

PREVISÃO DE VIDA À FADIGA DOS ENGATES (RABETAS) DOS VAGÕES DE TRANSPORTE DE CARVÃO

T. L. M. Morgado¹, C. M. Branco², V. Infante³

¹ Professora Adjunta, ESTA-IPT, Abrantes – Portugal.

² Professor Catedrático, IST-UTL, Lisboa – Portugal.

³ Professora Auxiliar, IST-UTL, Lisboa – Portugal.



RESUMO

Este artigo apresenta o estudo de vida à fadiga de iniciação de fissuras usando curvas S-N considerando fiabilidades de 50%, 90%, 95% e 99%, de um componente ferroviário designado por “rabeta” utilizado na ligação dos vagões de transporte de carvão. Nestas “rabetas” têm sido detectadas fissuras, levando à sua retirada de serviço imediata, respeitando assim as imposições das entidades certificadoras de material ferroviário. Estas fissuras surgem na concordância entre a zona longitudinal e a cabeça do engate. Para a realização deste trabalho foram obtidos dados em serviço, usando rosetas extensométricas, em duas viagens de rotina (vagões carregados e vagões vazios) das locomotivas de transporte de carvão do Porto de Sines à Central Termoelectrica do Pego.

1 - INTRODUÇÃO

O dano por fadiga é a deterioração das propriedades dum material por efeito da aplicação cíclica duma carga. Este ocorre não só sob cargas de amplitude constante como sob cargas de amplitude variável.

Os danos acumulam-se desde o início até ao fim da vida do componente. Várias teorias de danos acumulados têm sido propostas para avaliar a duração em condições de fadiga dum material (Stephens, Ralph I. et al, 2001).

Os danos ocorridos durante um processo de fadiga podem ser caracterizados através de um ou mais parâmetros (Moura Branco et al, 1999). Alguns dos parâmetros que têm sido usados são o crescimento de

fenda, absorção de energia plástica, degradação da resistência à tracção estática, diminuição do limite de fadiga e crescimento da deformação plástica.

Embora o conceito de danos acumulados por fadiga, tenha um significado lato, neste artigo iremos ter em conta os danos produzidos sob níveis de tensão variável utilizando curvas S-N.

Com o uso dos danos acumulados o que se pretende é descrever o comportamento à fadiga sob condições de carga aleatória com base no conhecimento do seu comportamento sob cargas de amplitude constante.

Das teorias de danos acumulados, aquela que tem tido maior divulgação e a mais

simples é a regra linear proposta por Miner. A regra de Miner é traduzida na expressão (1):

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (1)$$

Sendo n_i o número de ciclos aplicado e N_i é o número de ciclos que provocaria a rotura para o mesmo nível de tensão.

Neste artigo é descrito o procedimento e apresentado os resultados obtidos considerando às curvas S-N para probabilidades de rotura de 1%, 5%, 10%, 50%, no estudo de previsão de vida à fadiga dos componentes ferroviários designados por “rabetas”.

Este estudo surge na continuação de um trabalho encomendado ao IDMEC para análise de causas de fissuração em serviço verificadas nos engates dos vagões que transportam carvão do porto de Sines para a central do Pego, com a linha electrificada (Moura Branco et al, 2003). O engate (figura 1) é uma peça em aço vazado obtida por fundição em areia com a especificação ASTM A148 90-60 com tratamento térmico não especificado (Sousa e Brito et al, 2002).

Foram feitas medições das extensões em serviço no componente, usando dez extensómetros eléctricos do tipo roseta colados na zonas mais crítica deste elemento, entre a cabeça e o corpo do engate, onde se tem vindo a detectar fissurações (figura 2).

A captação de dados foi feita nos percursos indicados pela UMAT da CP por serem considerados os mais representativos em termos de esforços, num total de 48kms. E, foram comparadas as duas situações possíveis de carregamento, ou seja:

- Vagões carregados no sentido Sul-Norte (Sines-Ermidas);
- Vagões vazios no sentido Norte-Sul (Ermidas-Sines).

Seguiu-se o cálculo de amplitudes, valores médios e máximos das tensões de fadiga. Por fim recorreu-se às curvas de fadiga para realizar a previsão dos danos de

vida de fadiga nas várias localizações críticas da fissuração.

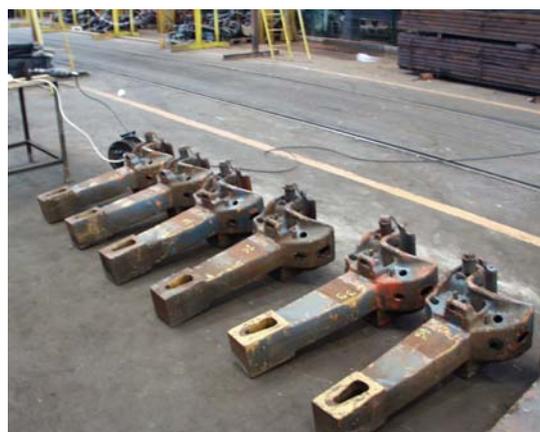


Fig 1 – Engates retirados de serviço.



Fig 2 - Colagem de extensómetros no "lado direito" do engate.

2 - METODOLOGIAS E INSTRUMENTAÇÃO

Neste trabalho foram coladas 10 rosetas a 45° (3 extensómetros) nas posições do esquema da figura 3. Os extensómetros escolhidos foram de dois tipos da marca Shiowa; rosetas de três eixos, com 2 e 5mm de base, para determinar as tensões principais.

A colagem dos extensómetros à superfície do engate foi feita com adesivo cianoacrilato que apresenta um bom comportamento até 350°C. A aplicação da cola foi feita em superfícies limpas primeiramente com ferramentas de limpeza

(berbequim com discos e mós) e depois, com lixas de várias granulometrias (grossa, média e fina) até conseguir superfícies minimamente rugosas. A remoção final de

sujidades foi com solventes do tipo acetona e fréon, e a obtenção da rugosidade pretendida com uma lixa de tamanho de grão igual a 180.

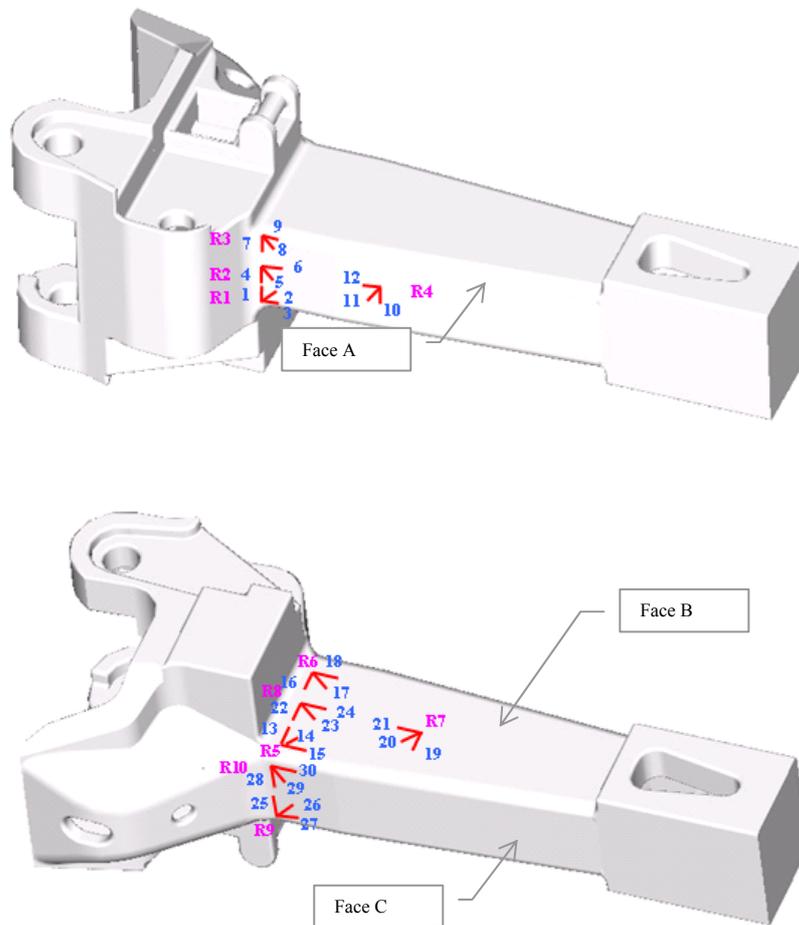


Fig 3 - Esquema da posição para colagem dos extensómetros.

O sistema de aquisição de dados que recolheu os sinais dos extensómetros é constituído por uma ponte de extensometria dinâmica da National Instruments, Ref^o PCI – M10-1GE, por uma placa de aquisição de dados, por um *PC* portátil e pelo *software LabView*. Foi desenvolvido um programa em ambiente *LabView* que regista o espectro de variação de sinal de cada extensómetro, armazenando num ficheiro de dados os valores mais representativos (picos, gamas, frequências, etc.) em função do tempo, e fazendo a representação gráfica dos espectros obtidos. Os dados obtidos, que caracterizam o espectro de tensões a que cada extensómetro está sujeito, foram posteriormente tratados para definir o espectro de tensões de fadiga.

A conversão dos sinais dos extensómetros é feita com o sistema *LabView*. A frequência de captação de sinais das extensões foi de 30 valores/segundo.

3 - ANÁLISE DE EXTENSÕES E TENSÕES

Após a aquisição dos espectros das rosetas, verificou-se que os valores mais elevados das extensões ocorreram nas rosetas 1 e 6 que estão localizadas no canto inferior da concordância da face A e no canto superior da concordância da face B, (figura 3). Verificou-se que, quer para a roseta 1 quer para a roseta 6, dos três extensómetros que constituem cada roseta as extensões mais

elevadas foram obtidas nos extensómetros que estão alinhados na direcção axial e onde o esforço de tracção na roseta é preponderante (extensómetro 3 na roseta 1 e extensómetro 18 na roseta 6). O extensómetro 18 da roseta 6 apresenta os valores mais elevados das extensões de pico (figura 4), cerca de $1500 \mu\text{strain}$ o que indica valores elevados das tensões de pico de fadiga.

Para a análise das tensões obtiveram-se os espectros das tensões a partir das extensões experimentais, recorrendo às equações 1 e 2 (Moura Branco, 1999):

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{2} \left(\frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{1+\nu} \pm \frac{\sqrt{2}}{1+\nu} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_2^2 + (-\sigma_1)^2} \quad (3)$$

sendo ε_a , ε_b , ε_c , as extensões máxima, intermédia e mínima, respectivamente.

Devido à espessura da parede da secção tubular do engate ser bastante menor que a largura e o comprimento do mesmo, admitiu-se que a tensão era nula na direcção da espessura (direcção normal ao plano onde as rosetas foram coladas).

Na figura 5 estão representados os histogramas das tensões de fadiga para as rosetas 1, 6 e 7. Para estes histogramas admitiu-se um intervalo de tensões de 5MPa e o número de ciclos acumulados é o total.

A relação tensão versus razão de tensões é caracterizada por uma função linear como mostra a figura 6.

4 - CURVAS S-N

4.1 - Provetes, parâmetros e resultados de ensaios.

Os testes de iniciação de fissuração por fadiga são procedimentos nos quais um provete ou componente é sujeito a um carregamento cíclico até à fractura. Uma grande parte dos ciclos nestes testes é utilizada na iniciação da fissura. Apesar dos testes de fadiga realizados em pequenos provetes não estabeleceram precisamente a vida de fadiga da peça, estes testes fornecem dados sobre o comportamento intrínseco ao início de fissuração do metal ou liga. Como resultado, estes dados podem ser utilizados para desenvolver critérios de prevenção e de vida à fadiga em situações, como é o caso presente, em que a peça é retirada de serviço quando se inicia a fissura.

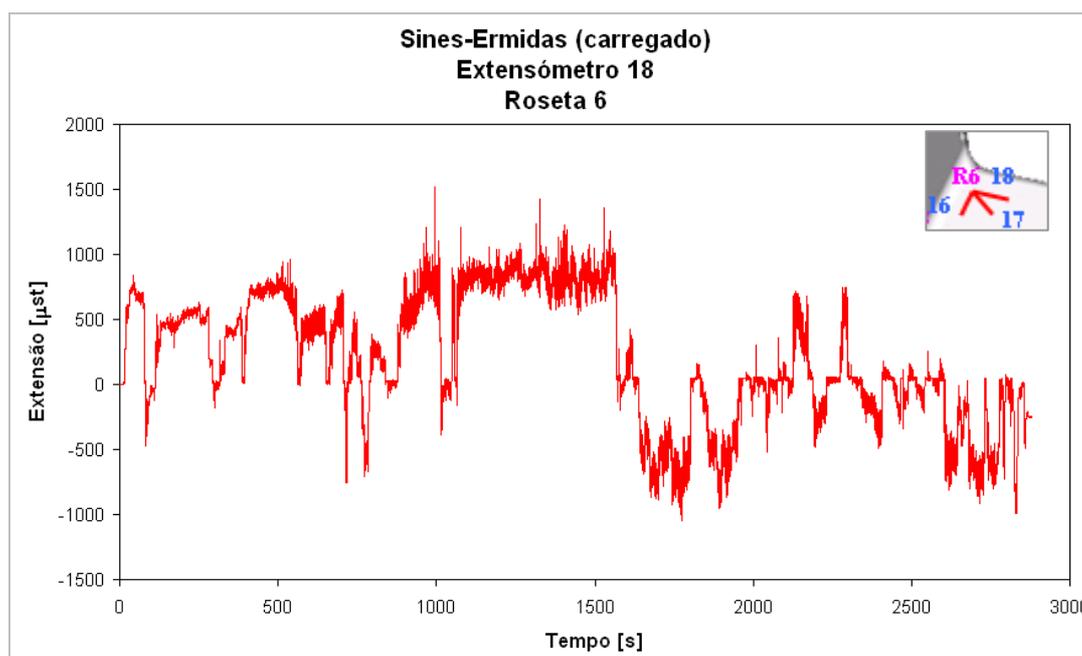


Fig 4 - Espectro de leitura do extensómetro 18 da roseta 6 no percurso Sines-Ermidas.

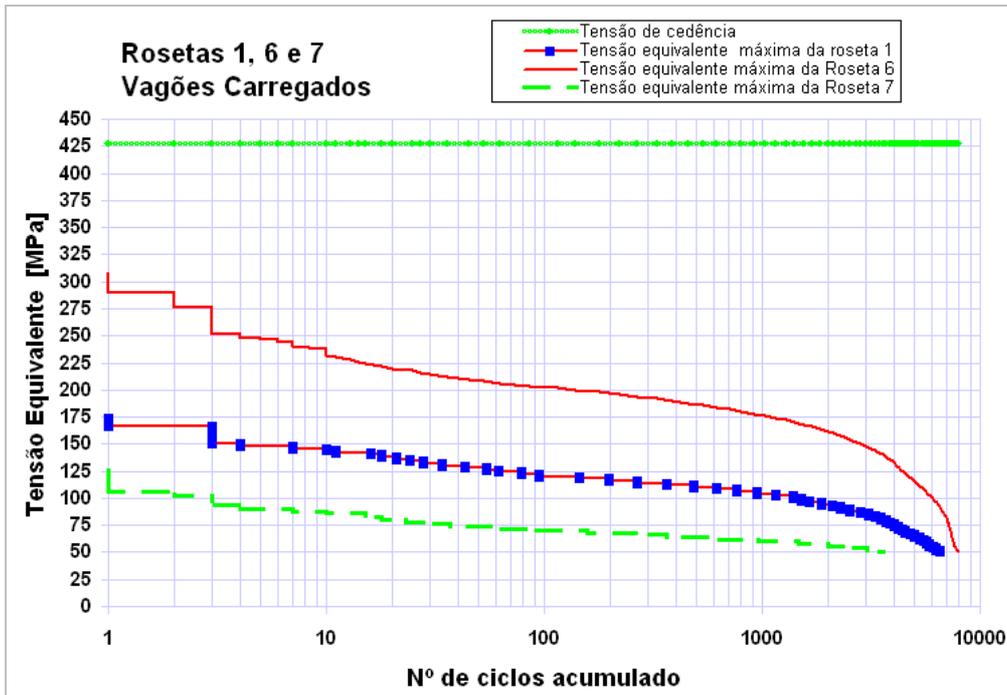


Fig 5 - Diagrama de tensões versus número de ciclos acumulados para as rosetas 1, 6 e 7 (percurso Sines-Ermidas).

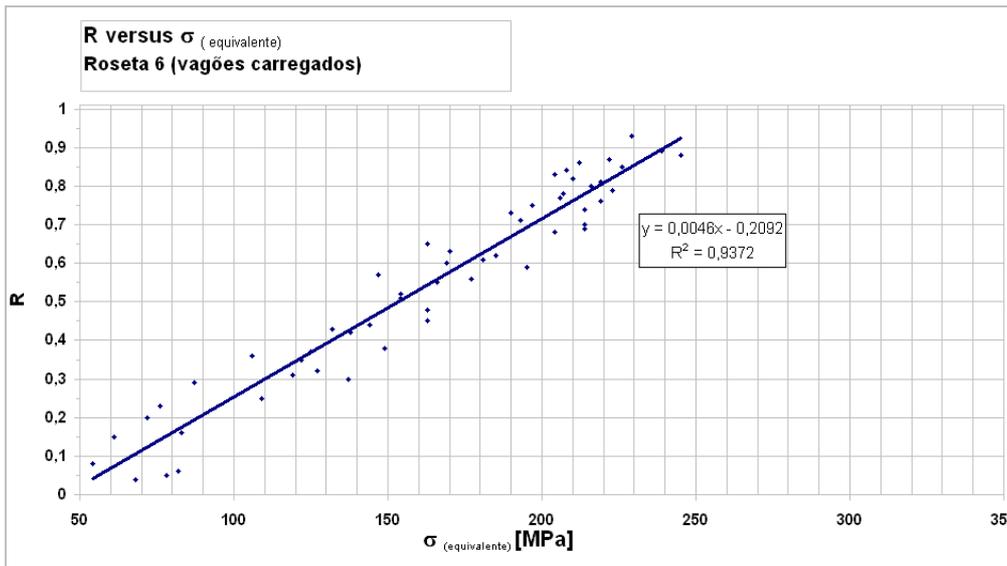


Fig 6 - Relação entre a tensão equivalente e a razão de tensões da roseta 6, percurso Sines-Ermida.

Os provetes foram ensaiados à tracção com ciclos de amplitude de tensão alternada constante com $R=0.05$. A frequência de ciclos de carga utilizada nos ensaios foi de 8-10Hz. O critério de fim de ensaio utilizado foi a rotura ou uma vida superior a 6.000.000 de ciclos.

Estes ensaios foram efectuados na máquina servohidráulica DARTEC de 10 ton. de capacidade máxima de carga, controlada pelo software DARTEC

Workshop 95, do Laboratório de Ensaios Mecânicos do DEM do IST.

Foram ensaiados 12 provetes de geometria cilíndrica, maquinados segundo a norma E8 da ASTM. A secção resistente dos provetes tem um diâmetro $D=10,7\text{mm}$ e um comprimento de referência $l_0=25\text{mm}$ (figura 7).

Na tabela 1 encontram-se representados os resultados dos doze ensaios já referidos.

Nesta tabela, $\Delta\sigma$ é a gama da tensão do ciclo de fadiga, dada pela expressão 4:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (4)$$

em que σ_{\max} e σ_{\min} são respectivamente as tensões máxima e mínima do ciclo de fadiga. F_{\max} e F_{\min} são as forças máximas e mínimas correspondentes a σ_{\max} e σ_{\min} , respectivamente. O número de ciclos é até à rotura completa do provete.

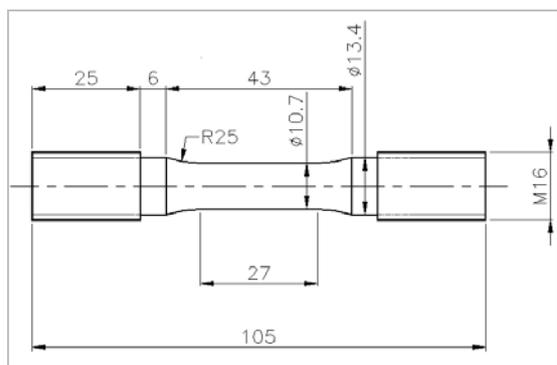


Fig 7 - Desenho dos provetes nos ensaios de fadiga (ASTM E8). Aço vazado A148 90-60

4.2 - Resultados. Curvas S-N de fadiga

Os resultados obtidos nos ensaios de fadiga apresentam valores dispersos, por isso é necessário realizar o tratamento estatístico dos resultados.

Para o tratamento estatístico destes resultados recorreu-se ao formulário da norma ASTM E739-91.

Determinou-se o declive da curva S-N pelos dados de vida finita, $N=1 \times 10^4$ e $N=1 \times 10^7$ (Nakazawa, 1997). Na escala bi-

logarítmica, este declive é dado pela relação 5:

$$\log N = \log C - m \log S \quad (5)$$

sendo $Y = \log N$, $X = \log S$, $a = \log C$ e $b = -m$, então,

$$Y = a + bX \quad (6)$$

Os parâmetros a e b devem ser estimados dos pares gama de tensão, nº de ciclos à fadiga, (S_i, N_i) , $i=1,2,\dots,n$, obtidos nos ensaios de fadiga. Usando o método dos mínimos quadrados, a e b são estimados por \hat{a} e \hat{b} através das equações 7 e 8:

$$\hat{a} = \bar{Y} - b\bar{X} \quad (7)$$

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (8)$$

onde:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log S_i \quad (9)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log N_i = \overline{\log N} \quad (10)$$

A linha dos mínimos quadrados é dada pela equação 11,

$$\hat{Y} = \hat{a} + \hat{b}X \quad (11)$$

onde, \hat{Y} é a média de Y dado X . Então N é a mediana de $N|S$.

Tabela 1 - Resultados obtidos nos ensaios de fadiga em provetes de aço vazado.

Designação	Ø [mm]	L [mm]	$\Delta\sigma$ [MPa]	σ_{\max} [MPa]	σ_{\min} [MPa]	F_{\max} [KN]	F_{\min} [KN]	Nº Ciclos	Observações
F01	10.7	25.0	475.00	500	25.00	45.00	2.250	46 540	
F02			475.00	500	25.00	45.00	2.250	8 044	
F03			427.50	450	22.50	40.00	2.000	128 780	
F04			427.50	450	22.50	40.00	2.000	96 940	
F05			380.00	400	20.00	36.00	1.800	88 098	
F06			275.00	300	15.00	27.00	1.350	6 000 000	Sem rotura
F07			380.00	400	20.00	36.00	1.800	28 668	
F08			332.50	350	17.50	31.50	1.575	186 285	
F09			332.50	350	17.50	31.50	1.575	788 039	
F10			332.50	350	17.50	31.50	1.575	43 436	
F11			308.75	325	16.25	29.22	1.461	217 466	
F12			275.00	300	15.00	27.00	1.350	101 594	

Representando vida à fadiga em ciclos em abcissas numa escala logarítmica e a distribuição cumulativa das falhas ou sobrevivências para níveis de tensões particulares em ordenadas, obtemos uma linha recta considerando a função distribuição log-normal (Shu-Ho Dai, Ming-O Wang, 1992). A população média e o desvio padrão, são estimados pelas relações 12 e 13:

$$\mu = \overline{\log N} = \frac{\sum_{i=1}^n \log N_i}{n} \quad (12)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n (\log N_i)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \log N_i \right)^2 \right]} \quad (13)$$

A distribuição de vida log-normal pode ser usada para determinar qualquer probabilidade de falha. Sabendo que a fiabilidade, R, é definida por R=1-P onde P é a probabilidade de falha. Então, por exemplo, a curva de 5% de probabilidade de falha pode ser designada por curva de fiabilidade de 95%.

Na figura 8 encontram-se representadas as curvas S-N para as diversas fiabilidades considerando a distribuição log-normal. As equações das curvas obtidas para uma

fiabilidade de 50%, 90%, 95% e 99% são respectivamente as equações 14, 15, 16 e 17:

$$NS^{10,147} = 4,53E+31 \quad (14)$$

$$NS^{8,8335} = 3,35E+27 \quad (15)$$

$$NS^{8,4654} = 2,33E+26 \quad (16)$$

$$NS^{7,7693} = 1,51E+24 \quad (17)$$

5 - ANÁLISE DO DANO DE FADIGA E PREVISÃO DE VIDA DE FADIGA

Os danos de fadiga foram calculados considerando o modelo linear de acumulação de dano conhecido por regra de Miner. Como a tensão média não é constante nos ciclos de fadiga fez-se o cálculo do dano ciclo a ciclo. A sequência de cálculo foi a seguinte:

- Recorreu-se ao método das rampas decrescentes para a contagem dos ciclos, e procedeu-se, no critério da tensão equivalente, ao cálculo da gama de tensões (equação 4), da amplitude de tensões da razão de tensões e da tensão média, recorrendo às respectivas fórmulas:

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (18)$$

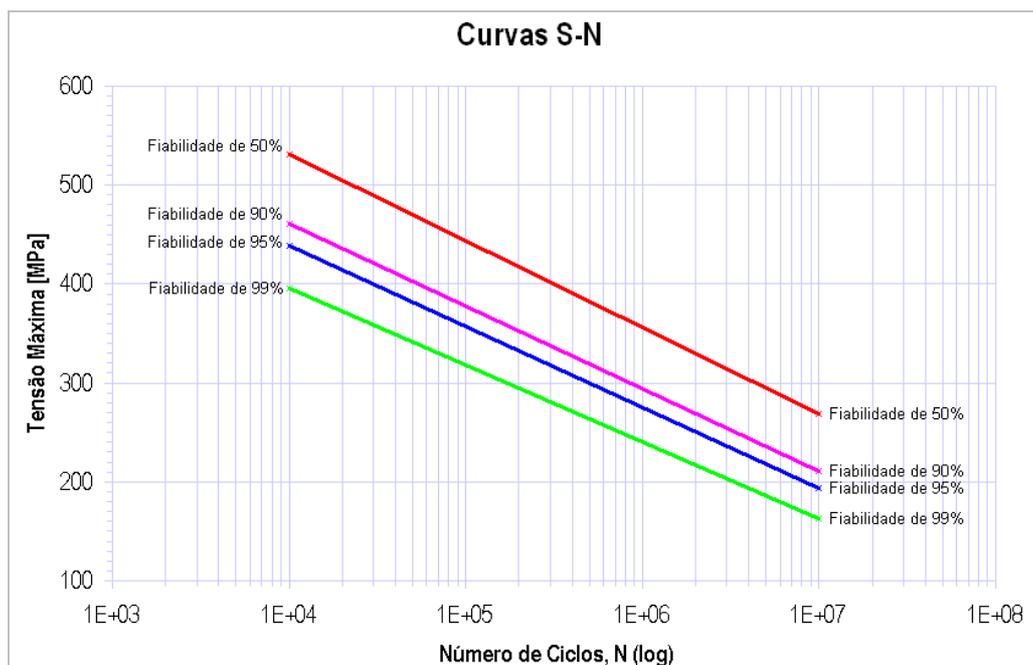


Fig 8 - Curvas S-N para fiabilidades de 50%, 90%, 95% e 99%.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (19)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (20)$$

➤ Determinou-se o dano, roseta a roseta, da seguinte forma:

- Calculou-se a tensão limite de fadiga considerando:
 - $\sigma_R = 659,9$ MPa
 - $N = 1 \times 10^6$ ciclos, determinou-se $\sigma_{\max(R=0.05)}$ através das equações da curva de fadiga S-N, para as diferentes fiabilidades de 99%, 95%, 90% e 50% e substituiu-se esse valor na equação 21.

$$\sigma_{R=0.05}^{\max} \left[\frac{1}{\sigma_{f0}} \left(\frac{1-0.05}{2} \right) + \left(\frac{1+0.05}{2} \right) \frac{1}{\sigma_r} \right] = 1 \quad (21)$$

- Ciclo a ciclo calculou-se a tensão máxima (para cada R) considerando o critério de Goodman (*Radaj, 1994*):

$$\sigma_{\max R} \left[\frac{1}{\sigma_{f0}} \left(\frac{1-R}{2} \right) + \left(\frac{1+R}{2} \right) \frac{1}{\sigma_r} \right] = 1 \quad (22)$$

- Recalculou-se, ciclo a ciclo, o nº de ciclos recorrendo novamente às equações (14), (15), (16) e (17) e calcularam-se os respectivos danos através da equação 23:

$$DANO = \frac{1}{N} \quad (23)$$

Os resultados do dano de fadiga foram obtidos para um nível de truncatura para uma tensão máxima no ciclo de fadiga igual a 50MPa, o que corresponde a uma vida de fadiga de 10^8 ciclos, entrando com as equação das curvas S-N (50%, 90%, 95% e 99%) do aço. Esta hipótese é justificada pelo cálculo do número de ciclos de fadiga da caixa para uma vida útil de 25 anos, que se apresenta a seguir:

- Vida útil da estrutura, em Ciclos

- Frequência média dos ciclos de fadiga: 0.6Hz
- Tempo de serviço da estrutura [s]:

25 Anos x 300 dias = 3.24×10^8 segundos

- Vida útil em ciclos de fadiga
 $3.24 \times 10^8 \times 0.6\text{Hz} = 1.944 \times 10^8$ ciclos

Os resultados dos danos por viagem calculados indicam valores mais elevados de dano para as rosetas 1 e 6 como se esperava.

Admitindo o critério de dano igual a 1 para a situação de início de fissuração, podem calcular-se o número de viagens críticas para os casos de maior dano/viagem. A figura 9 apresenta o estudo da estimativa de vida em anos para as rosetas 1, 6 e 7, considerando as fiabilidades de 50%, 90%, 95%, 99%.

Considerando a curva mais conservadora (curva S-N de 99%), verifica-se que ao fim de 1,73 anos surge a primeira fissura na face inferior da zona de concordância da cabeça do engate (ver figura 9 - roseta 6). Este valor de tempo de serviço deverá ser considerados aquando do projecto deste tipo de componente, assim como o dimensionamento da tensão limite de fadiga deverá ser corrigido com o tipo de acabamento e o factor escala.

7- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- As rosetas que deram tensões e danos de fadiga mais elevados foram os da concordância superior da cabeça do engate (rosetas 1 e 6), locais onde têm sido detectadas a grande maioria das fissuras de fadiga.
- Os valores calculados para as vidas de fadiga aproximam-se dos tempos de serviço, ao fim dos quais se iniciaram as fissuras de fadiga.
- As previsões de vida de fadiga apresentam valores de vida e de número de quilómetros percorridos bastante baixos e portanto a probabilidade de se verificar fissuração prematura na concordância da cabeça do engate será bastante elevada, o que continua a verificar-se.

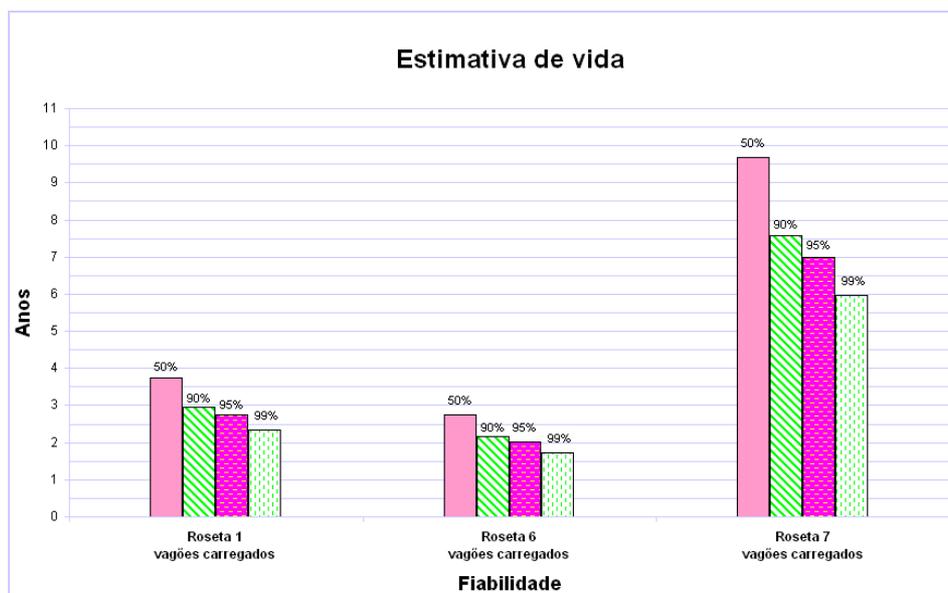


Fig 9 - Estimativa de vida em anos para fiabilidades de 50%, 90%, 95% e 99%.

Para tentar eliminar os problemas de fissuração nos engates sem ter que os substituir recomenda-se:

- Melhorar o acabamento superficial do engate com uma rectificação e até polimento cuidadoso nas concordâncias, de modo a não aparecerem sulcos e incisões, ficando a peça lisa.
- Fazer uma avaliação da vida residual dos engates fissurados para determinar valores da vida de fadiga após o aparecimento de fissuras. Se os resultados desta avaliação derem valores de vida residual satisfatórios e com o nível de segurança adequado os engates fissurados poderão continuar ao serviço com controlo da fissuração.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração das empresas Tejo Energia S.A., CP –Caminhos de Ferro Portugueses - EP e EMEF S.A..

REFERÊNCIAS

- ASTM E 739-91, “Statistical analysis of linear or linearized stress-life (S-N) and strain-life (ϵ -N) fatigue data”, American Society for Testing and Materials, USA, 1991.
- ASTM, “Specification for tensile testing of cast ferrous materials”, American Society for Testing and Materials, USA, E8 specification, 1992.

Moura Branco, C., Fernandes, A. A., Castro, P.T., “Fadiga de Estruturas Soldadas”, 2ª ed. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1999.

Moura Branco, C., “Mecânica dos Materiais”, 3ª ed. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1999.

Moura Branco, C., A., Infante, V., Morgado, T. L. M., Samões, A., “Estudo das tensões de fadiga em serviço nos engates dos vagões de transporte de carvão da linha Sines-Pego com a nova linha electrificada”, relatório final para a EMEF e Tejo Energia, IDMEC, Novembro 2003.

Nakasawa, Hajime, “Statistical S-N Testing Method with 14 Specimens: JSME Standard Method for determination of S-N Curves”. In Statistical Research on Fatigue and Fracture, ed. Tsuneshichi Tanaka, pp 59-69. London, New York: Elsevier Applied Science, 1987.

Radaj, D., “Design and Analysis of Fatigue Resistant Welded Structures”, Ed. Abington Publishing, Cambridge, U.K., 1994.

Shu-Ho Dai, Ming-O Wang, “Reliability Analysis in Engineering Applications”, Van Nostrand Reinhold, New York, 1992.

Sousa e Brito, A., Branco, C. M., Infante, V., “A failure analysis study of cast steel railway couplings used for coal transportation - Part II- Microstructural and Fractographic analysis”, 8as Jornadas de Fractura-Vila Real 2002, Livro das comunicações, Divisão de Fractura da Sociedade Portuguesa de Materiais, pp.463-466.

Stephens, Ralph I.; Fatemi, Ali; Stephens, Robert R.; Fuchs, Henry O; “Metal Fatigue in Engineering”, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2001.