

EFEITO DA SEQUÊNCIA DE CARGAS AXIAL E DE TORÇÃO NA PREVISÃO DE VIDA EM FADIGA MULTIAXIAL

Luis Reis¹, Vitor Anes², Bin Li³, Manuel Freitas⁴

¹Prof. Associado, ²MSc. Investigador, ³Ph.D Investigador, ⁴Prof. Catedrático
Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal
luis.g.reis@ist.utl.pt



RESUMO

Em projecto mecânico, as abordagens convencionais baseadas nos resultados da fadiga uniaxial podem resultar em estimativas de vida à fadiga não conservativas no caso de carregamentos multiaxiais complexos. Para que haja um dimensionamento seguro e fiável de componentes e estruturas é necessário que se realize o estudo do efeito da multiaxialidade dos carregamentos na fadiga dos materiais, em particular o efeito de carregamentos não proporcionais no dano por fadiga. O objectivo deste estudo é avaliar o efeito das sequências de carregamento tensão/torção, em carregamentos multiaxiais aplicados a provetes feitos com o aço 42CrMo4. Os resultados mostram que existe uma resposta diferente do material consoante o tipo de trajectória percorrida para a mesma configuração final, levando a concluir que para além do género de trajectória de carregamento, a forma como esta é percorrida tem influência no dano à fadiga assim como na morfologia da superfície de fractura.

1- INTRODUÇÃO

Em regimes de funcionamento reais as histórias de carregamento são na sua generalidade de amplitude variável tornando a análise de dano acumulado o ponto-chave nas previsões de vida à fadiga. A durabilidade e fiabilidade de componentes ou estruturas dependem da robustez dos métodos de dimensionamento utilizados, resultando essa robustez da capacidade de traduzirem o efeito dos carregamentos cíclicos de amplitude e sequência variável na previsão de vida à fadiga, Socie et al. (2000).

No campo científico o interesse sobre o efeito dos carregamentos sequenciais na

previsão de vida à fadiga tem vindo a aumentar ao longo dos tempos. Trabalhos de investigação científica têm sido levados a cabo com o intuito de estudar o efeito sequencial e a sua relação com a proporcionalidade e não proporcionalidade dos carregamentos em condições de multiaxialidade, assim como a sua influência no dano por fadiga, Freitas et al. (2006).

Por outro lado estudos experimentais têm correlacionado o tipo de proporcionalidade dos carregamentos com a evolução das fissuras de fadiga, Reis et al. (2006). Para além do estudo do dano criado por carregamentos multiaxiais o crescimento de fissuras por fadiga em aços estruturais tem

também suscitado grande interesse no meio científico, Reis et al. (2009).

Pretende-se com este trabalho estudar o efeito da sequência de carregamentos na previsão de vida à fadiga, i.e. identificar a influência da ordem sequencial de aplicação dos carregamentos no parâmetro de dano, tendo como objectivo principal determinar o método de dimensionamento que melhor interprete esse efeito. Para um dano por fadiga, em regime de carregamentos sequenciais, Chen et al. (2006), propôs um modelo de dano modificado na previsão de vida à fadiga para o aço inox 304. Também os autores Robillard e Cailletau (1991), Zang e Miller (1996), Harada e Endo (1991), realizaram testes em aços inox ferríticos, Inconel 718 e aços de médio carbono sujeitos a carregamentos de tracção-compressão combinados com torção. Os resultados mostram que o valor do dano ($n_1/N_1+n_2/N_2$) tende a tornar-se maior que 1 para os carregamentos do tipo tracção – compressão seguidos de torção e menor que 1 nos casos em que se inicia o carregamento com torção seguida de tracção-compressão.

Neste artigo são apresentados os resultados de carregamentos biaxiais aplicados no estudo à fadiga no aço 42CrMo4. O aço é sujeito a carregamentos sequenciais do tipo axial e torsional realizando-se cinco histórias diferentes de carregamento. Pretende-se avaliar a variação da amplitude da tensão de corte num espaço de tensões apropriado ao tipo de material. Para o aço 42CrMo4 o espaço das tensões foi definido considerando a relação entre tensão axial e tensão de corte da seguinte forma:

$$\tau = 0.65\sigma \quad (1)$$

Com base neste espaço de tensões foi feita a avaliação das condições de carregamento bi-axiais impostas aos provetes de ensaio. Vários modelos de previsão de vida à fadiga são utilizados na interpretação da variação da amplitude de corte, nomeadamente o modelo de von Mises, código ASME (1988) e a abordagem MCE apresentada em Freitas et al. (2000).

Os resultados teóricos foram correlacionados com os resultados experimentais. Para além dos efeitos do carregamento sequencial na previsão de vida à fadiga, analisa-se também o efeito sequencial na formação e desenvolvimento de fissuras por fadiga e respectivas superfícies de fractura. Através de uma análise fractográfica realizou-se a correlação entre as previsões dos modelos de plano crítico de Findley, Brown-Miller, SWT, Fatemi-Socie, LIU I, LIU II e os resultados experimentais.

2- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material seleccionado para realizar os ensaios é designado por 42CrMo4 e caracteriza-se por ser um aço de alta resistência. Este tipo de aço é fornecido no estado tratado i.e. temperado e revenido a 525°C, admite uma elevada resistência, tenacidade e aptidão à nitruração, sendo um aço de construção. Está particularmente indicado para os casos de peças de secção média sujeitas a esforços de flexão e torção alternada. Os provetes utilizados nas séries de ensaio foram produzidos através de varões de 25mm de diâmetro, a sua maquinagem foi realizada recorrendo a maquinarias especializadas de corte por arranque de apana sob comando numérico, as suas dimensões apresentam-se na Fig. 1 em milímetros.

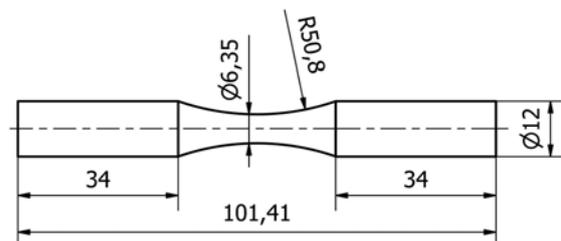


Fig. 1 - Provette de ensaios de fadiga multiaxial.

Todo o processo de maquinagem teve em conta cuidados de produção, através da selecção adequada dos parâmetros de desbaste e acabamento, de modo a não criar no provete possíveis locais de concentração de tensões ou tensões residuais. Os provetes foram inspeccionados manualmente e polidos através de lixas de granulometria decrescente, iniciando-se com a 200 e

terminando na 1200. As propriedades monotônicas e cíclicas do aço 42CrMo4 apresentam-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades 42CrMo4, Reis (2004)

	42CrMo4
Tensão de rotura	1100 MPa
Tensão de cedência	980 MPa
Extensão	16 %
Módulo de Young	206 GPa
Dureza	362 HV
Tensão de cedência cíclica	650 MPa
Coefficiente de resistência	1420 MPa
Expoente de resistência	0.12
Coefficiente de resistência à fadiga	1154 MPa
Expoente de resistência à fadiga	-0.061
Coef. de ductilidade à fadiga	0.18
Expoente de ductilidade à fadiga	-0.58

Os ensaios de fadiga multiaxial foram realizados com o auxílio de uma máquina servo-hidráulica Instron 8874. Na Fig. 2 apresenta-se a respectiva máquina e o sistema experimental de ensaios utilizado neste estudo.



Fig. 2 - Setup experimental

Os provetes foram ensaiados utilizando 5 tipos diferentes de trajetórias sob o efeito combinado de carregamentos axiais e de torção. Nos três primeiros casos, nomeadamente os casos 3, 3.1 e 3.2, os testes de fadiga multiaxial foram conduzidos com um rácio constante de amplitudes de tensão, $\frac{\tau_a}{\sigma_a} = \frac{1}{\sqrt{3}}$, diferindo entre si apenas na combinação entre semi-

reversões. Nos casos 3.3A e 3.3B o rácio de tensões deixa de ser constante e passa a ser $\frac{1}{2\sqrt{3}}$ para o caso 3.3A e $\frac{2}{\sqrt{3}}$ para o caso 3.3B. Na Fig. 3 são representados os carregamentos em estudo assim como as suas trajetórias.

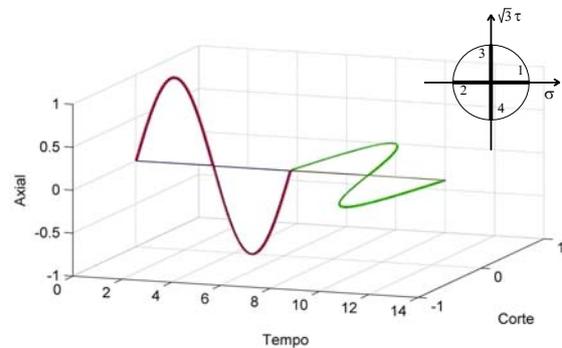


Fig. 3 - a) Caso 3

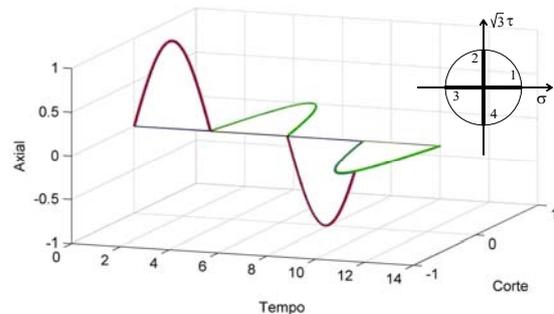


Fig. 3 - b) Caso 3.1

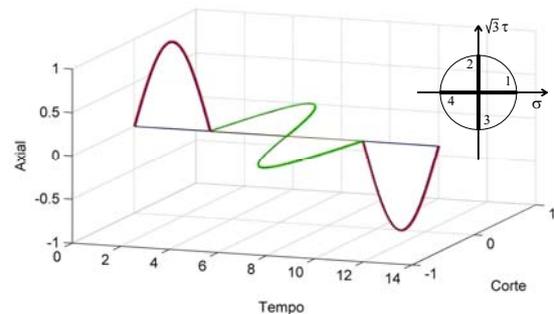


Fig. 3 - c) Caso 3.2

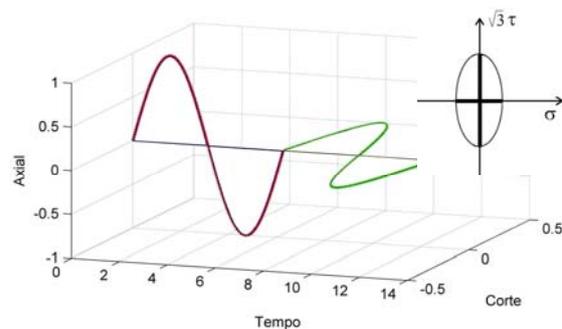


Fig. 3 - d) Caso 3.3A

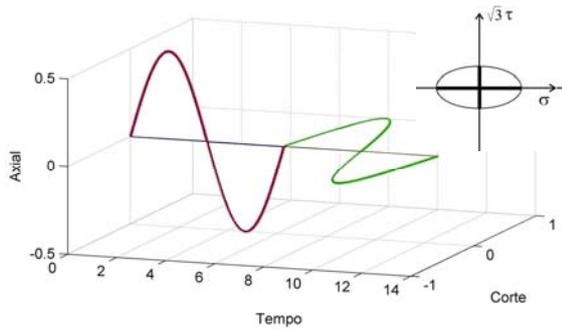


Fig. 3 - e) Caso 3.3B

3- RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 - Previsão de vida à fadiga

Os resultados experimentais mostram a existência de diferentes comportamentos no encruamento do material resultante dos vários tipos de carregamentos. O procedimento experimental foi implementado tendo em consideração a natureza dos carregamentos anteriormente apresentados assim como as magnitudes dos carregamentos axiais e de torção. Na Tabela 2 apresenta-se para cada ensaio a tensão equivalente de von Mises e a tensão do modelo de Crossland determinada com tensão equivalente MCE. É também apresentado na Tabela 2 o número de ciclos até à rotura obtidos em cada caso de carregamento.

Tabela 2 – Resultados experimentais

Caso	v. Mises [MPa]	Crossland [MPa]	Nº Ciclos
3	570	583.2	58703
	520	532	176793
	495	506.4	265955
	480	491.1	271243
	445	455.3	892629
3.1	550	562.7	746339
	600	613.9	34277
3.2	580	593.4	235712
	555	567.8	241413
	580	593.4	136256
	570	583.2	140719
3.3A	600	613.9	34589
	550	562.7	438100
	570	576.6	1000000
	610	617	196483
3.3B	600	606.9	1624000
	630	637.3	86600
	720	736.6	337186
	690	705.9	518622
3.3B	750	767.3	121014
	610	624.1	1000000

Como se pode observar a partir da Tabela 2, para tensões equivalentes iguais mas com sequências de carregamento diferentes obtêm-se diferentes resistências à fadiga por parte do aço 42CrMo4.

Nas Fig(s) 4 e 5 apresentam-se, numa perspectiva S-N, os resultados obtidos com os modelos considerados neste estudo. Analisando os resultados apresentados pode-se observar a influência do efeito da ordem sequencial de carregamento e do rácio entre tensão de corte e tensão axial na resistência à fadiga do aço em estudo.

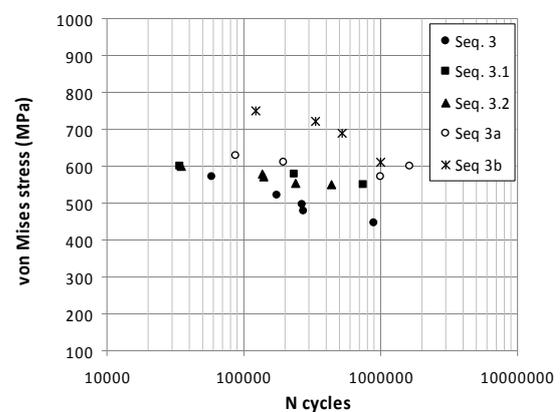


Fig. 4 – Evolução segundo modelo von Mises.

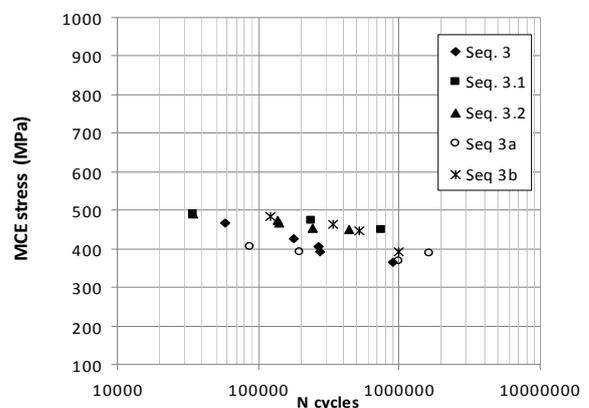


Fig. 5 – Evolução segundo modelo MCE.

Verifica-se que mediante o tipo do percurso da trajectória de carregamento, esta influencia o comportamento mecânico do material, nomeadamente a sua resistência mecânica é afectada, conduzindo a uma redução de vida à fadiga. Observa-se que o caso 3 é o que maior dano impõe ao material enquanto que o caso 3.3B é o que menor influência exerce. Verifica-se também que existe dependência do regime

de carregamento na resistência à fadiga do material. No global, verifica-se que no modelo von Mises existe uma grande dispersão de resultados, em particular no caso 3.3B, ver Figura 4.

Por outro lado considerando a abordagem MCE representada na Figura 5 é possível verificar uma melhoria na correlação dos resultados ao longo dos 5 casos estudados.

Foi determinado um novo parâmetro MCE ao considerar a equivalência entre tensões de corte e tensões axiais do seguinte modo $\tau = 0.65\sigma$ o que vem melhorar a correlação de resultados como se pode observar na Fig. 6.

Na Fig. 7 é apresentado os resultados do modelo de Crossland utilizando na sua formulação a tensão equivalente MCE já definida com o novo parâmetro de dano, resultando numa correlação de resultados mais satisfatória.

Observa-se que dos 3 casos com o mesmo rácio entre a tensão de corte e a tensão

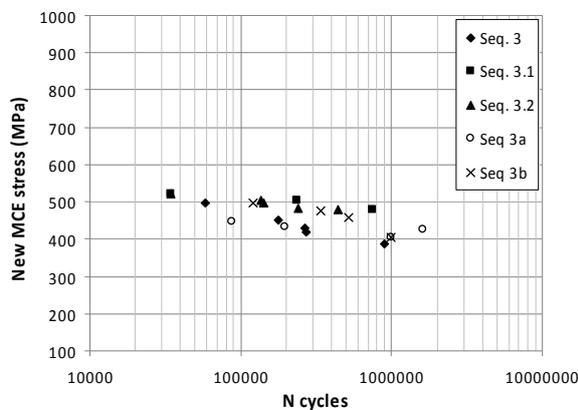


Fig. 6 - Novo modelo MCE.

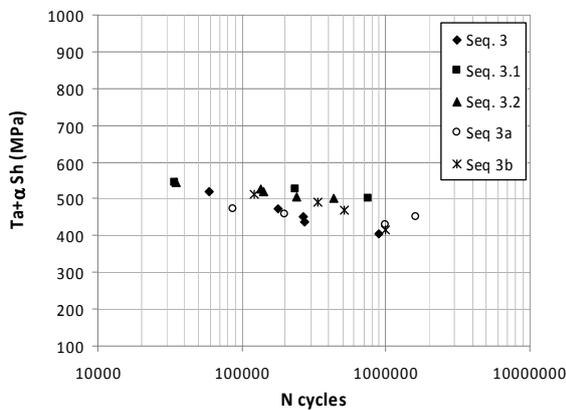


Fig. 7 - Modelo Crossland.

axial, o caso que causa maior dano no material é o caso 3.

3.2 - Análise Fractográfica

Os ângulos dos planos críticos de iniciação de fissuração foram obtidos experimentalmente e posteriormente comparados com os resultados teóricos usando os modelos de Findley, Brown-Miller, SWT, Fatemi-Socie, LIU I e LIU II. Na Fig. 8 apresentam-se os resultados da estimativa dos planos críticos de iniciação de fissuração para cada caso utilizando o modelo de Fatemi-Socie, identificando-se os ângulos 0° e $\pm 90^\circ$ como os ângulos críticos destes carregamentos.

Para cada modelo foi utilizado o mesmo tipo de análise realizada no modelo de Fatemi-Socie, i.e., estabelece-se o plano crítico de iniciação de fissuração através da localização da magnitude máxima do parâmetro de dano de cada modelo.

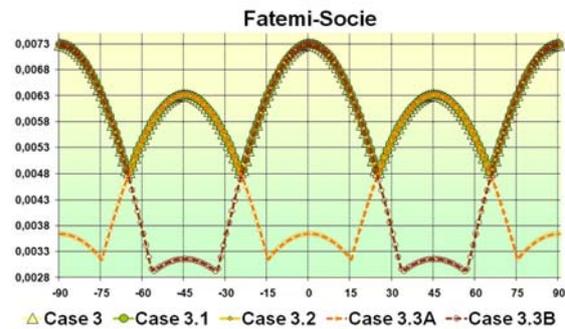


Fig. 8 - Modelo Fatemi-Socie

Na Tabela 3 apresentam-se em resumo as previsões teóricas e os valores experimentais obtidos para cada sequência de carregamento.

Tabela 3 – Previsão dos ângulos críticos.

Caso	3	3.1	3.2	3.3A	3.3B
Medido	-5°	0°	0°	0°	0°
Findley	0°	0°	0°	$\pm 41^\circ$	0°
B. Miller	0°	0°	0°	$\pm 37^\circ$	0°
S-W-T	0°	0°	0°	0°	$\pm 45^\circ$
F. Socie	$\pm 90^\circ$; 0°	$\pm 90^\circ$; 0°	$\pm 90^\circ$; 0°	$\pm 45^\circ$	$\pm 90^\circ$; 0°
LIU I	0°	0°	0°	0°	$\pm 45^\circ$
LIU II	$\pm 90^\circ$; 0°	$\pm 90^\circ$; 0°	$\pm 90^\circ$; 0°	$\pm 45^\circ$	$\pm 90^\circ$; 0°

Verifica-se que este tipo de abordagem na análise do parâmetro de dano apenas estabelece o ângulo onde ocorre o parâmetro máximo de cada modelo não sendo sensível ao que acontece nos outros planos.

Torna-se pertinente este comentário quando se observa que o plano de desenvolvimento de fissura e ruptura é diferente do plano de início de fissuração.

Nas Fig.(s) 9 e 10 encontram-se exemplos de um provete onde o plano de início de fissuração indicado por uma seta branca é diferente dos planos por onde a fissuração evolui até á ruptura final.



Fig. 9 - Superfície de fractura vista de cima.

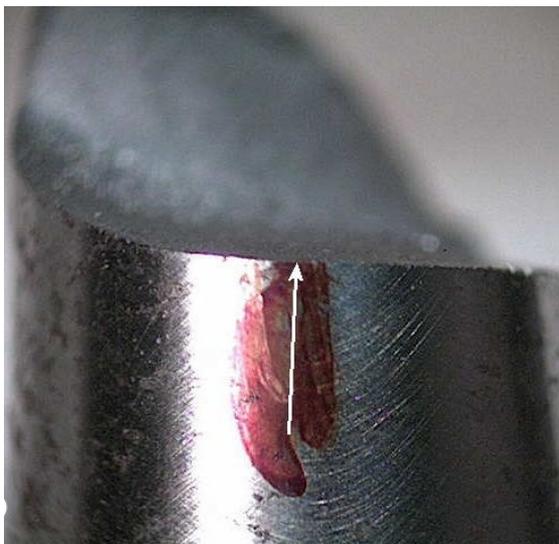


Fig. 10 - Superfície de fractura vista de lado.

Uma interpretação tridimensional dos modelos de dano permite visualizar e analisar as superfícies de dano que se desenvolvem num determinado ponto material ao longo da respectiva trajectória de carregamento.

Estas superfícies permitem representar espacialmente a solicitação ao material, disponibilizando muito mais informação passível de ser interpretada do que aquela que está disponível pela abordagem 2D.

Nas Figuras 11 e 12 são apresentadas as superfícies de dano para o caso 3 através dos modelos Fatemi-Socie e LIU I, onde podemos identificar vários picos de solicitação local, os quais se podem tornar activos e passivos ao longo da evolução de uma fissura.

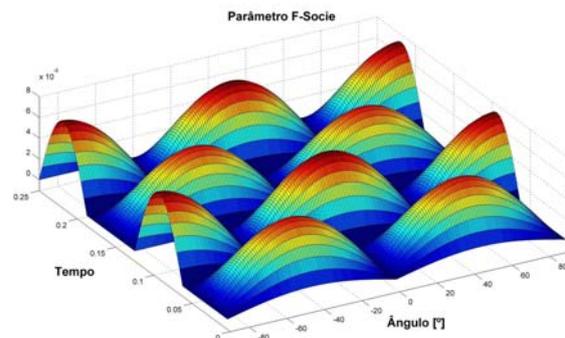


Fig. 11 - Superfície de dano tridimensional considerando o modelo de Fatemi-Socie.

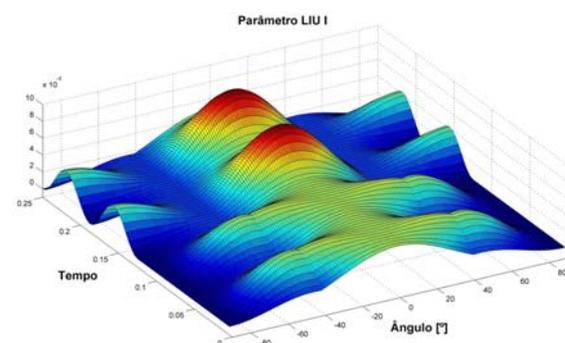


Fig. 12 - Superfície de dano tridimensional considerando o modelo LIU I.

4- CONCLUSÕES

Estudou-se o dano por fadiga no aço 42CrMo4 através de cinco casos de carregamento sinusoidais estabelecidos

através de uma combinação sequencial das componentes de tensão axial e de corte.

Verificou-se a existência de vários níveis de encruamento no material após as séries de ensaio, levando a concluir que a ordem sequencial de aplicação dos carregamentos tem uma forte influência na vida à fadiga assim como na morfologia e mecanismos de fractura no aço 42CrMo4.

O rácio considerado entre a tensão de corte e a tensão normal tem uma forte influência na resistência à fadiga do material.

A definição do espaço de tensões para análise da variação da amplitude da tensão de corte deve ser apropriada ao tipo de material em estudo.

5- REFERÊNCIAS

- ASME Code Case N-47-23 1988. Case of ASME Boiler and Pressure Vessel Code, American Society of Mechanical Engineers.
- M de Freitas, L Reis and B. Li. 2006 "Comparative study on biaxial low-cycle fatigue behaviour of three structural steels ", International Journal of Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 29, Issue 12, pp. 992 – 999.
- M.de Freitas, B. Li and J.L.T. Santos 2000. Multiaxial Fatigue and Deformation: Testing and Prediction, ASTM STP 1387, S.Kaluri and P.J. Bonacuse, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, pp.139-156.
- M Robillard and G Cailletaud 1991. Directionally defined damage in multiaxial low-cycle fatigue experimental evidence and tentative modelling. In: Kussmaul K, McDiarmid D, Socie D, editors. Fatigue under biaxial and multiaxial loading,ESIS10. London: Mechanical engineering publications, pp. 103-30.
- Reis, L., 2004. Comportamento Mecânico de Aços em Fadiga Multiaxial a Amplitude de Carga Constante e Síncrona, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Tese de Doutoramento.
- Reis, L., B. Li and M. de Freitas 2006. Analytical and experimental studies on fatigue crack path under complex multiaxial loading. "Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures", Vol. 29(4), pp.281-289.
- Reis, L., B. Li and M. de Freitas 2009. Crack initiation and growth path under multiaxial fatigue loading in structural steels. International Journal of Fatigue Vol. 31, Issues 11-12, Pg 1660-1668. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2009.01.013
- Socie, D. F. and Marquis, G. B. 2000. Multiaxial Fatigue, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA 15096-0001.
- S. Harada and T Endo 1991. On the validity of Miner's rule under sequential loading of rotating bending and cyclic torsion. In: Kussmaul K, McDiarmid D, Socie D, editors. Fatigue under biaxial and multiaxial loading, ESIS10. London: Mechanical engineering publications, pp. 161-178.
- W. Zhang and KJ Miller 1996. A study of cumulative fatigue damage under variable loading-mode conditions. Fatigue Fract Eng Mater Struc., pp. 229-239.
- X. Chen, D. Jin and KS Kim 2006. Fatigue life prediction of type 304 stainless steel under sequential biaxial loading, I. J. of Fatigue, Vol 28, pp. 289-299.