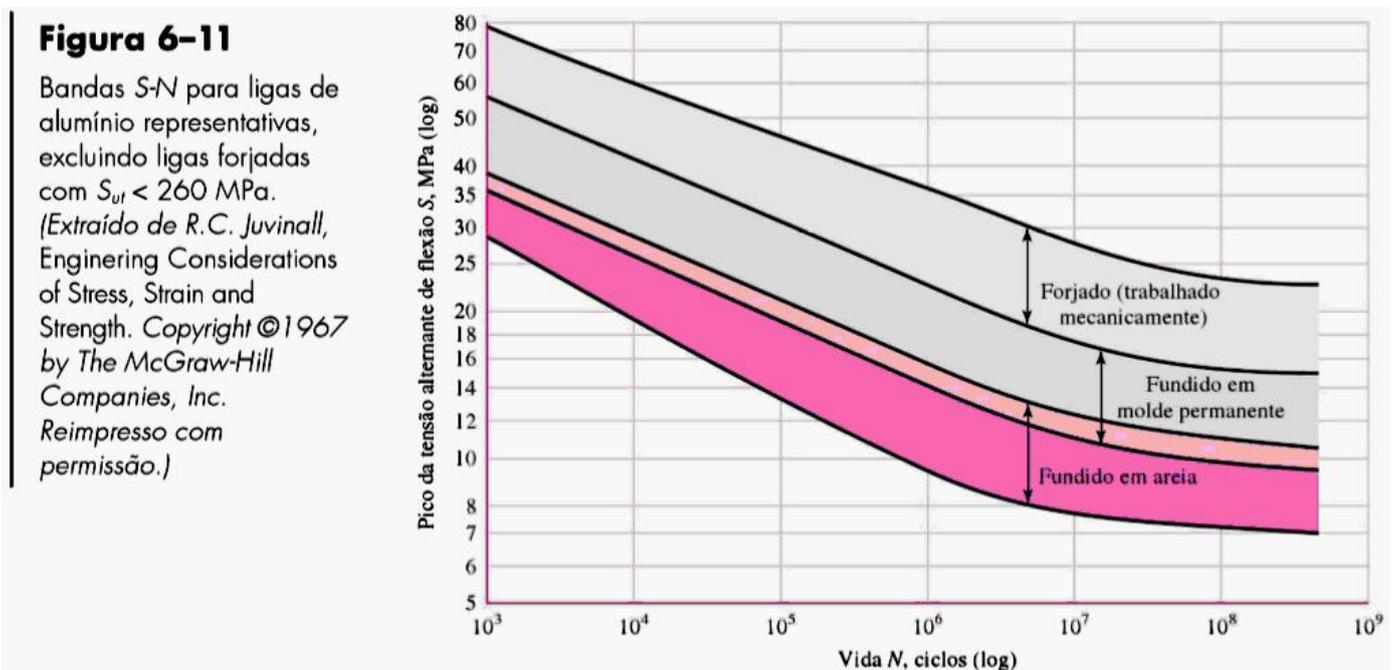
No caso de aços, ocorre **um joelho** no gráfico, e além desse joelho não ocorrerá falha, não importa quão grande seja o número de ciclos. **A resistência correspondente ao joelho é chamada de limite de endurance (ou limite de tensão à fadiga) S_e .**

Notamos que um ciclo de tensão ($N = 1$) constitui uma única aplicação e remoção de uma carga, e então outra aplicação e remoção da carga na direção oposta. Assim, $N = 1/2$ significa que a carga é aplicada uma vez e depois removida, que é o caso com um ensaio de tração simples.

O corpo de conhecimento disponível de falha por fadiga desde $N = 1$ até $N = 1000$ ciclos é geralmente classificado como **fadiga de baixo ciclo**, como indica a Figura 6-10. **Fadiga de alto ciclo**, está relacionada com falha correspondente a ciclos de tensão maiores que 10^3 ciclos.

Também distinguimos uma região de vida finita e uma região de vida infinita na Figura 6-10. A fronteira entre essas regiões não pode ser claramente definida exceto para um material específico; mas ela se situa em algum lugar entre 10^6 e 10^7 ciclos para aços, como mostra a Figura 6-10.

O gráfico da Figura 6-10 nunca se torna horizontal para metais não ferrosos ou ligas, portanto, esses materiais não têm um limite de endurance. Figura 6-11 mostra bandas de espalhamento indicando as curvas S-N para as ligas mais comuns de alumínio, excluindo ligas forjadas com resistência abaixo de 260 MPa. Uma vez que o alumínio não possui um limite de endurance, normalmente a resistência à fadiga S_f é reportada a um número específico de ciclos, em geral $N = 5 \times 10^8$ ciclos de tensão reversa completa (ver Tabela A-22).



Os termos comuns usados com o diagrama S-N são "Vida de fadiga", "Resistência à fadiga" e "Limite de tensão à fadiga". ASTM define:

(i) **Vida de fadiga N**: é o número de ciclos de tensão ou deformação de um carácter especificado que um dado corpo de prova sustenta antes que uma falha de uma natureza específica;

(ii) **Resistência à fadiga S_f** : é um valor hipotético de tensão na falha para exatos ciclos N determinados pelo diagrama S-N;

(iii) **Limite de tensão à fadiga ou Limite de endurance S_e** : é o valor limite da resistência mediana à de fadiga quando N é muito grande (maior que 10^6).

Todas as três definições são baseadas em valores medianos ou 50% sobre vivencia.

O método tensão-vida é o procedimento **menos acurado, especialmente para aplicações de baixa ciclagem**. Contudo, é o mais tradicional, com muitos dados disponíveis publicados. É o de mais fácil implementação para uma gama ampla de aplicações de projeto e representa aplicações de alta ciclagem adequadamente. Contudo, deve-se tomar cuidado ao utilizá-la em aplicações que envolvam baixa ciclagem, uma vez que esse método não leva em conta o comportamento tensão-deformação verdadeira quando o escoamento localizado ocorre.

3.4 Método de deformação - Vida do material sob controle de deformação

O melhor procedimento já apresentado para explicar a natureza da falha por fadiga é chamado por alguns de **método deformação-vida**. O procedimento pode ser usado para estimar resistências à fadiga, mas quando utilizado dessa forma faz-se necessário compor várias idealizações, assim, algumas incertezas existirão nos resultados.

Uma falha por fadiga quase sempre começa em uma descontinuidade local, tal qual um entalhe, uma trinca, ou outra área de concentração de tensão. Quando a tensão na descontinuidade excede o limite elástico, **ocorre deformação plástica**. Se uma fratura por fadiga está para acontecer, lá devem existir deformações plásticas cíclicas.

Pela teoria de Bauschinger, os limites elásticos do ferro e do aço podem ser mudados, quer para cima, quer para baixo, por variações cíclicas de tensão.” Em geral, os limites elásticos de aços recozidos devem provavelmente aumentar quando sujeitos aos ciclos de reversão de tensão, enquanto aços repuxados a frio exibem um limite elástico decrescente.

O SAE Fatigue Design and Evaluation Steering Committee publicou um relatório em 1975 no qual a vida em reversões até a falha está relacionada à amplitude da deformação $\Delta\epsilon/2$.

Figura 6-12

Os ciclos de histerese da tensão verdadeira – deformação verdadeira mostrando as primeiras cinco reversões de tensão de um material com amolecimento cíclico. O gráfico está ligeiramente exagerado para dar clareza. Note que a inclinação da linha AB é o módulo de elasticidade E . O intervalo da tensão é $\Delta\sigma$, $\Delta\varepsilon_p$ é o intervalo de deformação plástica e $\Delta\varepsilon_e$ é o intervalo de deformação elástica. O intervalo total de deformação é $\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_p + \Delta\varepsilon_e$.

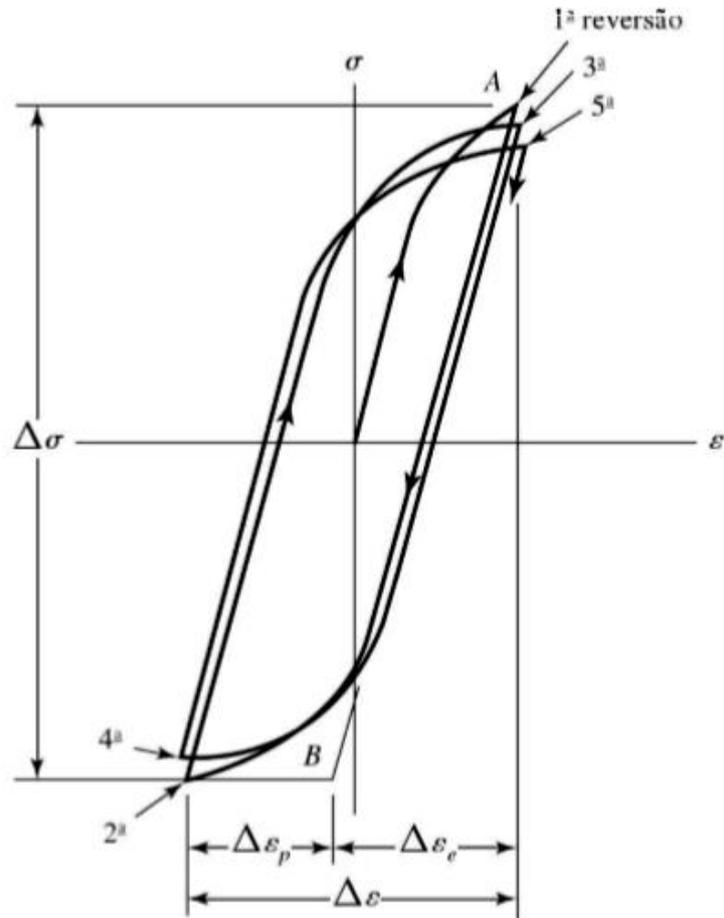
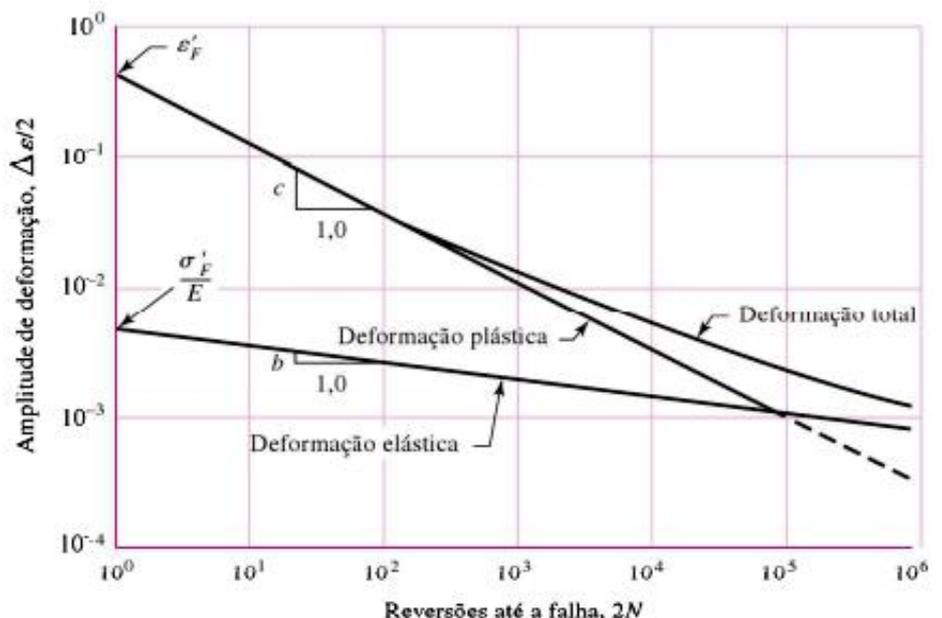


Figura 6-13

Gráfico log-log mostrando como a vida de fadiga se relaciona com a amplitude da deformação verdadeira para aço 1020 laminado a quente. (Reimpresso com permissão de SAE J1099_200208©2002 SAE International.)



Para o aço SAE 1020 laminado a quente; o gráfico foi reproduzido na Figura 6-13. Para explicarmos esse gráfico, primeiro definimos os seguintes termos:

- Coeficiente ε'_F de ductilidade de fadiga é a deformação verdadeira correspondente à fratura em uma reversão (ponto A na Figura 6-12). A linha de deformação plástica começa nesse ponto na Figura 6-13.
- Coeficiente σ'_F de resistência à fadiga é a tensão verdadeira correspondente à fratura em uma reversão (ponto A na Figura 6-12). Note que na Figura 6-13 a linha de deformação elástica começa em σ'_F / E .
- Expoente c de ductilidade de fadiga é a inclinação da linha de deformação plástica na Figura 6-13 e é a potência à qual a vida $2N$ deve ser elevada para ser proporcional à amplitude da deformação plástica verdadeira. Se o número de reversões de tensão é $2N$, então N é o número de ciclos.
- Expoente b de resistência à fadiga é a inclinação da linha de deformação elástica, e é a potência à qual a vida $2N$ deve ser elevada para ser proporcional à amplitude da tensão verdadeira.

A deformação total é a soma das componentes elástica e plástica como já sabemos:

$$\Delta\varepsilon/2 = \Delta\varepsilon_e/2 + \Delta\varepsilon_p/2 \quad (3)$$

A equação da linha de deformação plástica na Figura 6-13 é

$$\Delta\varepsilon_p/2 = \varepsilon'_F (2N)^c \quad (6-1)$$

A equação da linha de deformação elástica é

$$\Delta\varepsilon_e/2 = \sigma'_F (2N)^b / E \quad (6-2)$$

e, pela (3) resulta

$$\Delta\varepsilon/2 = \sigma'_F (2N)^c / E + \varepsilon'_F (2N)^b \quad (6-3)$$

que é a **relação de Manson-Coffin** entre a vida de fadiga e a deformação total. Alguns valores dos coeficientes e expoentes estão listados na Tabela A-21. Muitos

mais estão incluídos no relatório SAE J1099.

3.5 O limite de endurance

A determinação dos limites de resistência por ensaios de endurance presentemente é rotina, embora seja um processo longo. Para projeto preliminar e de protótipo, bem como para alguma análise de falha, é necessário um método rápido de estimativa dos limites de endurance. Existem grandes quantidades de dados na literatura sobre os resultados de ensaios de vigas rotativas e ensaios de tração simples de espécimes tomados da mesma barra ou lingote. Através desses dados, para aços, calculamos o limite de endurance em

$$S'_e = \begin{cases} 0,5S_{ut} & S_{ut} \leq 1400 \text{ MPa} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1400 \text{ MPa} \end{cases} \quad (6-8)$$

em que S_{ut} é a resistência de **tração mínima**. O símbolo de apóstrofo em S'_e , nessa equação refere-se ao espécime de viga rotativa (corpo de prova em laboratório). Desejamos reservar o símbolo S_e , sem o apóstrofo, para o limite de endurance de qualquer elemento particular de máquina submetido a qualquer tipo de carregamento.

Os limites de endurance para várias classes de ferros fundidos, polidos ou usinados estão listados na Tabela A-22. Ligas de alumínio não têm um limite de endurance. As resistências à endurance de algumas ligas de alumínio a 5×10^8 ciclos de tensão revertida são dadas na Tabela A-22.

3.6 Resistência à fadiga

Como mostra a Figura 6-10, uma região de fadiga de baixa ciclagem estende-se de $N = 1$ até cerca de 10^3 ciclos. Nessa região a resistência à fadiga S_f é apenas ligeiramente menor que a resistência à tração S_{ut} .

A Figura 6-10 indica que o domínio de fadiga de alta ciclagem estende-se de 10^3 ciclos para aços até o limite de endurance N_e , que é de cerca de 10^6 a 10^7 ciclos. A experiência tem mostrado que os dados de fadiga de alto ciclo são retificados por uma **transformação logarítmica** para ambos, tensão e ciclos, até a

falha. A Equação (6-2) pode ser usada para determinar a resistência à fadiga em 10^3 ciclos. Definindo a resistência à fadiga em um número específico de ciclos como $(S'_f)_{N=10^3} = E\Delta\varepsilon_e / 2$, escrevemos a Equação (6-2) como

$$(S'_f)_{N=10^3} = \sigma'_F (2 \cdot 10^3)^b = f S_{ut} \quad (6-9)$$

Em que f é a fração de S_{ut} representada por $(S'_f)_{N=10^3 \text{ ciclos}}$. Solucionando para f temos

$$f = \frac{\sigma'_F (2 \cdot 10^3)^b}{S_{ut}} \quad (6-10)$$

Pela Equação (2-11):

$$\sigma'_F = \sigma_0 \varepsilon^m \quad \text{com } \varepsilon = \varepsilon'_F \quad (6-10')$$

onde σ_0 é um coeficiente de resistência ou de encruamento por deformação; m é expoente de encruamento por deformação. Pode prova $m = \varepsilon_u$ (a deformação correspondendo a tensão última da curva de ensaio de tração). Se essa equação de tensão verdadeira contra deformação verdadeira não for conhecida, a aproximação SAE para aços com HB < 500 pode ser usada:

$$\sigma'_F = S_{ut} + 350 \text{ MPa} \quad (6-11)$$

Para encontrar b substitua a resistência à fadiga e os correspondentes ciclos, S'_e e N_e , respectivamente, na Equação (6-9), e resolvendo para b

$$b = -\frac{\log(\sigma'_F / S'_e)}{\log(2N_e)} \quad (6-12)$$

Assim, a equação $S'_f = \sigma'_F (2 \cdot N)^b$ é conhecida.

Por exemplo, se $S_{ut} = 735 \text{ MPa}$ e $S'_e = 366 \text{ MPa}$ na falha, então

Equação (6-11): $\sigma'_F = 735 + 350 = 1085 \text{ MPa}$

Equação (6-12):
$$b = -\frac{\log(1085/366_e)}{\log(2 \times 10^6)} = -0,0749$$

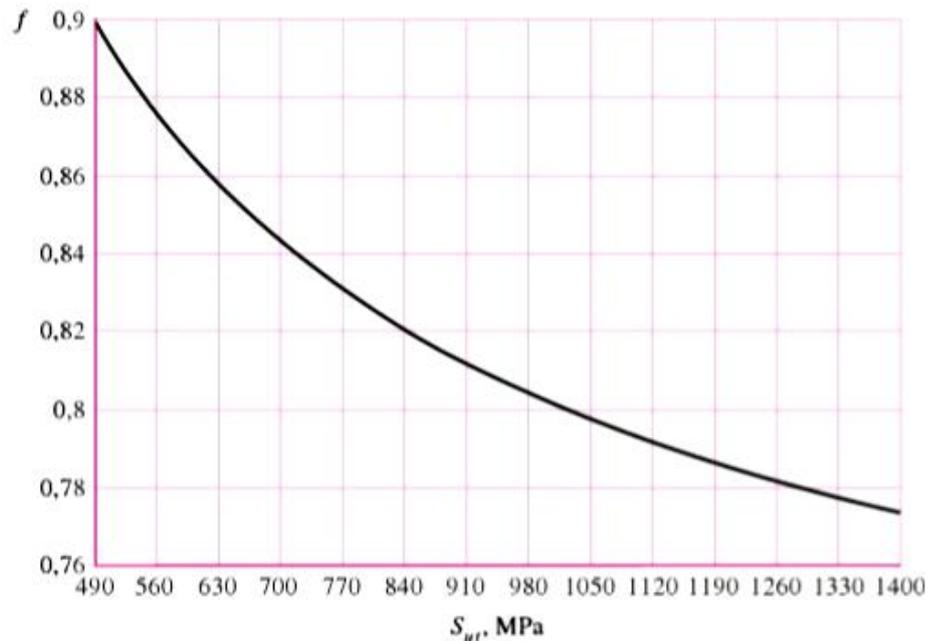
Equação (6-10):
$$f = \frac{1085(2 \cdot 10^3)^{-0,0749}}{735} = 0,835$$

e pela Equação (6-9):
$$S'_f(N) = 1085(2N)^{-0,0749} = 1030N^{-0,0749}$$

Figura 6-18 é um gráfico de f para $490 \leq S_{ut} \leq 1400$ MPa. Para ser conservativo, para $S_{ut} < 490$ MPa, faça $f = 0,9$.

Figura 6-18

Fração da resistência à fadiga, f , de S_{ut} a 10^3 ciclos para $S_e = S'_e = 0,5 S_{ut}$.



Para um componente mecânico verdadeiro, S'_e é reduzido a S_e (ver Seção 6-9), o qual é menor que $0,5 S_{ut}$. Contudo, a menos que dados verdadeiros estejam disponíveis, **recomendamos usar o valor de f encontrado na Figura 6-18. A equação (a), para o componente mecânico verdadeiro, pode ser escrita na forma**

$$S_f = a N^b \tag{6-13}$$

em que N é o número de ciclos até falhar e as constantes a e b são definidas pelos pontos 10^3 , $(S_f)_{10^3}$ e 10^6 , S_e com $(S_f)_{10^3} = f S_{ut}$. Substituindo esses dois pontos na Equação (6-13) temos

$$a = \frac{(f S_{ut})^2}{S_e} \tag{6-14}$$

$$b = -\frac{1}{3} \log \left(\frac{f S_{ut}}{S_e} \right) \tag{6-15}$$

Se uma tensão completamente reversa σ_a for dada, colocando-se $S_f = \sigma_a$ na Equação (6-13), o número de ciclos até falhar pode ser expresso como

$$N = \left(\frac{\sigma_a}{a} \right)^{1/b} \quad (6-16)$$

Fadiga de baixo ciclo é frequentemente definida (ver Figura 6-10) como falha que ocorre em um intervalo de $1 \leq N \leq 10^3$ ciclos. Em um gráfico log-log, tal como na Figura 6-10, o lugar geométrico da falha nesse intervalo é quase linear abaixo de 10^3 ciclos. Uma linha reta entre $10^3, f S_{ut}$ e $1, S_{ut}$ (transformada) é conservativa e é dada por

$$S_f \geq S_{ut} N^{(\log f)/3} \quad 1 \leq N \leq 10^3 \quad (6-17)$$

EXEMPLO 6-2 Dado um aço HR 1050, calcule

- o limite de endurance de viga rotativa a 10^6 ciclos.
- a resistência à fadiga de um espécime polido de viga rotativa correspondente a 10^4 ciclos até a falha.
- a vida esperada de um espécime polido de viga rotativa sob uma tensão completamente reversa de 385 MPa.

Solução (a) Com base na Tabela A-18, $S_{ut} = 630$ MPa. Da Equação (6-8),

Resposta
$$S'_e = 0,5(630) = 315 \text{ MPa}$$

(b) Com base na Figura 6-18, para $S_{ut} = 630$ MPa, $f \doteq 0,86$. Da Equação (6-14)

$$a = \frac{(0,86 \times 630)^3}{315} = 932 \text{ MPa}$$

Com base na Equação (6-15),

$$b = -\frac{1}{3} \log \left[\frac{0,86(630)}{315} \right] = -0,0785$$

Assim, a Equação (6-13) é

$$S'_f = 932 N^{-0,0785}$$

Para 104 ciclos até a falha, $S'_f = 932(10^4)^{-0,0785} = 452,3 \text{ MPa}$

(c) Com base na Equação (6-16), como $\sigma_a = 385$ MPa,

$$N = \left(\frac{385}{932} \right)^{1/-0,0785} = 77830 \text{ ciclos}$$

Tenha em mente que essas são somente *estimativas*. Assim, expressar as respostas com três dígitos de acurácia é um tanto enganoso.

Exercícios

Problemas determinísticos

- 6-1** Uma broca de furadeira de 6 mm foi tratada termicamente e retificada. A dureza medida foi de 490 Brinell. Calcule a resistência à fadiga se a broca for usada em flexão rotativa. $S_{ut} = 3,41 \times \text{HB}$ (MPa)
- 6-3** Calcule a resistência à fadiga de um espécime de viga rotativa feito de aço AISI 1020 laminado a quente para corresponder a uma vida de 12,5 kilociclos de reversão de tensão. Calcule também a vida do espécime para corresponder a uma amplitude de tensão de 252 MPa. As propriedades conhecidas são $S_{ut} = 463$ MPa, $\sigma_o = 805$ MPa, $m = 0,22$ e $\epsilon_f = 0,90$.
- 6-5** Para o intervalo $10^3 \leq N \leq 10^6$ ciclos, desenvolva uma expressão para a resistência à fadiga axial $(S'_f)_{axial}$ para espécimes polidos de (aço normalizado) 4130 usados para obter o diagrama da Figura 6-10. A resistência última é $S_{ut} = 875$ MPa e o limite de endurance é $(S'_e)_{axial} = 350$ MPa.