

PREVISÃO DE VIDA À FADIGA DE UM COMPONENTE FERROVIÁRIO BASEADA NAS FUNÇÕES DA DISTRIBUIÇÃO CUMULATIVA NORMAL ESTANDARDIZADA DA TENSÃO EQUIVALENTE

T. L. Morgado¹, C. M. Branco², V. Infante²

¹ ICEMS - IST – UTL Instituto de Ciência e Engenharia de Materiais e Superfícies
Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Politécnico de Tomar
Escola Superior de Tecnologia de Abrantes
Rua 17 de Agosto de 1808, 2200-370 Abrantes, Portugal
E-mail: tmorgado@ipt.pt

² ICEMS - IST – UTL Instituto de Ciência e Engenharia de Materiais e Superfícies
Departamento de Engenharia Mecânica,
Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa,
Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal
E-mail: cmbranco@dem.ist.utl.pt
E-mail: virginia.infante@ist.utl.pt

RESUMO

Neste artigo é apresentada uma metodologia de cálculo para obtenção da previsão de vida à fadiga tendo em conta as curvas S-N para fiabilidades de 50% e 90%, e as funções da distribuição cumulativa normal standardizada da tensão equivalente de um componente ferroviário. Este componente, denominado engate, é de aço vazado obtido por fundição em areia com a especificação ASTM A148 90-60, e é usado nos comboios de mercadorias. Esta peça tem como principal função o acoplamento do primeiro vagão à locomotiva e o acoplamento dos diferentes vagões entre si. Esta peça ferroviária está sujeita a carregamentos de amplitudes variáveis e apresenta problemas de fissuração prematura. Para a realização deste trabalho foram obtidos dados em serviço, usando rosetas extensométricas, numa viagem de rotina com os vagões carregados. Foram determinadas as zonas mais críticas do componente e calculadas as respectivas vidas à fadiga. A metodologia também foi testada na zona nominal, sendo apresentado o resultado da previsão de vida à fadiga nessa zona.

PALAVRAS-CHAVE: componente ferroviário, carregamentos de amplitude variável, previsão de vida à fadiga, função distribuição cumulativa normal standardizada.

ABSTRACT

This article is presented a methodology for calculate fatigue life prediction taking into account the S-N curves for 50% and 90% reliabilities and the standardized equivalent stress-time histories of a railway component. This component, called railway coupling, is obtained by steel casting with ASTM specification A148 90-60, and is used on freight trains. The principal function of this component is the coupling between the first wagon and locomotive and between the different wagons. This railway structural piece is subject to varying amplitudes uploads and premature cracking problems. Data were obtained using strain gauges rosettes in service, in a load wagons routine travel. Fatigue life predictions, in years, were calculated for the determinate critical zones. The present methodology was tested on nominal zone and the result of fatigue life prediction was calculated.

KEY WORDS: railway component, variable amplitude loading, fatigue life prediction, standardized load-time histories.

1. INTRODUÇÃO

As estruturas ferroviárias estão sujeitas a problemas de fadiga que podem originar ruína. Com a excepção dos carris de caminho de ferro em que um dos principais mecanismos de dano é a fretagem e a fadiga de rolamento, nos restantes componentes estruturais o

principal aspecto a ter em conta no projecto é definitivamente a fadiga estrutural.

A fadiga estrutural, que origina frequentemente fissuração nas zonas críticas é causada pelas cargas dinâmicas que se exercem na estrutura induzidas por

vários efeitos que têm maior ou menor importância consoante o tipo de órgãos ou componente estrutural. Em contraste com o caso do projecto estático baseado nas tensões de cedência ou de rotura do material, ou seja nas tensões admissíveis, o projecto à fadiga baseia-se nas curvas S-N para uma amplitude de carga constante, ou nas curvas de vida à fadiga para cargas de amplitude variável.

A vida à fadiga deverá ser determinada pelas condições de carregamento em serviço, através do “espectro” de cargas ou tensões obtidas em serviço nas zonas críticas do componente.

No estudo da influência dos carregamentos na vida de fadiga (número de ciclos de fadiga), observa-se que no caso de carregamento de amplitude variável, a vida à fadiga depende da distribuição de frequência acumulada (“forma do espectro”), e pode ser várias ordens mais elevadas do que a verificada em carregamentos de amplitude constante [1, 2]. A importância do “espectro de carga” foi reconhecida por Ernest Gaßner, em 1938, ao formular o procedimento para a simulação do carregamento a amplitude variável, para estruturas aeronáuticas. Pela década de 60 (século vinte), com o surgimento das máquinas de ensaio servo hidráulicas, o histórico programa “eight-block-programme test” pode ser substituído pelo processo de carga versus tempo mais realístico, recorrendo à função de distribuição de frequência cumulativa Gaussiana. Os diagramas cargas versus tempo dependem das aplicações particulares e das funções dos componentes, nos últimos 65 anos têm sido desenvolvidas diferentes aplicações relacionadas com o espectro padrão [3], e continuam-se a desenvolver.

Neste trabalho é desenvolvida uma metodologia de cálculo para obtenção da previsão de vida à fadiga tendo em conta as funções da distribuição cumulativa normal standardizada da tensão equivalente de um componente ferroviário e as curvas S-N para fiabilidades de 50% e 90%. Este componente, denominado engate, é de aço vazado obtido por fundição em areia com a especificação ASTM A148 90-60, e é usado para ligar o primeiro vagão do comboio à locomotiva e às diferentes carruagens entre si.

2. CURVAS S-N

A derivação das curvas de projecto para diferentes probabilidades de sobrevivência adoptadas é obtida através da análise estatística dos resultados experimentais (duração de vida) para vários níveis de tensão a amplitude constante. Para cada nível de tensão pode definir-se uma função densidade de probabilidade da duração à fadiga. A curva de projecto é obtida unindo os pontos correspondentes a uma determinada probabilidade de sobrevivência. Os modelos matemáticos que têm sido propostos para descrever a dispersão da duração à fadiga são diversos [4, 5].

Com base nesta metodologia é possível determinar a tensão admissível para uma determinada duração prevista, assumindo uma determinada probabilidade de sobrevivência.

A norma ASTM E739-91 (2004) [6] sugere um procedimento para tratamento estatístico de dados que deverá ser tido em conta na construção das curvas de projecto. Este procedimento foi seguido e na Figura 1 encontra-se esquematizado em linguagem natural, o algoritmo de cálculo para a obtenção da curva S-N para uma determinada probabilidade de falha.

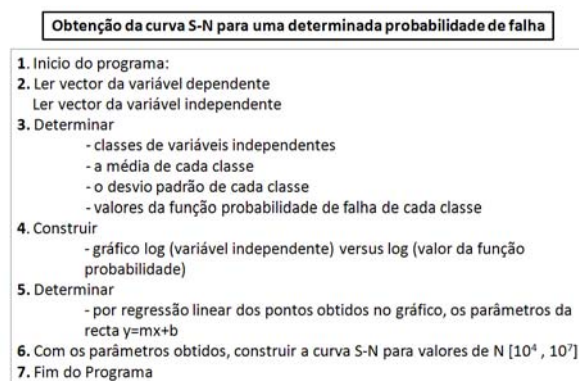


Figura 1 Algoritmo em código natural usado na obtenção da curva S-N para uma determinada probabilidade de falha.

A descrição estatística do comportamento à fadiga com as correspondentes probabilidade de sobrevivência e dispersão, é importante para considerações de segurança. A banda de dispersão valores associada às curvas S-N é assumida como uma distribuição normal Gaussiana em escalas logarítmicas. Um dos parâmetros característicos de uma banda de dispersão é o índice de intervalo de dispersão T_σ , obtido pela expressão (1), para probabilidade de sobrevivência de 10% e 90% [7]. O factor de segurança j , depende do valor da probabilidade de falha e do índice de intervalo de dispersão T e é expresso pela relação (2).

$$T_\sigma = \frac{\sigma(P_s = 10\%)}{\sigma(P_s = 90\%)} \quad (1)$$

$$j = \left(\frac{1}{T} \right) \exp \left(\frac{\left(2,36 \sqrt{\lg(1 - P_s)} \right) - 1}{2,56} \right) \quad (2)$$

Os dados usados na obtenção das curvas S-N foram obtidos dos ensaios de fadiga em 12 provetes de geometria cilíndrica, maquinados segundo a norma ASTM E8M-04 [8]. A secção resistente dos provetes tem um diâmetro $\varnothing=10,7$ mm e um comprimento de referência $L_0=25$ mm. Os provetes foram ensaiados à tracção com ciclos de amplitude de tensão alternada

constante para uma razão de tensões de $R=0,05$. 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 ou igual a 6.000.000 de ciclos.

Estes ensaios foram realizados na servo-hidráulica DARTEC M1000/RK do Laboratório de Ensaios Mecânicos do DEM do IST.

Na Figura 2 encontram-se representadas as curvas S-N para probabilidades de falha considerando a distribuição log-normal onde as dispersões e os factores de segurança para as fiabilidades de 90% são respectivamente, $T_\sigma (P_s=90\%)=1:1,29$ e $j_\sigma (P_s=90\%)=2,19$.

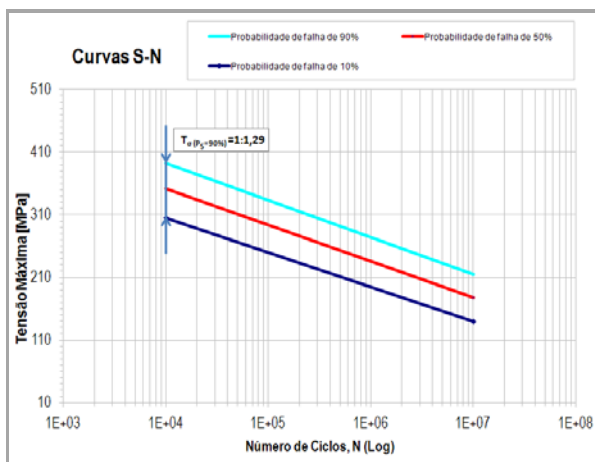


Figura 2 Curvas de projecto com as respectivas dispersões para fiabilidade de 90%.

3. FUNÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO CUMULATIVA NORMAL ESTANDARDIZADA DAS TENSÕES EQUIVALENTES

O diagrama de frequência cumulativa das tensões corresponde a probabilidade cumulativa das tensões em termos de escalões de tensões versus número de ciclos. A curva destes diagramas é portanto uma função contínua.

As recomendações do IIW [9] sugerem ainda que o cálculo de dano deva ter em conta 20 escalões de tensões para um número de ciclos de vida esperados, superior a 10^8 ; e para um número de ciclos inferior, 8 a 10 escalões de tensões sejam suficientes. O espectro pode ser caracterizado através de uma tabela de escalões discretos.

No entanto, a análise estatística de dados sugere diferentes regras empíricas que deverão ser tidas em conta na determinação da quantidade de classes e amplitude destas, para grandes amostras. Esta metodologia foi a seguida, no âmbito deste trabalho.

Assim foi desenvolvido um procedimento empírico, tendo em conta os diferentes espectros obtidos em serviço através de extensometria eléctrica, do engate que liga a locomotiva ao primeiro vagão, no percurso Sines-Ermidas [10], para a determinação da amplitude das classes e construção dos histogramas.

O método de contagem de ciclos recomendado pelo IIW [9] é o método Rainflow e foi o utilizado no âmbito deste artigo. No entanto, é de salientar que os autores realizaram estudos comparativos dos diferentes métodos de contagem de ciclos propostos e descritos na literatura e verificou que para grandes amostras, os métodos de contagem como o método de gamas no sentido ascendentes e no sentido descendente e o método de Rainflow tendem para o mesmo valor [11, 12].

Tendo-se chegado à conclusão que as funções distribuição cumulativas eram do tipo Gaussiana ou seja obedece à lei (3). As variáveis S , σ_{eq} e L , representam respectivamente o desvio padrão, a tensão equivalente média e o tamanho da amostra.

$$P(\xi \geq \sigma_{eq}) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \int_{\sigma_{eq}}^{\infty} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\xi - \bar{\sigma}_{eq}}{s}\right)^2\right] d\xi \quad (3)$$

Na Figura 3 encontra-se esquematizado em linguagem natural, o procedimento de cálculo para a obtenção da distribuição cumulativa estandardizada utilizado.

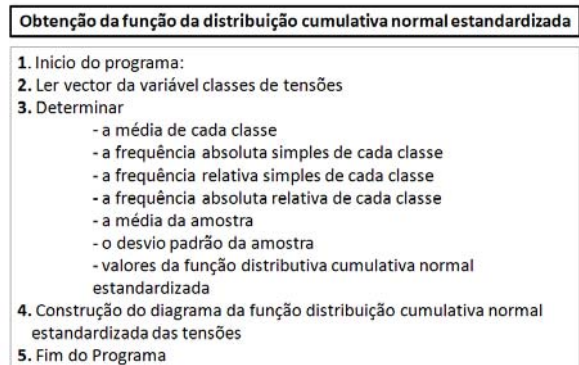


Figura 3 Algoritmo em código natural usado na obtenção da função da distribuição normal estandardizada.

Os resultados dos diagramas da função cumulativa normal estandardizada das tensões obtidas em serviço das rosetas 1, 6 e 7 [10] estão apresentados nas Figuras 4, 5 e 6 respectivamente. Nestes diagramas teve-se em conta a regra de Sturges. As rosetas 1 e 6 foram escolhidas por apresentarem valores de tensão mais críticos e a roseta 7 foi escolhida para comparação por se encontrar na zona nominal. Constata-se que a frequência acumulada para as rosetas 1, 6 e 7 apresenta valores até $7E+01$, $9E+3$ e $9E+5$, respectivamente.

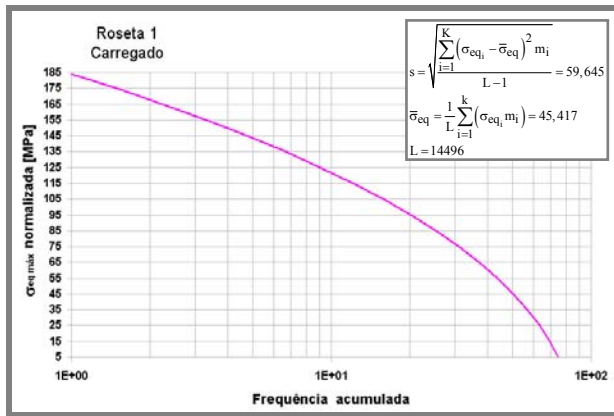


Figura 4 Função da Distribuição Cumulativa Normal Estandarizada da tensão equivalente da roseta 1 no percurso Sines-Ermidas.

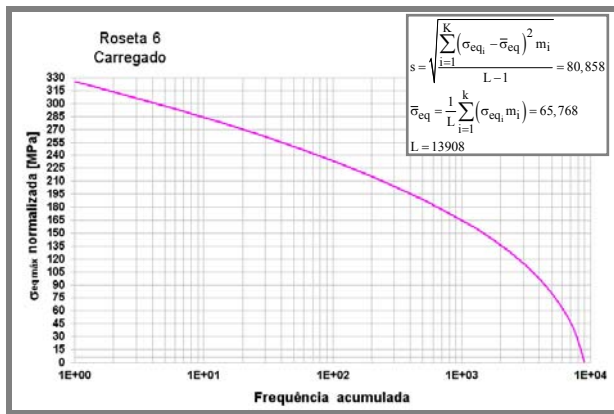


Figura 5 Função da Distribuição Cumulativa Normal Estandarizada da tensão equivalente da roseta 6 no percurso Sines-Ermidas.

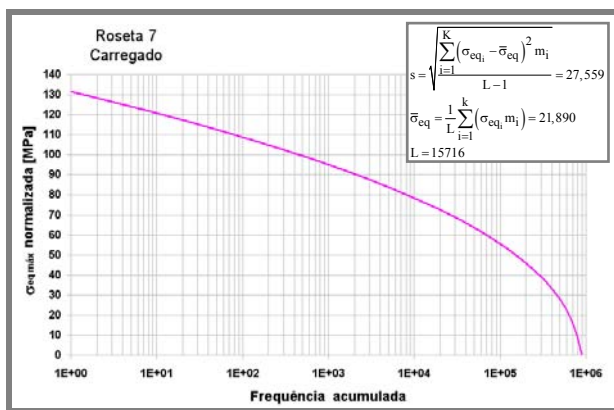


Figura 6 Função da Distribuição Cumulativa Normal Estandarizada da tensão equivalente da roseta 7 no percurso Sines-Ermida.

4. PREVISÃO DE VIDA À FADIGA

Na programação da rotina de cálculo de dano do componente ferroviário em causa, considerou-se o modelo linear de acumulação de dano com a regra de Miner. Entrou-se em conta com as tensões máximas equivalentes obtidas em serviço e com as curvas S-N obtidas para as fiabilidades de 50% e 90%.

Ou seja, com os dados das funções de distribuição cumulativa Gaussiana, é obtido o dano real para as diferentes fiabilidades através das curvas de vida à fadiga, recorrendo às equações (4) e (5) [13]. Onde o somatório das frequências absolutas simples do número de ciclos é dado pelo parâmetro \bar{N}_{exp} ; L_s é o somatório da variável estandardizada na distribuição Gaussiana; n_i é o número de ciclos por classes no histograma e N_i é o número de ciclos correspondentes a cada tensão por classes do histograma nas curvas S-N.

$$D_{real} = \frac{D_{esp}}{L_s} \bar{N}_{exp} \quad (4)$$

$$D_{esp} = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \quad (5)$$

5. RESULTADOS

No cálculo da previsão da vida de fadiga deste componente ferroviário teve-se em conta o número de viagens por ano que em média os componentes em causa realizam.

Na Figura 7 são apresentados os resultados da metodologia proposta, onde se constata que:

- A roseta 7, sendo uma roseta nominal é de esperar que apresente uma vida infinita, como se verifica.
- As rosetas mais críticas, rosetas 1 e 6, para fiabilidades de 90% apresentam valores de previsão de vida abaixo de um ano.
- Para fiabilidades de 50%, a previsão de vida é de cerca de 5 anos para a roseta 1 e de cerca de 3 anos para a roseta 6.

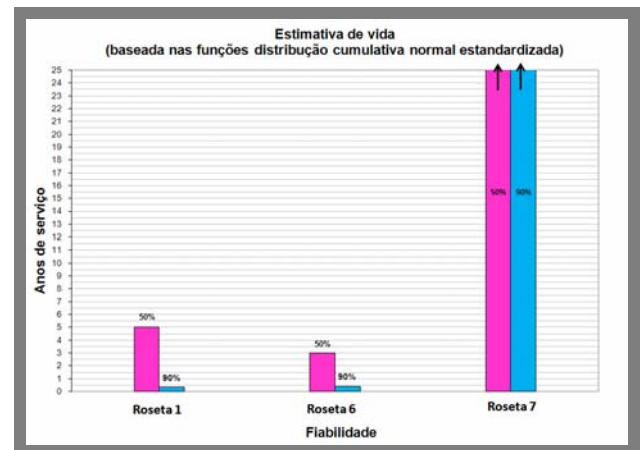


Figura 7 Previsão de vida tendo em conta as funções da Distribuição Cumulativa Normal Estandarizada das tensões equivalentes das rosetas 1, 6 e 7 no percurso Sines-Ermida.

6. CONCLUSÕES

Durante o trabalho de pesquisa realizada aos componentes retirados de serviço, as zonas de fissuração prematura coincidiram com as zonas de maior concentração de tensões, ou seja entre a cabeça do engate e o corpo do engate (zona da colagem da roseta 1 e roseta 6); também se verificou que em determinados componentes a fissuração prematura também aparecia no seu interior; e constatou que não houve surgimento de fissuração prematura na zona designada por nominal (zona de colagem da 7).

Do que foi analisado neste artigo, conclui-se que a metodologia de cálculo aqui apresentada prevê fissuração prematura de acordo com o que sucede na vida útil de serviço destes componentes, tanto para as zonas críticas como para a zona nominal.

7. REFERENCES

- [1] Sonsino C. M., “Fatigue design and testing of components”, 6^{as} Jornadas de Fractura - Porto 1998, Livro das comunicações, Divisão de Fractura da Sociedade Portuguesa de Materiais, 3-46.
- [2] C. Berger, K.-G. Eulitz, P. Heuler, K.-L. Kotte, H. Naundorf, W. Schuetz, C.M. Sonsino, A. Wimmer, H. Zenner, “Betriebsfestigkeit in Germany - an overview”, International Journal of Fatigue, 24 (2002) 603–625.
- [3] Heuler P., Kläutschke H. “Generation and use of standardized load spectra and load–time histories”. International Journal of Fatigue 2005;27(8):974–90.
- [4] Shu-Ho Dai, Ming-O Wang, “Reliability Analysis in Engineering Applications”, Van Nostrand Reinhold, New York, 1992. ISBN: ISBN 0-442-00842-2.
- [5] 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, London, New York: Elsevier Applied Science, (1987) 59-69.
- [6] ASTM E739-91(2004), “Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (e-N) Fatigue Data”, Developed by Subcommittee E08.04, Book of Standards Volume: 03.01, West Conshohocken, USA.
- [7] Sonsino C. M., “Course of SN-curves especially in the high-cycle fatigue regime regard to component design and safety”, Int. J. Fatigue (2007), doi:10.1016/j.ijfatigue.2006.11.015.
- [8] ASTM E8M-04, “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]”, Developed by Subcommittee: E28.04, Book of Standards Volume: 03.01, West Conshohocken, USA.
- [9] Hobbacher A., “Fatigue design of welded joints and components. Recommendations of IIW Joint Working Group XIII-XV”, XIII-1539-96/XV-845-96, Abington Publishing.
- [10] Morgado T. L., “Integridade estrutural de um componente ferroviário”, Tese de Doutoramento, IST-UTL Lisboa, 2009.
- [11] Morgado T. L., Branco C. M., Infante V., “Local Elastic deformations in the railway couplings used for coal transport”, 9^{as} Jornadas de Fractura - Setúbal 2004, Livro das comunicações, Divisão de Fractura da Sociedade Portuguesa de Materiais, 475-494.
- [12] Morgado T. L., “Estudo da influência do factor de concentração de tensões no cálculo do dano das rabetas dos vagões de transporte de carvão”, Relatório científico para as provas públicas de Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Politécnico de Tomar, Setembro de 2003.
- [13] Radaj D., Sonsino C. M., Frickle W., “Fatigue assessment of welded joints by local approaches”, Woodhead Publishing Limited, second edition, Cambridge, England, 2006. ISBN-13: 978-1-84569-188-2.