

## Questões

- 1 . Uma amostra da liga AA7075-T6 (duralumínio no estado envelhecido para máxima resistência) teve seu limite de fadiga.  $\sigma_f$  determinado em um ensaio de flexão rotativa ( $R = -1$ ) resultando em um valor de 159 MPa. Sabendo-se que a mesma liga nesse estado apresenta limite de resistência de 572 MPa:
  - a. Desenhe esquematicamente o diagrama de Goodman (ou seja, o gráfico que relaciona a tensão média e o limite de fadiga do material) para essa liga
  - b. Assumindo-se que um novo ensaio de fadiga será executado em máquina servocontrolada, usando  $R = 0,1$ , estime o novo limite de fadiga que deverá ser obtido
  - c. O novo ensaio, referido no item anterior, será executado em um corpo de prova feito de uma chapa com 0,5 mm de espessura e com seção útil de largura 10 mm, indique quais serão os menores valores de carga máxima e carga mínima (medidos em Newton) que deverão ser programados na máquina para a realização desse ensaio

Obs.: Para o item c, assuma que a menor amplitude de tensão do ensaio será  $\frac{\Delta\sigma}{2} = 0,9 (\sigma_f)_{R=0,1}$ .

- 2 . A Figura 1 apresenta a curva S-N medida por Luk *et al.* (**Mater & Design** 66, 2015, 274 – 283) para um compósito com matriz de liga de alumínio AA2009-T6 (Al - 4% Cu - 1,5 % Mg, solubilizada a 515°C /1h, precipitada a 175°C /6h) contendo 17% vol. de SiC em partículas. O material será empregado em uma aplicação em que estará sujeito ao espectro de carregamento descrito na Tabela 1, sendo que os histogramas foram contabilizados por dois métodos de contagem distintos: cruzamento de nível (N) e “rainflow” (R). Com base nessas informações, responda:
  - a. Estime o número de ciclos para fratura para esse compósito usando os dois histogramas (vel 1,5 ponto)
  - b. Discuta a diferença obtida nas estimativas de vida usando o método de cruzamento de níveis e usando o método “Rainflow” e a implicação dessa diferença para o projeto do componente (vale 1,0 ponto).
- 3 . Al-Khudairi *et al.* (**Mater & Design** 66, 2015, 93 –102) recentemente investigaram a resistência à fadiga, com razão de fadiga  $R = 0,1$ , em solicitação de delaminação de compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras de vidro unidirecionais. Os autores estudaram carregamentos em modo I (abertura) e modo II (deslizamento) usando os corpos de prova representados na Figura 2. O corpo de prova DCB (*Double Cantilever Beam*, viga duplo cantiléver) é usado para carregamentos em modo I e o corpo de prova 3ENF (*3-point End Notched Flexure*, Flexão em três pontos com entalhe na ponta) é usado para o

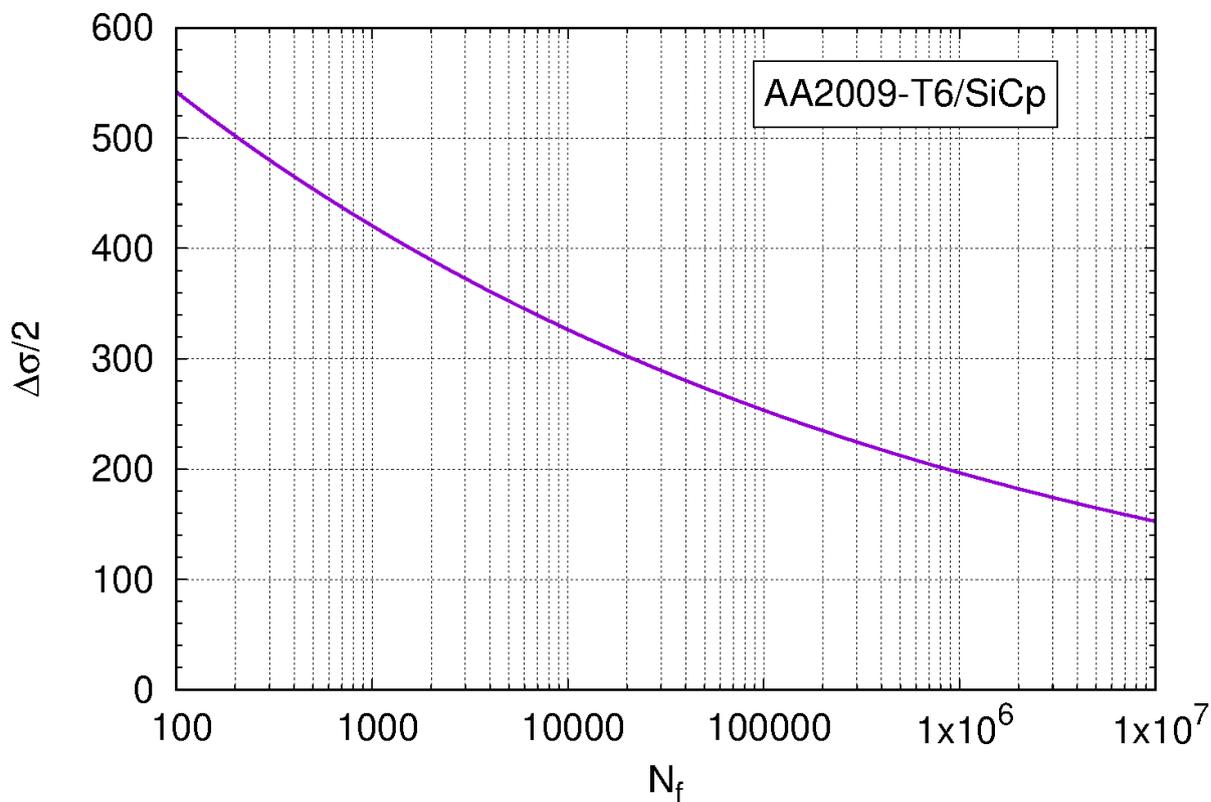


Figura 1: Curva S-N do compósito AA2009-T6/SiCp.

Tabela 1: Espectro de carregamento do componente, contabilizado usando os métodos de cruzamento de níveis (N) e “rainflow” (R).

$\frac{\Delta\sigma}{2}$ [MPa]	$f_i$ (N)	$f_i$ (R)
160	0.02	0.005
170	0.05	0.01
180	0.15	0.05
190	0.25	0.15
200	0.18	0.27
210	0.16	0.24
220	0.085	0.105
230	0.06	0.08
240	0.04	0.06
250	0.005	0.03

carregamento em modo II. Nos dois corpos de prova, a pré-trinca é produzida introduzindo-se um filme de teflon durante a fabricação do compósito. Segundo os autores a taxa de crescimento da trinca de fadiga obedece uma relação semelhante à de Paris na forma:

$$\frac{da}{dN} = \begin{cases} C_I \left[ \frac{G_{I\max}(a)}{G_{Ir}(a)} \right]^n \\ C_{II} \left[ \frac{G_{II\max}(a)}{G_{IIr}(a)} \right]^m \end{cases} \quad (1)$$

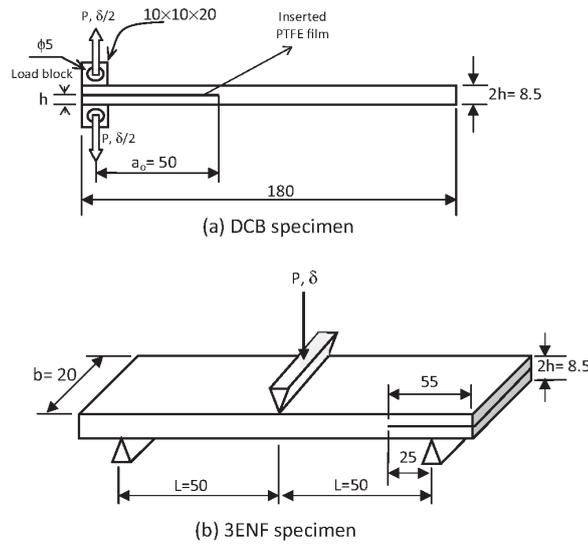


Figura 2: Representação dos corpos de prova DCG e 3ENF.

onde  $G_{I\max}(a)$  e  $G_{II\max}(a)$  são os valores máximos da força de extensão de trinca nos modos I e II respectivamente,  $G_{Ir}(a)$  e  $G_{IIr}(a)$  são as curvas G-R (o equivalente para G das curvas J-R) nos modos I e II, os demais são parâmetros dependentes do material e do modo de carregamento, listados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros para as relações de Paris do compósito.

$C_I$ [mm ciclo <sup>-1</sup> ]	$C_{II}$ [mm ciclo <sup>-1</sup> ]	$n$	$m$
$4,47 \times 10^{-2}$	13,47	5,27	4,0

A razão entre a carga aplicada,  $P$ , e a deflexão do corpo de prova,  $\delta$  (mostrada na Figura 2) define a flexibilidade do corpo de prova,  $S$ , que foi medida para cada caso:

$$S_{DCB} = \left( \frac{P}{\delta} \right)_{DCB} = 0,0235 \text{mmN}^{-1} \quad (2)$$

e

$$S_{3ENF} = \left( \frac{P}{\delta} \right)_{3ENF} = 0,0088 \text{mmN}^{-1} \quad (3)$$

As curvas G-R são dadas por:

$$\begin{cases} G_{Ir} = 764 + 20,2(a - a_0)^{0,64} \\ G_{IIr} = 0,16212a^{2,7739} \end{cases} \quad (4)$$

onde  $a$  é o tamanho instantâneo da trinca e  $a_0$  é o tamanho da pré-trinca.

Por fim, os valores de  $G_I$  e  $G_{II}$  são dados por:

$$\begin{cases} G_I = \frac{3P\delta}{2b(a+2,293)} \\ G_{II} = \frac{9P\delta a^2}{2b(2L^3+3a^3)} \end{cases} \quad (5)$$

Com base nessas informações:

- a. Explique como o corpo de prova 3ENF pode ser usado para solicitar o corpo de prova em modo II de carregamento, faça um diagrama de esforços da viga em flexão para justificar sua resposta
  - b. Suponha que a trinca de cada corpo de prova cresceu 0,5 mm além do comprimento inicial da pré-trinca, usando a flexibilidade dos corpos de prova, calcule qual é o valor de  $\delta$  que deve ser aplicado a ambos os corpos de prova para produzir um crescimento de trinca de  $5 \times 10^{-7} \text{ mm ciclo}^{-1}$
  - c. O pré-fator da equação de Paris (constante  $C$ ) mede a intensidade com que o fenômeno de fadiga ocorre no sistema (corpo de prova), a constante  $C$  do corpo de prova 3ENF é muito maior que a do corpo de prova DCB, sabe-se que o principal dano de fadiga em compósitos reforçado por fibras contínuas ocorre por compressão perpendicular às fibras. Usando essa informação explique a diferença de comportamento dos dois corpos de prova (sugestão: desenhe o círculo de Mohr do estado de tensão no centro dos dois corpos de prova)
4. Kalnaus *et al.* (*Int. J. Fatigue* **31**, 2009, pp. 840 – 849) investigaram a propagação de trincas de fadiga em um aço inoxidável AISI 304L, propondo a seguinte generalização da equação de Paris para este material:

$$\frac{da}{dN} = C_1 k^{n_1} \quad (6)$$

onde

$$k = (K_{max})^\alpha (\Delta K)^{1-\alpha} \quad (7)$$

Fornecendo os seguintes valores para este material:  $C_1 = 1,25 \times 10^{-10}$  [mm ciclo<sup>-1</sup>],  $n_1 = 3,97$ ,  $\alpha = 0,36$  e  $[k] = \text{MPa m}^{0,5}$ .

Com base nestes valores calcule o tempo necessário para estender uma trinca central passante de tamanho inicial  $2a_0$  até o comprimento final  $2a_f = 1,5a_0$  em uma placa infinita (ou seja  $Y = 1$ ) supondo que o ensaio de fadiga será realizado a uma frequência de 20 Hz, com  $R=0,1$ . Expresse seu resultado como uma função de  $\Delta\sigma$  e  $a_0$ .

Dica: integre a equação 6 para determinar o número de ciclos  $N$  e converta o resultado em tempo usando a frequência do carregamento.