

TEXTO EXPLICATIVO DAS AULAS 6

Efeito de Entalhe

A resistência à fadiga é altamente influenciada pela presença de concentradores de tensão. O concentrador de tensão pode ser qualquer descontinuidade que interrompa o fluxo de forças, como um canto vivo, um furo, um rasgo de chaveta, e resulta numa distribuição de tensões não uniforme nas proximidades dessa descontinuidade. Em carregamento estático, o fator de concentração de tensão teórico K_t é dado pela equação (1), onde σ_M é o máximo valor da tensão nas vizinhanças do concentrador e σ é a tensão nominal atuante. Os valores de K_t para uma dada geometria e condição de carregamento podem ser determinados de forma analítica, numérica ou experimental. Os concentradores de tensão geralmente diminuem a vida em fadiga, criando regiões com estados triaxiais de tensões, causando restrição à deformação plástica e levando à fragilização do material. Existem ensaios de fadiga empregando corpos-de-prova com diferentes tipos de entalhe. Os resultados dos ensaios com peças contendo entalhes podem ser comparados à curva SN obtida com corpos de prova polidos e a relação entre as tensões nominais correspondentes à vida em fadiga define o chamado fator de concentração de tensão em fadiga, ou fator de entalhe à fadiga K_f , dado pela equação (2), onde σ_{fe} e σ_{fu} são os valores da tensão (para um determinado número de ciclos) das peças com e sem entalhe, respectivamente [Stephens, 2001; Dowling, 2018].

$$K_t = \frac{\sigma_M}{\sigma} \quad (1)$$

$$K_f = \frac{\sigma_{fu}}{\sigma_{fe}} \quad (2)$$

A Figura 1 mostra curvas SN com número de 10^2 a 10^7 ciclos para o aço AISI 4340 com LR = 786 MPa, obtidas em condição de carregamento reverso ($R = -1$) utilizando corpos-de-prova com e sem entalhe. Note que K_f se aproxima de K_t para a região de alto ciclo (vidas acima de 10^5 ciclos) e tende a 1 (ou seja, o entalhe não afeta a vida em fadiga) para a região de baixo ciclo. Define-se a “sensibilidade ao entalhe” em fadiga (q), pela equação (3). O máximo efeito ocorre quando $K_f = K_t$, portanto, $q = 1$. O valor de q decresce quando $K_f < K_t$ e é igual a zero quando $K_f = 1$, i.e., o entalhe não tem efeito sobre a resistência à fadiga. O valor de q varia com a severidade e tipo do entalhe, com o tamanho do corpo-de-prova e com a forma do carregamento e, portanto, não pode ser considerado uma constante verdadeira do material. Normalmente a sensibilidade ao

entalhe é maior na faixa de vidas mais longas, quando pode atingir valores próximos de 1. A sensibilidade ao entalhe aumenta com a resistência à tração, ou seja, se a dureza ou resistência de um material for aumentada por meio de tratamentos térmicos, é possível que seu desempenho piore em termos da sensibilidade ao entalhe [Dowling, 2018].

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (3)$$

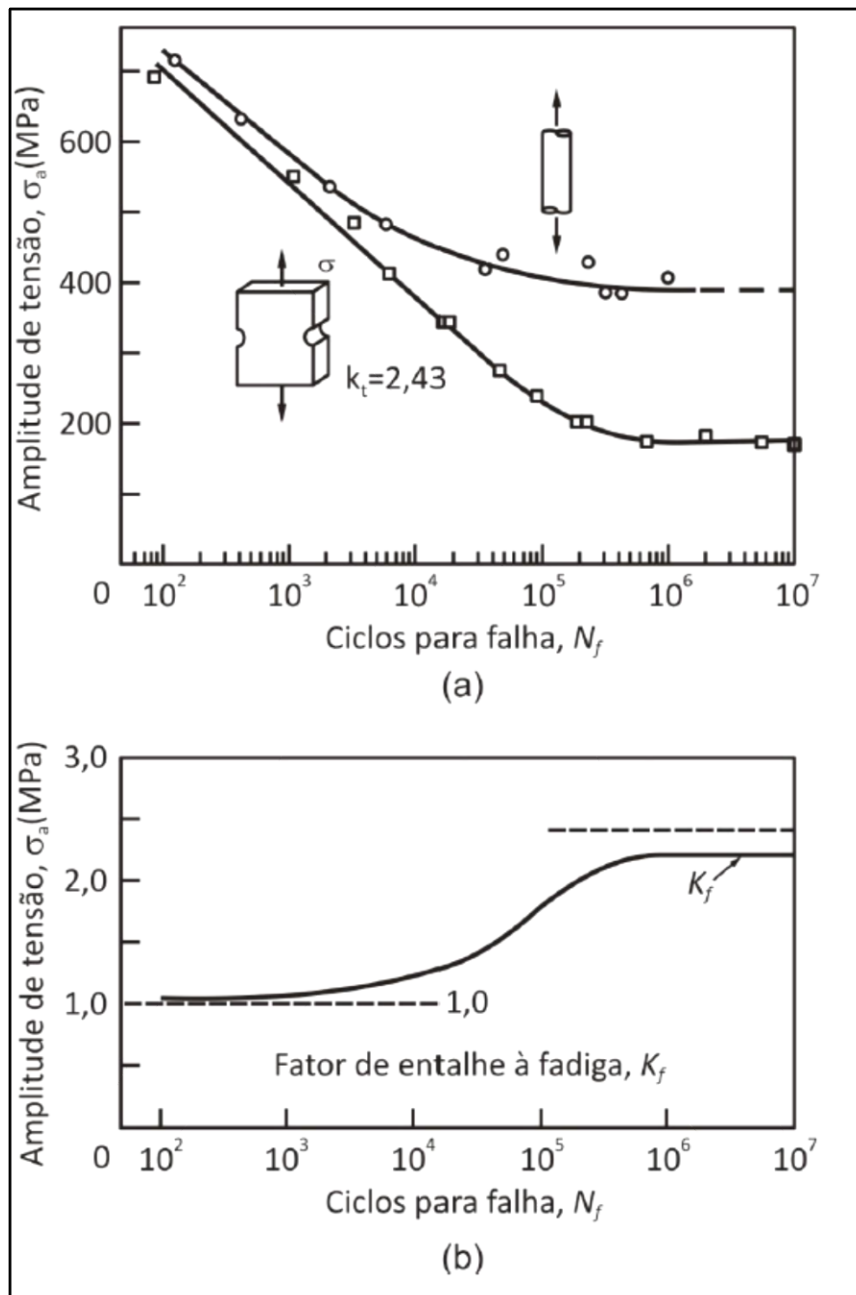


Figura 1 - Curvas SN para o aço 4340 com e sem entalhe, e correspondente variação de K_f com o número de ciclos para a falha [adaptado de Dowling, 2018].

Fadiga de Baixo Ciclo

A fadiga, em termos da amplitude de deformação, ou controlada pela deformação, ou ainda, fadiga de baixo ciclo, apareceu na literatura técnica pela primeira vez no início da década de 1950. Os primeiros artigos, de S.S. Manson e L. F. Coffin, foram baseados em dados de fadiga de baixo ciclo, relacionando a amplitude de deformação plástica com o número de ciclos para a fratura e seus estudos envolveram experimentos com duração menor que 5×10^4 ciclos. Na década de 70 apareceram os primeiros artigos com a aplicação das relações deformação-vida para a fadiga de alto ciclo. Atualmente a apresentação dos dados de fadiga em termos da deformação é considerada tão ou mais importante que as curvas SN [Klesnil, 1992]. Manson e Coffin propuseram, independente e quase simultaneamente, expressões muito parecidas para a fadiga de baixo ciclo. A expressão da dependência entre a amplitude da deformação plástica e o número de ciclos para a fratura é conhecida como equação de Coffin-Manson e pode ser escrita na forma dada pela equação (4), onde ϵ'_f é o coeficiente de ductilidade à fadiga e c é o expoente de ductilidade à fadiga.

$$\epsilon_{ap} = \epsilon'_f (2Nf)^c \quad (4)$$

A equação de Coffin-Manson é fundamental quando a **deformação plástica** controla o processo, porém, a utilidade desta expressão aumenta substancialmente quando acoplada a um termo envolvendo a **deformação elástica**. Muitos componentes trabalham em regime de amplitude de deformação total constante, e a realização dos ensaios também é mais fácil quando a deformação total (e não a plástica) é a variável controlada. Em um **laço de histerese**, a **variação da deformação total** é dada pela **soma** das parcelas **elástica e plástica**, como a equação (5) e representada na figura 2. Deve-se registrar que existem diferentes métodos para se determinar a variação da deformação plástica no ciclo a partir do laço de histerese. Kandil (1999) avaliou os métodos usuais e recomendou o método preconizado pela norma ISO12106, por ser o menos sujeito a erros de interpretação.

$$\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_p \quad (5)$$

Segundo Conway e Sjodahl (1991), a forma geral da expressão que relaciona a variação da deformação total com a vida em fadiga foi proposta pela primeira vez por Manson. Morrow, em 1965, estabeleceu a superposição da lei de Basquin à equação de Coffin- Manson chegando à expressão deformação-vida mais utilizada atualmente.

Considerando a amplitude de deformação $\epsilon_a = \Delta\epsilon/2 = \epsilon_{ae} + \epsilon_{ap}$, aplicando-se a lei de Hooke ($\epsilon_{ae} = \sigma_a/E$) e a lei de Basquin e a equação 4, tem-se a relação deformação-vida dada pela equação (6).

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (\text{Basquin}) \quad \epsilon_{ap} = \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (4)$$

$$\epsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (6)$$

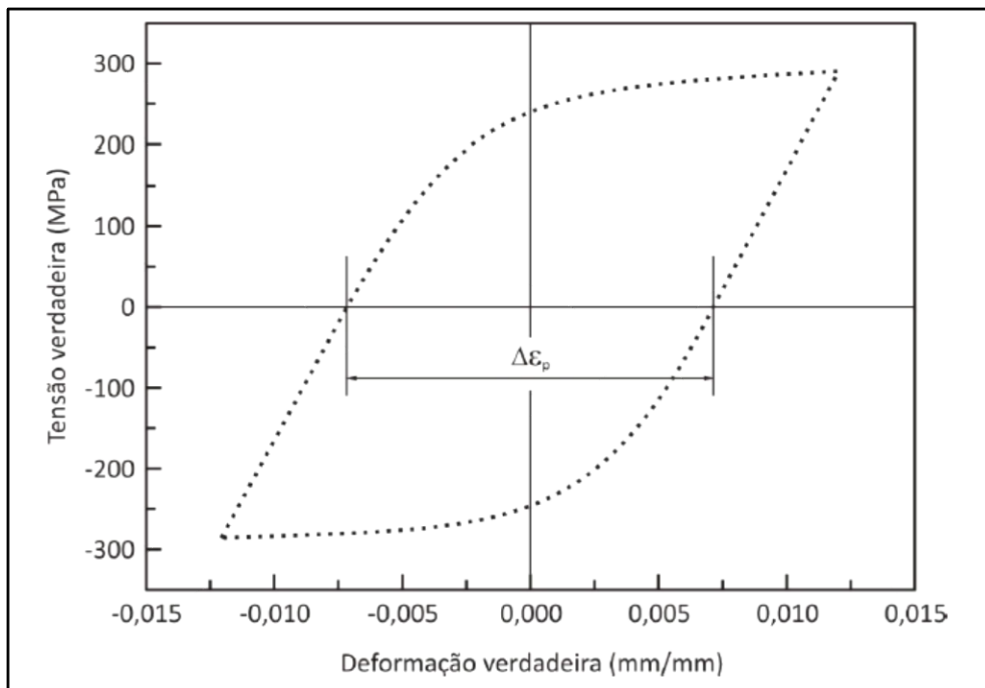


Figura 2 - Determinação das parcelas da deformação em um laço de histerese.

A equação (6) descreve o comportamento bi-linear da curva de fadiga representada na Figura 3 ao se representar os dados na escala log-log. Na região onde a vida é curta prevalece a amplitude de deformação plástica, enquanto uma vida longa é descrita pela deformação elástica. Conclui-se que a equação (6) tem grande abrangência, sendo útil tanto em problemas de fadiga de baixo ciclo como em alto ciclo. A intersecção das linhas elástica e plástica separa essas duas regiões, sendo denominada vida de transição, N_t , e determinada pela equação (7). Desta forma, pode-se definir a fadiga de baixo ciclo como

aquela em que a variação da deformação plástica, $\Delta\epsilon_p$, é maior que a deformação elástica [François, 1996].

$$N_t = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma'_f}{\epsilon'_f E} \right)^{\frac{1}{c-b}} \quad (7)$$

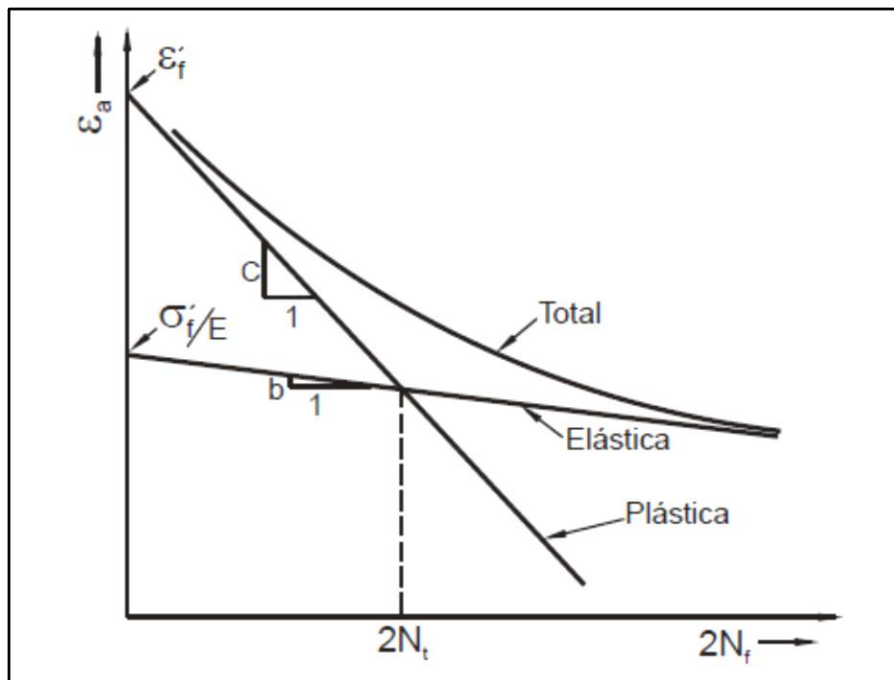


Figura 3 - Curvas de fadiga de baixo ciclo: elástica, plástica e total

