

Cap. 3 ABORDAGEM DEFORMAÇÃO-VIDA

EXEMPLO 1. ESTIMATIVA DE VIDA DE UMA PEÇA COM ENTALHE

Uma chapa de aço carregada axialmente possui um entalhe cujo fator de concentração de tensão é dado por: $K_t = 3,0$. Sabe-se que para este caso o fator de concentração de tensão em fadiga é dado por $K_f = 2,82$. Pede-se determinar:

- A tensão e deformação no entalhe quando uma tensão nominal de 600 MPa é aplicada na chapa;
- As tensões e deformações no entalhe quando é aplicado um carregamento cíclico de amplitude constante, com tensão máxima 500 MPa e tensão mínima 50 MPa;
- O número de ciclos esperado para o início de trincas de fadiga nesta peça, sob o carregamento cíclico descrito no item anterior.

Dados do Material:

$$E = 207 \text{ GPa}$$

$$\sigma_e = 883 \text{ MPa (limite de escoamento monotônico)}$$

$$\sigma'_e = 600 \text{ MPa (limite de escoamento cíclico)}$$

$$K = 1.172 \text{ MPa}$$

$$n = 0,06$$

$$K' = 1.434 \text{ MPa}$$

$$n' = 0,14$$

$$\sigma'_f = 1.240 \text{ MPa}$$

$$b = -0,07$$

$$\varepsilon'_f = 0,66$$

$$c = -0,69$$

Solução: O problema será resolvido aplicando-se a regra de Neuber. Esta representa adequadamente problemas em tensão plana (como chapas finas). Para deformação plana é mais adequado usar a regra linear. E uma situação intermediária seria representada pela regra de Glinka da densidade de energia de deformação.

a) Tensão e deformação no entalhe para uma tensão nominal de 600 MPa. Verifica-se que o comportamento da peça é elástico, visto que $600 < 883 \text{ MPa}$. Deve-se lembrar que o comportamento nominal elástico com frequência começa a se tornar inelástico em um nível de tensão menor que o limite de escoamento do material (usualmente em torno de 0,75 a 0,9 σ_e), visto que a maioria dos materiais não segue o modelo elástico-perfeitamente plástico. Contudo, o comportamento monotônico na raiz do entalhe é inelástico, pois:

$$K_t \cdot S_{max} = 3 \times 600 = 1800 \text{ MPa} > \sigma_e = 883 \text{ MPa} \quad (1)$$

Para determinar a tensão e deformação na raiz do entalhe empregando a regra de Neuber, deve-se resolver as duas equações simultâneas dadas a seguir. A equação (2) vem da consideração de que a média geométrica dos fatores de concentração de tensão e deformação

em condições de deformação plástica permanece constante e igual a K_t e a equação (3) corresponde ao modelo de Ramberg-Osgood para a curva tensão-deformação do material.

$$\varepsilon\sigma = \frac{(K_t S)^2}{E} = \frac{(3 \times 600)^2}{207.000} = 15,65 \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{1/n} = \frac{\sigma}{207.000} + \left(\frac{\sigma}{1.172}\right)^{1/0,06} \quad (3)$$

A solução dessas duas equações simultâneas pode ser obtida por tentativa-e-erro, método numérico ou solução gráfica (mostrada na Figura 1), resultando nos seguintes valores para a tensão e a deformação na raiz do entalhe:

$$\begin{cases} \sigma = 903 \text{ MPa} \\ \varepsilon = 0,0173 \end{cases} \quad (4)$$

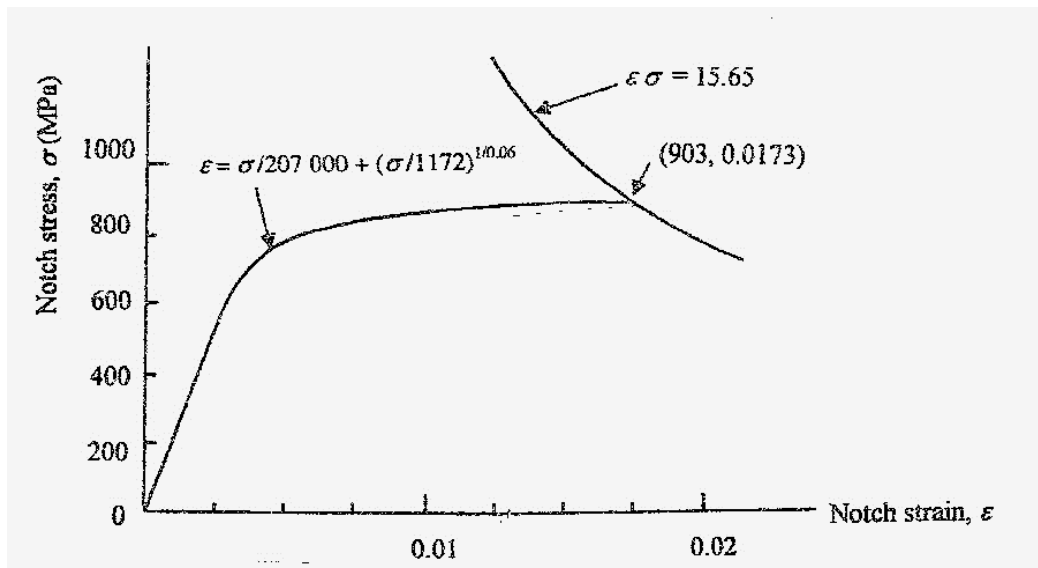


Figura 1. Determinação da deformação na raiz de um entalhe pela regra de Neuber.

b) Para o carregamento cíclico com as tensões nominais máxima e mínima fornecidas, a amplitude de tensão é dada por:

$$S_a = \frac{(S_{max} - S_{min})}{2} = \frac{(500 - 50)}{2} = 225 \text{ MPa} \quad (5)$$

O comportamento nominal para o carregamento cíclico também é elástico, visto que as tensões envolvidas são menores que o limite de escoamento da curva cíclica, 600 MPa. Inicialmente são calculadas a tensão e a deformação no instante da carga máxima do ciclo de carregamento. Usando a regra de Neuber e o fator de concentração de tensão em fadiga, nós escrevemos duas equações simultâneas de modo similar ao do carregamento monotônico, ver equações (6) e (7):

$$\varepsilon_{max}\sigma_{max} = \frac{(K_f S_{max})^2}{E} = \frac{(2,82 \times 500)^2}{207.000} = 9,60 \quad (6)$$

$$\varepsilon_{max} = \frac{\sigma_{max}}{E} + \left(\frac{\sigma_{max}}{K'} \right)^{1/n'} = \frac{\sigma_{max}}{207.000} + \left(\frac{\sigma_{max}}{1.434} \right)^{1/0,14} \quad (7)$$

A solução dessas equações é dada por:

$$\begin{cases} \sigma_{max} = 745 \text{ MPa} \\ \varepsilon_{max} = 0,0129 \end{cases} \quad (8)$$

Para o descarregamento, assume-se que o material seja do tipo Masing, ou seja, o laço de histerese corresponde à curva tensão-deformação cíclica expandida por um fator igual a 2. A tensão nominal no descarregamento vai de 500 MPa a 50 MPa, ou seja, $\Delta S = 450$ MPa. Empregando-se novamente a regra de Neuber, determinam-se as tensões e deformações locais no descarregamento resolvendo-se as equações simultâneas:

$$\Delta \varepsilon \Delta \sigma = \frac{(K_f \Delta S)^2}{E} = \frac{(2,82 \times 450)^2}{207.000} = 7,78 \quad (9)$$

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta \sigma}{E} + 2 \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{1/n'} = \frac{\Delta \sigma}{207.000} + 2 \left(\frac{\Delta \sigma}{2.868} \right)^{1/0,14} \quad (10)$$

Cuja solução é dada por:

$$\begin{cases} \Delta \sigma = 1.082 \text{ MPa} \\ \Delta \varepsilon = 0,0072 \end{cases} \quad (11)$$

A partir dos resultados obtidos, determinamos os parâmetros do carregamento cíclico na raiz do entalhe, a serem empregados na estimativa de vida:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{0,0072}{2} = 0,0036 \quad (12)$$

$$\sigma_{min} = \sigma_{max} - \Delta \sigma = 745 - 1.082 = -337 \text{ MPa} \quad (13)$$

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{max} + \sigma_{min})}{2} = \frac{(745 - 337)}{2} = 204 \text{ MPa} \quad (14)$$

c) Para estimar o número de ciclos para a formação de uma pequena trinca na raiz do entalhe, ou seja, o período de iniciação da trinca, pode-se empregar o modelo de Morrow para o efeito da tensão média aplicado ao método deformação-vida, conforme equação (15).

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f} \right) (2N_f)^b + \varepsilon'_f \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f} \right)^{c/b} (2N_f)^c \quad (15)$$

Substituindo as propriedades do material e os valores encontrados para a amplitude de deformação e tensão média na raiz do entalhe, obtemos:

$$0,0036 = \frac{1.240}{207.000} \left(1 - \frac{204}{1.240}\right) (2N_f)^{-0,07} + 0,66 \left(1 - \frac{204}{1.240}\right)^{0,69/0,07} (2N_f)^{-0,69} \quad (16)$$

Que pode ser simplificada para:

$$0,0036 = 0,0050 (2N_f)^{-0,07} + 0,1122 (2N_f)^{-0,69} \quad (17)$$

Resolvendo graficamente a equação (17), conforme mostrado na Figura 2, encontramos a estimativa pela regra de Neuber do número de reversões necessário para iniciar uma trinca na raiz do entalhe da chapa.

Caso K_f não fosse conhecido, os cálculos deste problema seriam feitos empregando-se o fator teórico K_t e teriam resultados mais conservativos. Lembrando ainda que o emprego da regra de Neuber para um caso qualquer em fadiga resulta em previsão mais conservativa de vida (ou seja, na estimativa de um menor número de ciclos) quando comparado com os demais métodos (regras linear e de Glinka). E, finalmente, se a vida esperada em propagação de trinca da peça é significativa, a previsão da vida restante (crescimento da trinca formada no entalhe até atingir o tamanho crítico) pode ser estimada com base em modelos da Mecânica da Fratura (que serão vistos em outro capítulo deste curso). Neste caso, temos a abordagem de dois estágios (*Two-Stage Approach*) para estimativa de vida em fadiga.

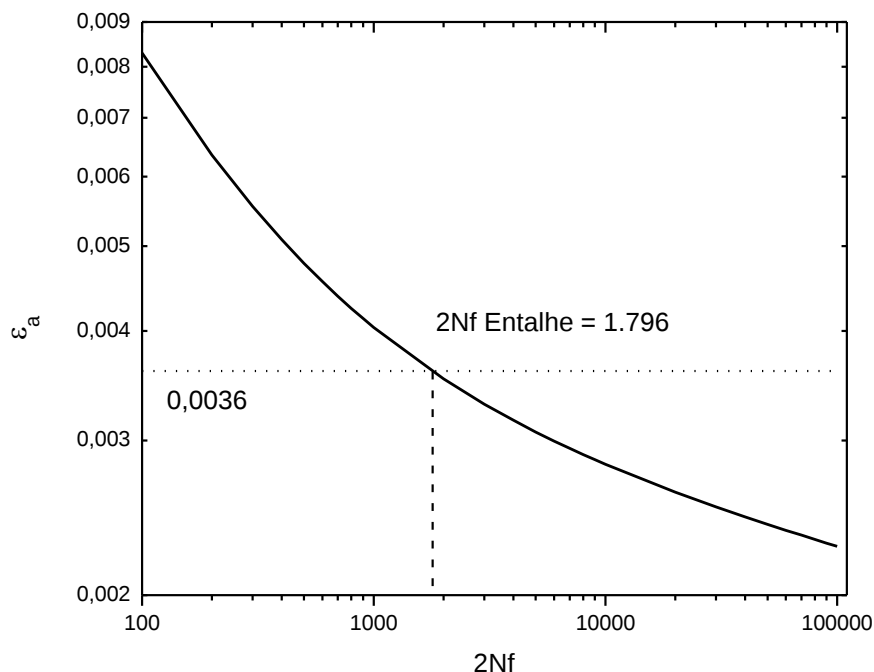


Figura 2. Estimativa do tempo de nucleação da trinca na raiz do entalhe.