

ESTUDO DO COMPORTAMENTO À FADIGA DE PROVETES TIPO *LAP SPLICE*, USADOS EM AERONÁUTICA

P M G P Moreira, P F P Matos, F M F Oliveira, P M S T de Castro

IDMEC e Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial,
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

RESUMO

A fadiga de materiais é um dos principais problemas das estruturas aeronáuticas. Este fenómeno é acentuado em zonas de concentração de tensões, como por exemplo na ligação de componentes. A fuselagem é um importante exemplo dessa situação, sendo o processo de rebiteagem o mais usual na ligação dos painéis. No estudo destas estruturas podem usar-se provetes com várias configurações geométricas. Este trabalho debruça-se sobre o estudo de um destes tipos de provetes, junta de sobreposição com uma coluna com três linhas de rebites. Este estudo é parte da contribuição do IDMEC-Porto para o projecto Europeu ADMIRE sobre o comportamento à fadiga de estruturas aeronáuticas. Apresentam-se resultados de ensaios de fadiga a diferentes níveis de tensão, tendo-se usado técnicas de SEM (Scanning Electron Microscopy) para medir o espaçamento entre estrias de fadiga ao longo de duas direcções perpendiculares (longitudinal e transversal). O valor do EIFS (equivalent initial flaw size) é determinado recorrendo a técnicas de extrapolação inversa (back-extrapolation), e é utilizado para prever o comportamento à fadiga deste detalhe estrutural, para qualquer outra solicitação. Pretende-se desta forma verificar a aplicabilidade de modelos empíricos baseados nestas evidências experimentais.

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas em estruturas aeronáuticas é o dano estrutural provocado por fadiga. Este fenómeno é acentuado em áreas onde existam concentrações de tensões, por exemplo em ligações de componentes. A fuselagem é um dos elementos estruturais mais importantes, sendo a ligação dos seus painéis geralmente realizada por rebiteagem. Para estudar estas estruturas são utilizados provetes com várias configurações. Este trabalho tem como objectivo o estudo de um de esses provetes, junta de sobreposição com uma coluna com três linhas de rebites.

Este tipo de provete será chamado de *single-rivet lap joint*.

São apresentados resultados de tensão vs número de ciclos, assim como o seu tratamento estatístico. Usando técnicas de SEM foram realizadas medições do espaçamento entre estrias de fadiga segundo duas direcções (longitudinal e transversal). O valor do EIFS foi calculado através da técnica de *back-extrapolation* e do factor de intensidade de tensão determinado por elementos finitos. Com este valor é prevista a vida à fadiga para diversos níveis de tensão.

2. TIPO DE PROVETES TESTADO

Os ensaios de fadiga foram realizados em provetes *single-rivet lap joint*. Estes provetes não pretendem simular as juntas de sobreposição reais. Pretende-se com eles determinar o valor do EIFS, e testar a aplicabilidade deste conceito na previsão da vida à fadiga para outros níveis de carga. Se o valor do EIFS determinado não funcionar para estes provetes também não funcionará em juntas de maiores dimensões. O uso de provetes de pequenas dimensões permite eliminar incertezas causadas por complexidade geométrica. Os provetes utilizados são apresentados na figura 1. Trata-se de provetes com uma coluna com três linhas de rebites. O material utilizado é o Alumínio 2024-T3 Alclad nas placas e o Alumínio 2117-T4 nos rebites.

3. ENSAIOS DE FADIGA

No IDMEC-Porto foram testados 45 provetes a uma tensão máxima de 160 MPa com $\sigma_{\min}/\sigma_{\max} = R = 0,05$ e a uma frequência de 10Hz. Foi utilizada uma máquina MTS 312.31 com uma célula de carga de 5 kN. Nos ensaios efectuados teve-se em conta a excentricidade existente devido à geometria da juntas. Foi obtido um valor médio de 77688 *ciclos* com um desvio padrão de 18320 *ciclos*. Na figura 2 são apresentados por ordem cronológica os resultados de fadiga obtidos pelo IDMEC.

Foi realizada uma análise estatística dos resultados de fadiga. As distribuições testadas, Normal, Lognormal e Weibull 2P (2 parâmetros), foram avaliadas segundo o parâmetro quadrado do coeficiente de correlação, Abernethy, 1996. Este trabalho teve como base o programa SuperSMITH Weibull. Foram determinadas as funções PDF (*Probability Density Function*) e CDF (*Cumulative Distribution Function*).

Verificou-se que a distribuição Weibull 2P era a que melhor aproximava os resultados de fadiga. As curvas PDF e CDF para esta distribuição são apresentadas na figura 3.

Uma vez que se verificou que as vidas à fadiga se podem agrupar em dois grupos, como sugerido pela figura 2, realizou-se uma análise estatística separada dos dois grupos de ensaios. Para o grupo de provetes testado até Setembro de 2002, a distribuição Weibull 2P é a que melhor aproxima os resultados. As curvas PDF e CDF são apresentadas na figura 4.

Para os provetes testados após Setembro de 2002, a distribuição que melhor aproxima os resultados verificou-se ser também a Weibull 2P, com diferentes valores dos parâmetros. Na figura 5 são apresentadas as curvas PDF e CDF.

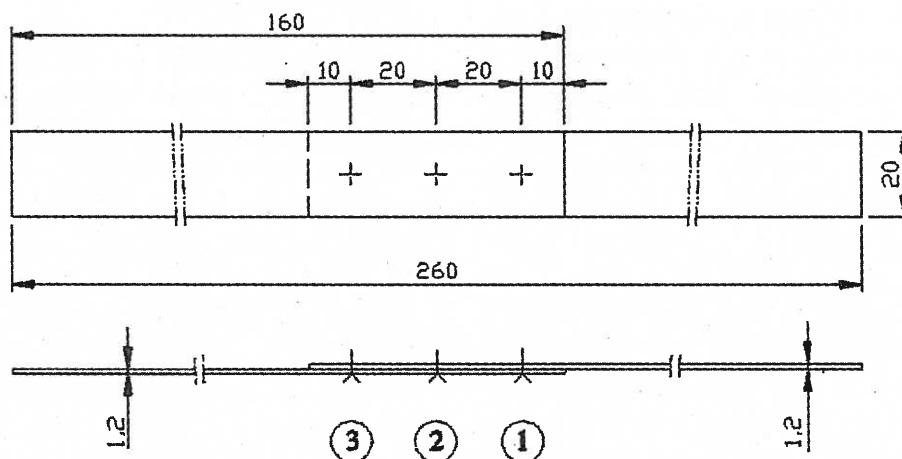


Fig 1 – Representação do provete estudado. 1, 2 and 3 são rebites do tipo NAS 1097 AD4, de diâmetro 3,2 mm.

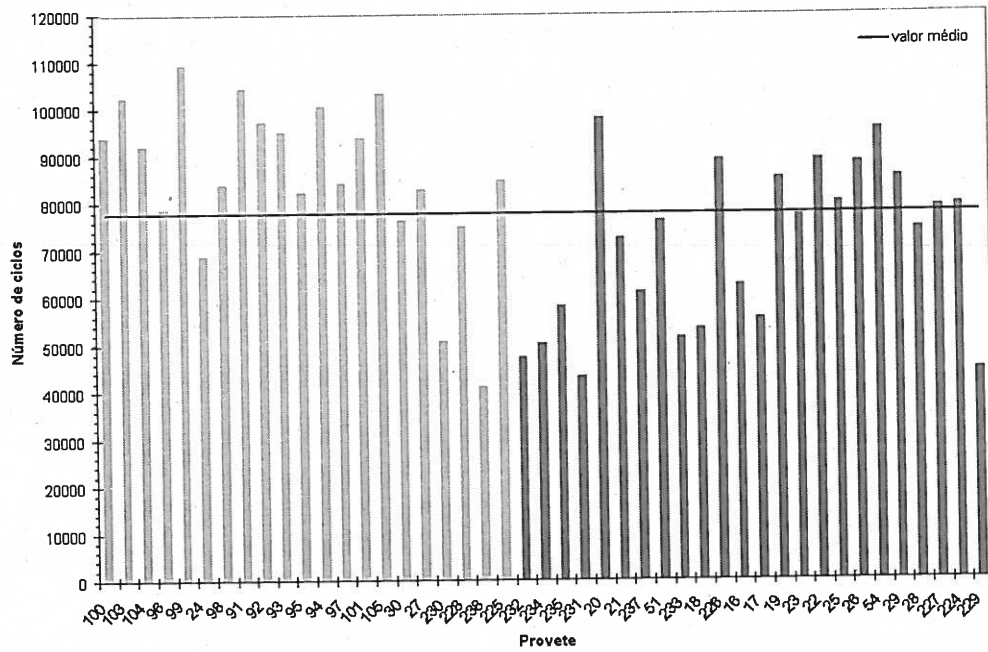


Fig 2 – Resultados de fadiga por ordem cronológica (cinzento escuro – resultados após Setembro de 2002; cinzento claro – resultados anteriores).

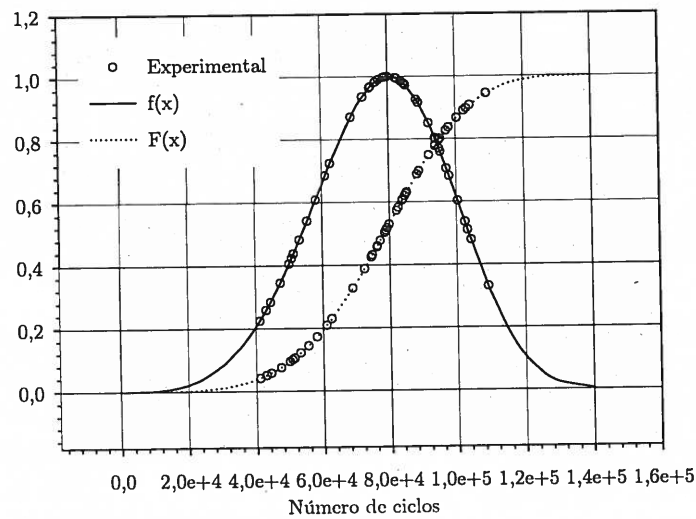


Fig 3 – PDF e CDF para a distribuição Weibull 2P, provetes testados pelo IDMEC.

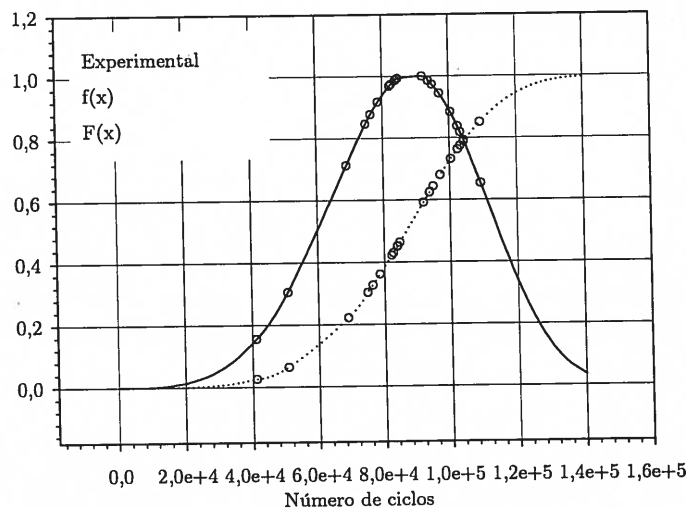


Fig 4 – PDF e CDF para a distribuição Weibull 2P, provetes testados pelo IDMEC até Setembro de 2002.

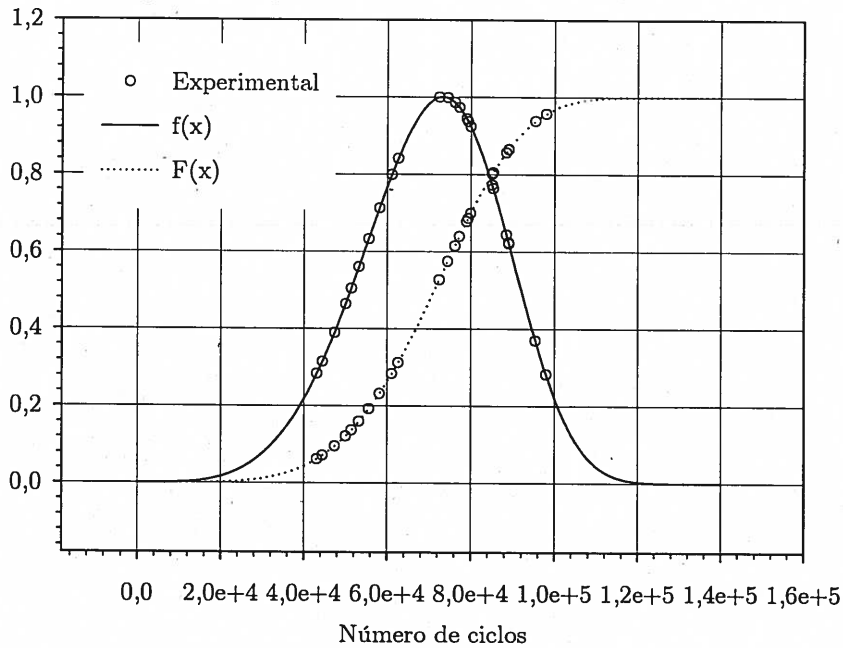


Fig 5 - PDF e CDF para a distribuição Weibull 2P, provetes testados pelo IDMEC após Setembro de 2002.

4. ANÁLISE SEM

A análise SEM foi efectuada no Centro de Materiais da Universidade do Porto (CEMUP).

4.1 Área das fendas e comprimento das fendas

Na figura 6 é representada de forma esquemática a área e o comprimento das fendas considerado nas medições.

A notação usada na figura 6 significa:

- $C_{esquerda}$: fenda de fadiga no lado esquerdo
- $C_{direita}$: fenda de fadiga no lado direito
- $\Omega_{esquerda}$: área da fenda de fadiga no lado esquerdo;

- $\Omega_{direita}$: área da fenda de fadiga no lado direito;

Considerando a posição da cabeça do rebite apresentada na figura 7, como exemplo, a fenda de fadiga presente no lado direito do provete 224 é apresentada na figura 8.

Foi realizada uma análise estatística aos resultados de comprimento de fenda obtidos. Verificou-se que a melhor aproximação é conseguida pela distribuição Weibull 2P. As curvas PDF e CDF são apresentadas na figura 9. O comprimento de fenda é definido na figura 13.

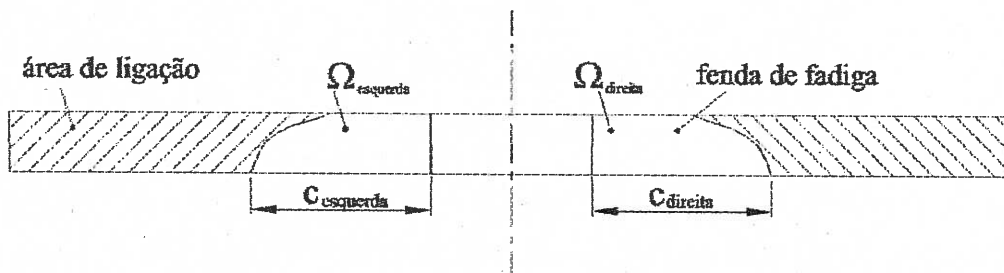


Fig 6 - Medições da área e comprimento de fenda de fadiga.

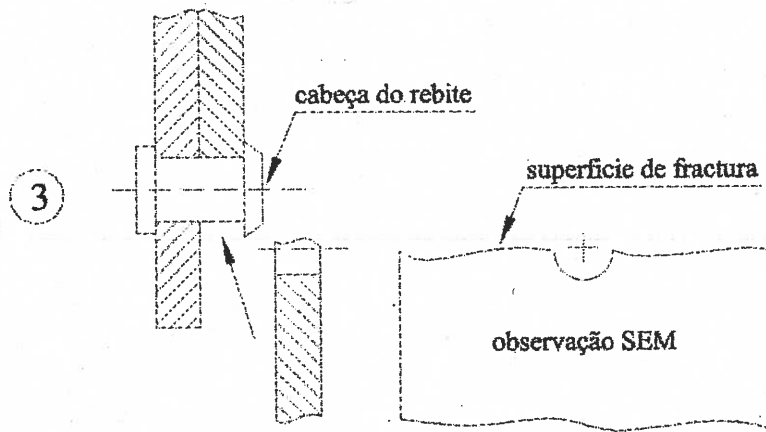


Fig 7 – Posição da cabeça do rebite e superfície de fratura.

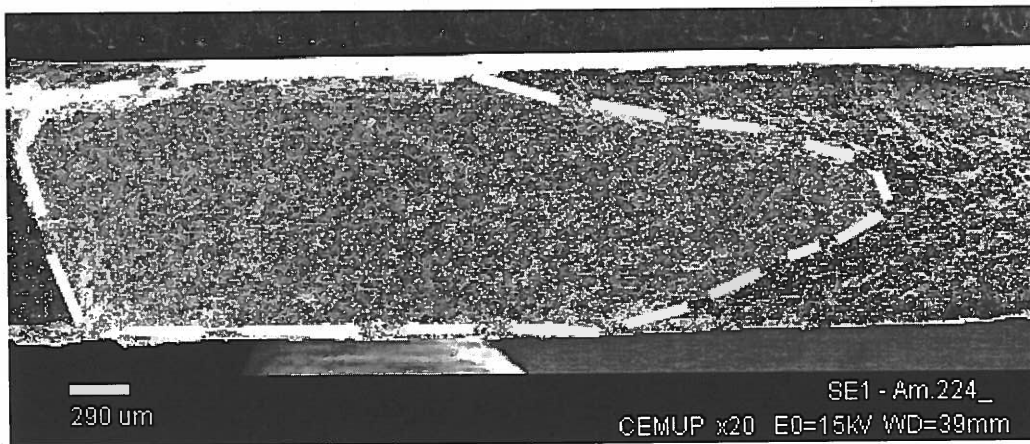


Fig 8 - Medição da fenda de fadiga no lado direito, provete 224.

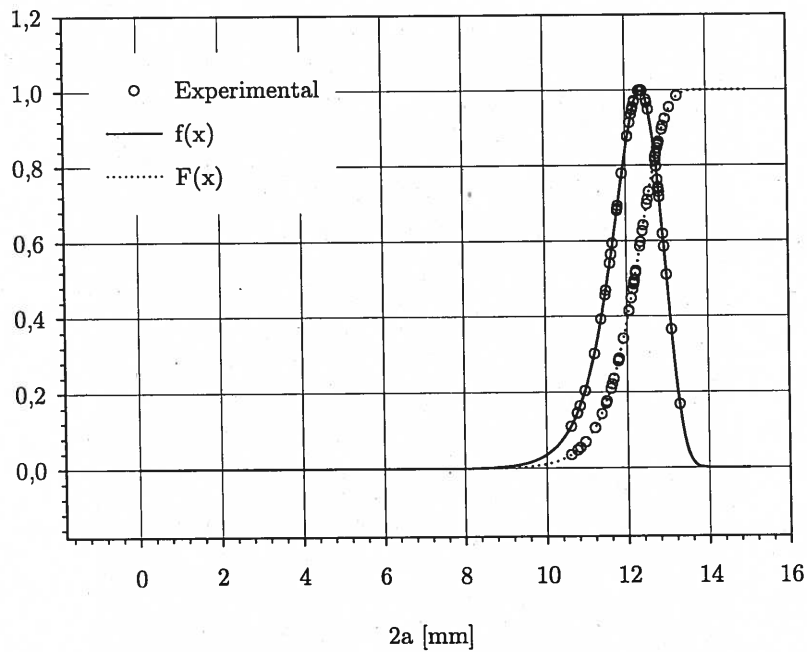


Fig 9 – PDF e CDF para a distribuição Weibull 2P, comprimento final de fenda.

4.2 Estrias de fadiga

O esquema das medições do espaçamento entre estrias de fadiga na área da fenda de fadiga é apresentado na figura 10.

As medições do espaçamento entre estrias foram realizadas em quatro provetes (números 93, 95, 224 e 229). Foram realizadas medições na direcção longitudinal e na transversal, como representado na figura 10. Nesta análise considerou-se a origem no lado inferior do furo.

Para obter valores de espaçamento entre estrias numa coordenada, na correspondente imagem são realizadas 5 medições do número de estrias contido num segmento de recta perpendicular à sua orientação. A média dessas medições corresponde ao resultado para essa coordenada. Um

exemplo de uma medição é apresentado na figura 11. Nesta figura, provete 224, num ponto com coordenadas $x=12,09$ e $y=0,53$ [mm], está representado um segmento de recta sobre o qual são identificadas 18 estrias de fadiga. Resultados detalhados das medições são apresentados em Moreira, 2004.

O espaçamento entre estrias medido na direcção longitudinal para os provetes medidos pelo IDMEC são apresentados na figura 12. A velocidade de propagação é assumida como sendo igual ao espaçamento entre estrias por ciclo, da/dN . A velocidade de propagação de fendas na direcção transversal verificou-se ser praticamente constante. No caso de fendas pequenas a velocidade de propagação é semelhante na direcção longitudinal e trans-

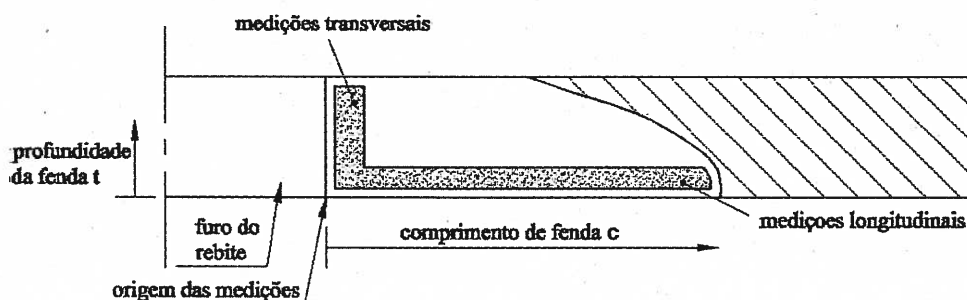


Fig 10 - Representação esquemática das direcções longitudinal (x) e transversal (y) da fenda de fadiga



Fig 11 - Ponto $x=12,09$, $y=0,53$ [mm]. Provete 224.

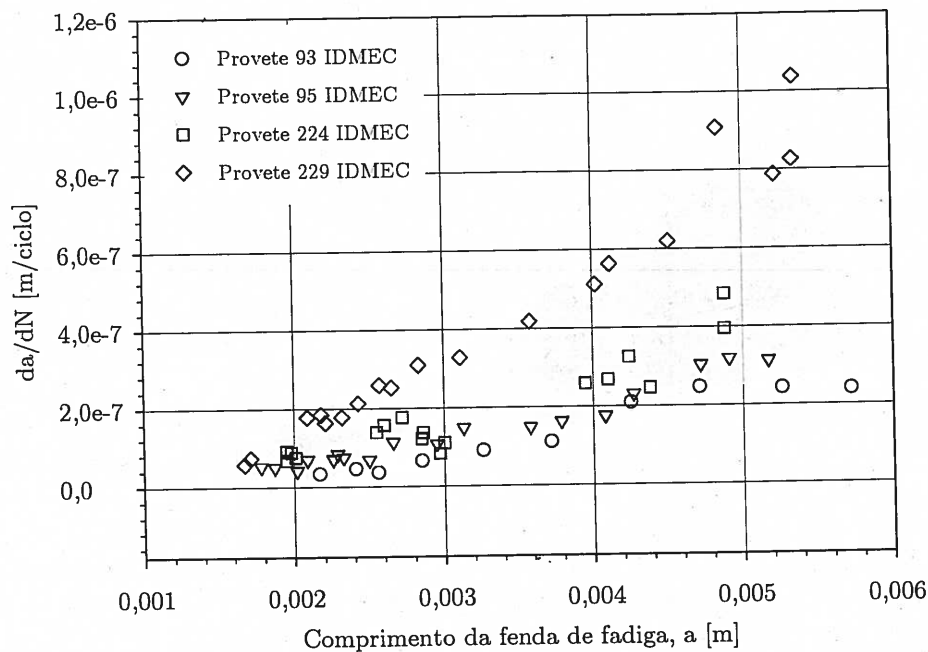


Fig 12 – da/dN vs comprimento de fenda a na direcção longitudinal.

versal. A velocidade de propagação na direcção longitudinal aumenta exponencialmente com o aumento do comprimento de fenda.

As observações realizadas revelam uma importante dispersão destes resultados. O comportamento detectado leva a que a utilização de medições microscópicas em metodologias de previsão de vida à fadiga seja incerta. Em alternativa foi examinada a utilização do conceito de EIFS, como referido seguidamente.

5. EQUIVALENT INITIAL FLAW SIZE

EIFS é o comprimento de uma fenda inicial que existiria num corpo submetido a um determinado carregamento cíclico, que conduziria à vida real observada. O valor do EIFS depende das variáveis de ensaio, comprimento de fenda sobre o qual são realizadas medições fractográficas, do tipo de modelo de propagação de fenda usado na técnica de *back-extrapolation*, da qualidade da aproximação do modelo aos valores de fractografia e do tipo de superfície sobre o qual a fenda foi iniciada, Barter *et al*, 2002. Neste trabalho, para calcular o EIFS, foi utilizada a técnica de *back-extrapolation* e

uma lei de crescimento de fendas ‘longas’, a lei de Paris apresentada na equação 1 (Paris *et al*, 1961).

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad (1)$$

sendo da/dN = velocidade de propagação
 ΔK = factor de intensidade de tensão ($\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$)
 $C, m = f(\text{variáveis do material, ambiente, frequência, temperatura, e tensão do ensaio})$

Os valores utilizados para m e C são respectivamente 3,3736 e $5,0227E-11$ [$\text{MPa m}^{0,5}$]. Estes valores foram obtidos na referência Skinn *et al*, 1994.

Foi calculado o valor do EIFS para uma fenda simétrica de comprimento $2c$, definida de acordo com a figura 13. A calibração de ΔK utilizada foi obtido numa análise por elementos finitos e é apresentada em Moreira, 2004. Com o valor do EIFS determinado é possível prever a vida à fadiga para vários níveis de tensão de ensaio. Para tal foi implementado um código em MAPLE apresentado em Moreira, 2004.

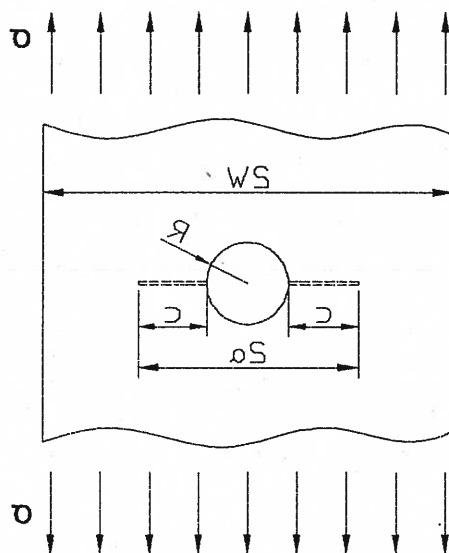


Fig 13 – Definição de uma fenda simétrica.

Foram realizados vários estudos de determinação do valor do EIFS para resultados obtidos em ensaios de fadiga realizados a diferentes níveis de tensão. Para tal foram utilizados dados obtidos por parceiros do projecto, Universidade de Pisa, Itália (UP) e Universidade de Nápoles, Itália (UNAP), que são apresentados em Koolloos *et al*, 2003. Estes parceiros realizaram ensaios à tensão máxima de 90, 120 e 160 MPa, e idêntico valor de R .

Verificou-se que o valor do EIFS é sensível ao nível de tensão do ensaio. Na

tabela 1 apresentam-se os valores médios do EIFS para cada nível de tensão. Na figura 14 apresentam-se os resultados do EIFS, incluindo o seu máximo e mínimo para cada nível de tensão.

Tabela 1 – Valor do EIFS ($2c$) para vários níveis de tensão

σ [MPa]	EIFS [m]
90	3,460E-05
120	3,799E-05
160	4,934E-05

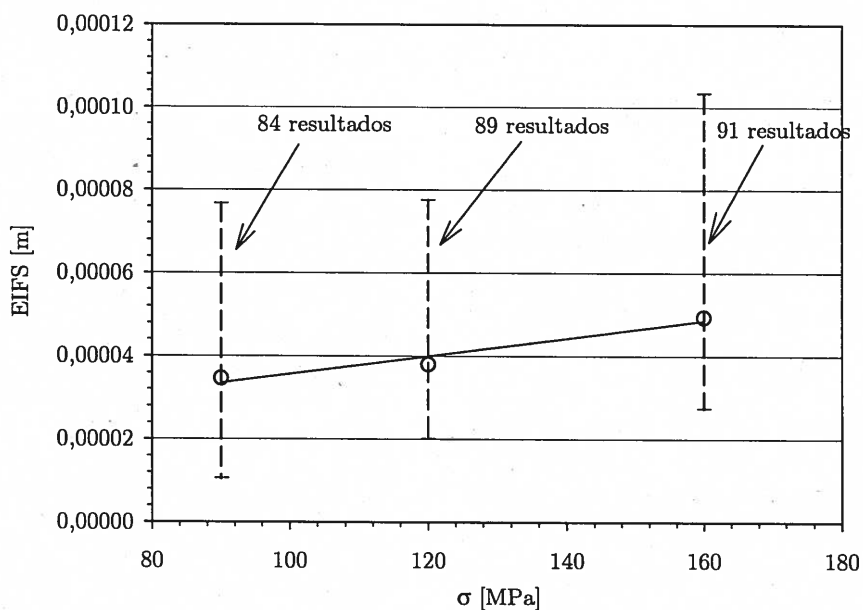


Fig 14 - Valor do EIFS ($2c$) para vários níveis de tensão.

A previsão da vida à fadiga com menor erro foi conseguida utilizando uma aproximação linear do valor do EIFS usando a equação 2.

$$EIFS \approx A \cdot \sigma + B \quad (2)$$

Sendo o EIFS expresso em metros e σ em MPa, nesta equação as constantes A e B têm respectivamente o valor de $1,0725E-7$ e $7,0940E-6$. Na figura 14 a equação linear é representada por uma recta.

Os resultados obtidos para a vida à fadiga a diferentes tensões de ensaio são apresentados na figura 15.

O caso tratado no presente artigo permite constatar a elevada capacidade de previsão de vida à fadiga da metodologia baseada no conceito de EIFS, como é testemunhado pela boa coincidência da curva S-N prevista e os resultados experimentais, ver figura 15.

6. CONCLUSÕES

Foram realizados ensaios de fadiga em provetes *single-rivet lap joints*. Nos ensaios de fadiga foi observado que as fendas ocorrem no plano do primeiro rebite.

Com a calibração de factor de intensida-

de de tensão apresentada em Moreira, 2004 e a lei de Paris, por *back-extrapolation* foi possível estimar o valor de EIFS para o caso de uma fenda simétrica. O EIFS é um comprimento de fenda fictício usado como comprimento de fenda inicial para análise da propagação de fenda que torna possível determinar a vida à fadiga. Este conceito permite o uso da mecânica da fractura para descrever a qualidade à fadiga de um componente. Os valores médios de EIFS, para cada nível de tensão, seguem uma distribuição linear da forma $EIFS \approx A \cdot \sigma + B$. Usando uma aproximação linear do valor médio de EIFS foi possível prever a vida à fadiga para vários níveis de tensão com bastante precisão.

7. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito da contribuição do Instituto de Engenharia Mecânica, Portugal (IDMEC) para o projecto GRD1-2000-25069 (contracto G4RD-CT-2000-0396), da Comunidade Europeia, Advanced Design Concepts by Integrated Risk Evaluation for Aerostructures, European Union research project (ADMIRE).

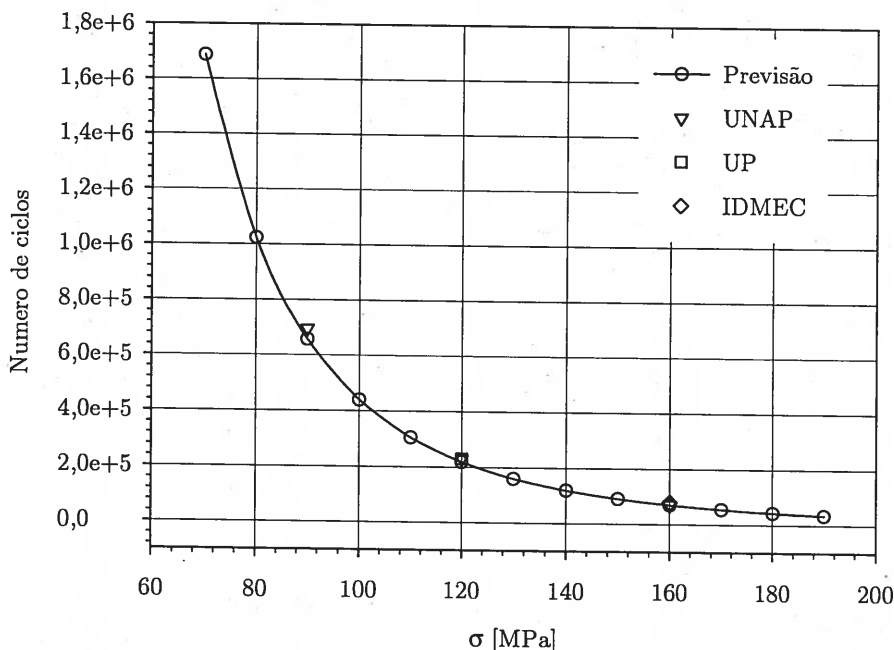


Fig 15 – Vida à fadiga prevista para uma aproximação linear do valor do EIFS.

REFERÊNCIAS

- Abernethy R. B.. *The new Weibull handbook*. Distributed by Gulf Pub. Co., North Palm Beach, Fla. Houston, 1996.
- Barter S. A., Sharp P. K., Holden G. e Clark G.. *Initiation and early growth of fatigue cracks in an aerospace aluminium alloy*. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 25(2):111-125, 2002.
- Koolloos M. F. J., de Castro P. M. S. T., Esposito R. e Cavallini G.. *Fatigue testing of single-rivet lap joint specimens*. Technical Report ADMIRE-TR-3.1-06-3.1/NLR-CR-2003-281, 15th May 2003.
- Moreira P. M. G. P.. *A contribution to the study of fatigue of riveted lap joints*, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal. Tese de Mestrado, 2004.
- Paris P. C., P. Gomez M. e Anderson W. E.. *A rational analytic theory of fatigue*. The Trend in Engineering, 13(1):9-14, 1961.
- Skinn D. A., Gallagher J. P., Berens A. P., Huber P. D. e Smith J.. *Damage tolerant design handbook*, volume 3. University of Dayton Research Institute, 1994.