



FADIGA OLIGOCÍCLICA. PROPRIEDADES CÍCLICAS DA LIGA DE ALUMÍNIO Al 6061-T651

A. Silva Ribeiro

Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Quinta de Prados, 5000 Vila Real, Portugal

J. Domingos Moreira da Costa

Departamento de Engenharia Mecânica da UC, Pólo II, Pinhal de Marrocos, 3000 Coimbra

A. Augusto Fernandes

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua dos Bragas, 4099 Porto Codex

Resumo. *O uso da Mecânica da Fratura Linear Elástica, nas previsões analíticas da vida total de fadiga, pressupõe a presença de defeitos existentes que atuam como uma fenda. A análise é então efetuada no sentido de estimar o número de ciclos requeridos para o crescimento do defeito até este atingir um valor crítico para o qual ocorre a ruína da estrutura. Verifica-se que a vida passada na fase de iniciação da fenda não é considerada neste método, o que subestima significativamente a vida real de uma estrutura. Este erro é particularmente importante no caso de vidas elevadas onde a fase de iniciação pode atingir, em alguns casos, valores da ordem dos 80% da vida total de fadiga.*

Dentro dos métodos atualmente usados na previsão da iniciação da fenda, o método da aproximação local é um dos mais importantes. A sua aplicação exige o prévio conhecimento das propriedades cíclicas do material. Assim, apresentam-se neste trabalho um conjunto de ensaios de fadiga para obtenção das propriedades cíclicas da liga de alumínio Al 6061-T651.

Palavras-chave: *Fadiga, Iniciação, Propagação, Fadiga-oligocíclica*

1. INTRODUÇÃO

A vida total de fadiga de um componente, N_t , pode ser expressa pela soma do número de ciclos passados, na fase de iniciação N_i e na fase propagação N_p de uma fenda, resultando a seguinte expressão:

$$N_t = N_i + N_p \quad (1)$$

O uso da Mecânica da Fratura Linear Elástica, nas previsões analíticas da vida total de fadiga, pressupõe a presença de defeitos existentes que atuam como uma fenda. Verifica-se que a vida passada na fase de iniciação da fenda não é considerada neste método, o que subestima significativamente a vida real de uma estrutura.

Dos métodos atualmente usados na previsão da iniciação da fenda, o método da aproximação local é um dos mais importantes. Dado que a sua aplicação exige o prévio

conhecimento das propriedades cíclicas do material, este trabalho apresenta um conjunto de ensaios de fadiga para a sua obtenção. Este estudo insere-se num projeto de âmbito mais alargado que visa à análise das condições de iniciação de fendas a partir de juntas soldadas da liga de alumínio Al 6061-T651.

2. ENSAIOS DE FADIGA. FADIGA OLIGOCÍCLICA

O comportamento dos materiais, componentes e estruturas em termos de resistência à fadiga, é caracterizado pelos resultados obtidos em ensaios de fadiga. Estes ensaios podem ser realizados tanto em corpos de prova do material como nas próprias estruturas ou detalhes. Os ensaios de fadiga em corpos de prova têm na maior parte dos casos interesse comparativo. Estes são os ensaios mais vulgarizados por serem os de mais fácil execução, encontrando-se normalizados em diversos países.

O método tradicional de apresentação de dados experimentais de fadiga é através das curvas SN, propostas por Wöhler. O método de obtenção consiste em registar o número de ciclos até à ruptura de corpos de prova submetidos a diferentes amplitudes de tensão nominal.

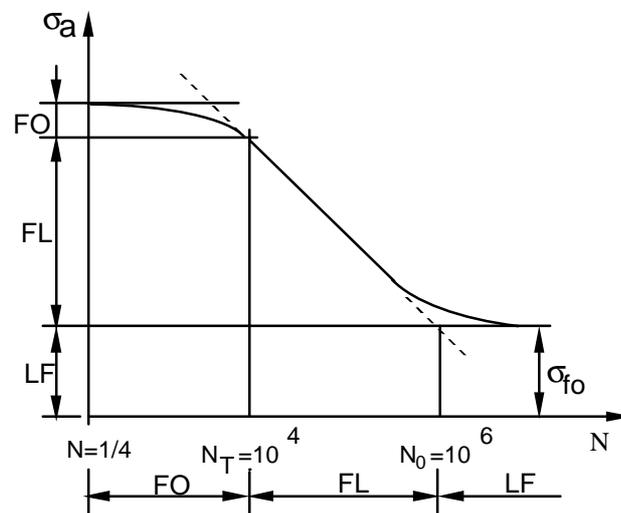


Figura 1 - Diagrama de Wöhler. Regiões de fadiga.
FO-Fadiga Oligocíclica: FL -Fadiga de Longa Duração.
LF -Limiar de Fadiga (vida infinita ou "quase infinita").

A Fig. 1 representa as regiões de fadiga de acordo com o diagrama de Wohler. Verifica-se normalmente que quando o número de ciclos de ruptura ultrapassa 10^4 - 10^5 ciclos a tensão nominal é elástica, deformando-se o material de um modo localizado. Para tensões elevadas a vida à fadiga decresce progressivamente devido à criação de deformações plásticas generalizadas, de modo que para a região em que $N < 10^4$ - 10^5 ciclos, denomina-se zona de *fadiga de curta duração* ou *fadiga oligocíclica*. Para esta região a fadiga resulta de deformação cíclica em vez de tensão cíclica.

A expressão fadiga oligocíclica é assim utilizada para designar os fenômenos de fadiga em que a ruptura ocorre entre 10^2 e 10^5 ciclos, devido à criação de deformações plásticas cíclicas que dependem da resistência mecânica e da ductilidade do material.

Através da monitorização das tensões e deformações, durante um carregamento, as respostas dos materiais são claramente identificáveis. Em materiais onde ocorrem deformações elásticas durante a aplicação de carga, o ciclo de histerese apresenta o andamento esquematizado na Fig. 2-a. Se deformações plásticas intensas ocorrerem então o ciclo de

histerese terá o efeito representado na Fig. 2-b, onde se evidenciam as componentes de deformação elástica e plástica. Os ciclos de histerese representam o trabalho de deformação por ciclo. O intervalo total de deformação compreende uma componente de deformação elástica $\Delta\varepsilon_e$ e uma componente de deformação plástica $\Delta\varepsilon_p$ definidas por:

$$\Delta\varepsilon_e = XT + QY = \frac{\Delta\sigma}{E} \quad (2)$$

$$\Delta\varepsilon_p = TQ = \Delta\varepsilon_t - \frac{\Delta\sigma}{E} \quad (3)$$

A área envolvida por um ciclo de histerese representa a energia de deformação plástica por ciclo, sendo a maior parte dissipada irreversivelmente sob a forma de calor, e a restante, absorvida pelo material na modificação da sua estrutura de discordâncias, (Costa, 1991). A energia total dissipada é obtida pela soma das áreas dos ciclos de histerese, possuindo cada material a capacidade de libertar uma quantidade limitada de energia. Quando esse limite é atingido propagam-se fendas no material e como conseqüentemente a ruptura (Lefevre *et al*, 1989).

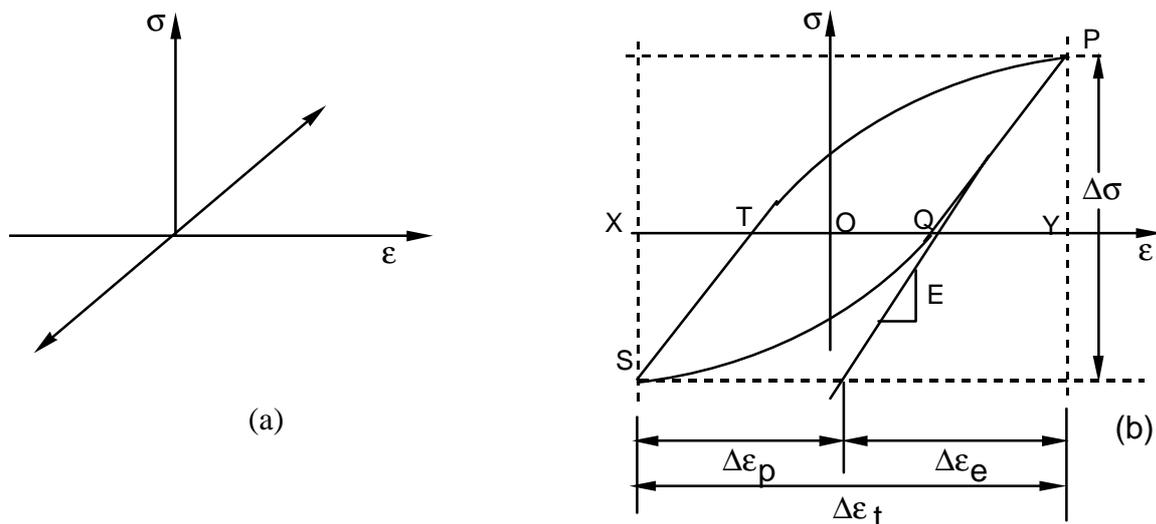


Figura 2 – “Loops” de histerese para carregamentos cíclicos: a) Materiais perfeitamente elásticos. b) Materiais elasto-plásticos.

3. COMPORTAMENTO MECÂNICO OLIGOCÍCLICO

Quando um material é solicitado, quer em ensaios efetuados a amplitude de tensão constante ou a amplitude de deformação constante, verifica-se que a resposta do material varia ligeiramente de ciclo para ciclo durante os primeiros ciclos, estabilizando após um certo número de ciclos.

Para os ensaios realizados a amplitude de deformação constante, a amplitude de tensão varia inicialmente de ciclo para ciclo, aumentando em alguns materiais e diminuindo em outros. O fenômeno do aumento progressivo de $\Delta\sigma$ denomina-se por endurecimento cíclico, enquanto que o fenômeno de diminuição progressiva de $\Delta\sigma$ designa-se por amolecimento cíclico. Para os ensaios realizados a amplitude de tensão constante, os fenômenos de endurecimento cíclico caracterizam-se por uma diminuição de $\Delta\varepsilon$ enquanto que o aumento de $\Delta\varepsilon$ indica um amolecimento cíclico. Após um número de ciclos de curta duração, por vezes inferior a 100, os

ciclos de histerese estabilizam, encontrando-se o material em condições de equilíbrio para os limites de tensão ou deformação impostos (Hertzberg, 1989). Se unirem as extremidades dos ciclos de histerese estabilizados para os diferentes níveis de deformação obtém-se uma curva designada por curva cíclica de tensão-deformação que representa o comportamento cíclico do material. Estas podem ser obtidas de vários modos. Landgraf *et al*, (1969) sugeriram cinco modelos onde se destaca a técnica de um corpo de prova para cada ponto da curva.

A técnica de um corpo de prova para cada ponto da curva, é a mais utilizada dada a fiabilidade dos seus resultados, utiliza um corpo de prova para determinar um ponto da curva. Para o traçado da curva são pois necessários vários corpos de prova sendo cada um solicitado a um dado nível de $\Delta\sigma$. A curva cíclica é obtida ajustando uma curva às extremidades dos vários ciclos de histerese estabilizados. Este procedimento envolve vários corpos de prova pelo que se torna dispendioso e demorado.

4. LEIS FENOMENOLÓGICAS DA FADIGA OLIGOCÍCLICA. PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E DE DUCTILIDADE

No início do século XX as investigações, no que se refere às propriedades de fadiga dos materiais, centravam-se essencialmente nas relações entre tensão e duração. O resultado desses esforços foi a obtenção da equação empírica de Basquin (1910) adotada sistematicamente nos estudos seguintes de fadiga, que relacionam a amplitude de tensões com a duração:

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (4)$$

onde σ'_f se designa por coeficiente de resistência cíclica, normalmente inferior à tensão verdadeira de fratura no ensaio de tração simples. A amplitude de extensão elástica é dada por $\Delta\varepsilon_e/2 = \sigma_a/E$ pelo que a Eq. (4) pode ser expressa em termos de extensão elástica.

$$\frac{\Delta\varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b \quad (5)$$

onde $\Delta\varepsilon_e/2$ é a amplitude de deformação elástica, E o módulo de elasticidade, σ'_f o coeficiente de resistência cíclica, $2N_f$ o número de reversões e b o expoente de resistência cíclica.

A partir dos anos 50, e após a compreensão dos ciclos de histerese gerados pelo material, verificou-se que a deformação plástica desempenha um papel importante na previsão de estados de fadiga. Coffin e Manson (1953), sugeriram a relação:

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (6)$$

onde $\Delta\varepsilon_p/2$ representa a amplitude de deformação plástica, ε'_f o coeficiente de ductilidade cíclica e c o expoente de ductilidade cíclica.

4.2 Resistência à deformação total

As propriedades de resistência e de ductilidade cíclica podem ser usadas conjuntamente para exprimir a resistência à fadiga em termos da extensão total.

Conforme se indicou na Fig. 2 a extensão total pode ser decomposta numa componente de extensão elástica e numa componente da extensão plástica de tal modo que combinando a Eq. (5) e Eq. (6) obtém-se a expressão que relaciona a extensão total com a vida à fadiga:

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (7)$$

equação utilizada para descrever a duração de vida em regime de fadiga, onde σ'_f/E e ε'_f representam as amplitudes de deformação elástica e plástica para $2N_f=1$, b e c as respectivas inclinações.

Morrow *et al* (1965) demonstraram que os expoentes b e c variam com n' , expoente encruamento cíclico, de modo aproximado com as equações:

$$c = \frac{1}{1 + 5n'} \quad b = \frac{n'}{1 + 5n'} \quad (8)$$

Vários autores têm sugerido relações entre ε'_f e ε_f (extensão plástica verdadeira no momento de fratura num ensaio de tração monotônica). As relações apresentadas são numerosas variando ε'_f entre $0.35\varepsilon_f$ e ε_f dependendo do tipo de material. Landgraf apresentou para a determinação do coeficiente de ductilidade cíclica a equação:

$$\varepsilon'_f = 0,002 \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_{0,2}} \right)^{1/n'} \quad (9)$$

onde σ_f representa a tensão verdadeira à fratura e $\sigma_{0,2}$ a tensão limite convencional de elasticidade a 0,2%, tendo obtido bons resultados.

5. PROPRIEDADES CÍCLICAS DA LIGA DE ALUMÍNIO 6061-T651

Para a obtenção das propriedades cíclicas da liga de alumínio 6061-T651, foram efetuados ensaios de fadiga oligocíclica em corpos de prova cilíndricos com a geometria esquematizada na Fig. 3. Todos os corpos de prova foram sujeitos a polimentos locais com lixas com granulometria desde 320 a 4000, seguido de polimento com pano de feltro embebido em alumina normal e finalmente em alumina fina.

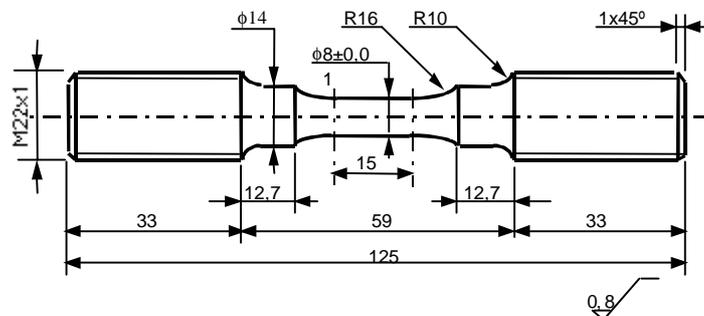


Figura 3 - Corpos de prova para fadiga oligocíclica.

Para a realização dos ensaios de fadiga oligocíclica foi utilizada uma máquina eletro-hidráulica INSTRON, modelo 1341, com capacidade máxima de 100 KN. Os ensaios foram realizados em controle de extensão constante, utilizando-se oito corpos de prova cilíndricos de 8 mm de diâmetro. Para o efeito utilizou-se um extensômetro axial, tipo dinâmico, INSTRON modelo 2620-601 de curso 5 mm. O registo simultâneo de forças e deformações foi obtido em um registrador X-Y da marca "Advance Bryans ". A Tabela 1 apresenta o programa de ensaios de fadiga oligocíclica (Silva Ribeiro, 1993).

Tabela 1. Programa de ensaios de fadiga oligocíclica.

Nº do Prov.	$\Delta\epsilon_t$ [%]	diâm. [mm]	ΔP [KN]
1	3,5	7,970	31,250
2	3,0	7,980	30,750
3	2,5	7,970	29,375
4	2,0	7,960	29,125
5	1,6	8,021	28,625
6	1,2	7,965	27,500
7	1,0	7,967	26,750
8	0,9	7,970	26,500

O início de cada ensaio foi precedido de calibrações quer do extensômetro axial quer da célula de carga de forma a colocar a zero os seus valores. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de fadiga oligocíclica. Os dados obtidos incluem a gama de extensão axial, $\Delta\sigma$, a amplitude de tensão nominal, $\Delta\sigma/2$ e o número de ciclos N .

A extensão axial total, a gama de extensão plástica e a carga podem ser obtidas diretamente a partir dos ciclos de histerese, tendo em consideração as calibrações efetuadas. A tensão nominal foi estabelecida, usando a relação $\Delta\sigma = \Delta P/A_0$, onde A_0 representa a área inicial da secção transversal do corpo de prova.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de fadiga oligocíclica

Nº Prov.	$\Delta\sigma/2$ [MPa]	$\Delta\epsilon_t$ [%]	$\Delta\epsilon_p$ [%]	$\Delta\epsilon_e$ [%]	$2N_f$
1	313,19	3,540	2,623	0,917	170
2	307,41	3,040	2,140	0,900	276
3	294,40	2,520	1,658	0,862	452
4	292,65	2,020	1,163	0,857	780
5	283,32	1,620	0,790	0,829	1352
6	275,96	1,220	0,412	0,808	3160
7	268,29	1,020	0,234	0,786	4066
8	266,26	0,940	0,160	0,780	6256

A gama de extensão elástica é definida por:

$$\Delta\epsilon_e = \frac{\Delta\sigma_{nom}}{E} \quad (10)$$

e a gama de extensão plástica por:

$$\Delta\epsilon_p = \Delta\epsilon_t - \Delta\epsilon_e \quad (11)$$

6. APRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS

As fig. 4 a 7 apresentam os registos gráficos dos ensaios de fadiga oligocíclica. A curva cíclica de tensão-deformação é representada na Fig. 4, onde a amplitude de tensão nominal é representada em função da amplitude de extensão axial nominal. É representada, ainda, a curva monótona concluindo-se que a liga não apresenta uma capacidade de endurecimento cíclico apreciável. No sentido de se obter o expoente de endurecimento cíclico, n' , e o coeficiente de resistência cíclica, σ'_f , do material, representa-se graficamente na Fig. 5 em escalas logarítmicas a amplitude de tensão nominal em função da amplitude de extensão plástica.

A Fig. 6 apresenta o registo gráfico da vida à fadiga que representa a evolução da extensão elástica, plástica e total em função do número de reversões até à ruptura, tendo sido obtidas as propriedades de ductilidade cíclica do material.

As propriedades de resistência cíclica do material, b e σ'_f , foram obtidas a partir do gráfico de vida da fadiga, em termos da amplitude de tensão nominal em função do número de reversões até à ruptura representado na fig. 7.

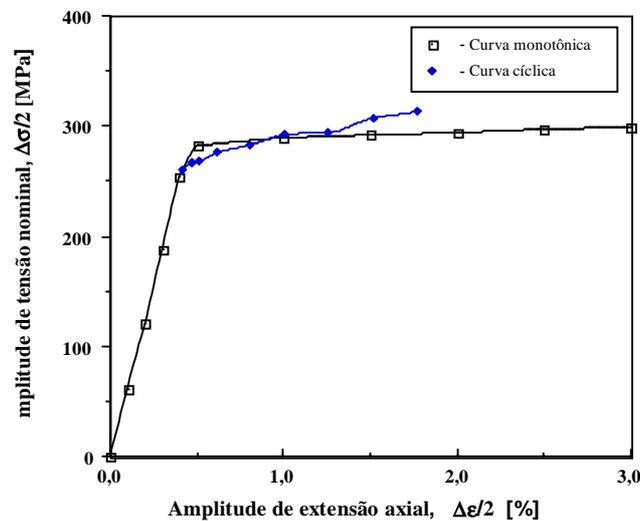


Figura 4 - Curva cíclica e monótona de tensão-deformação.

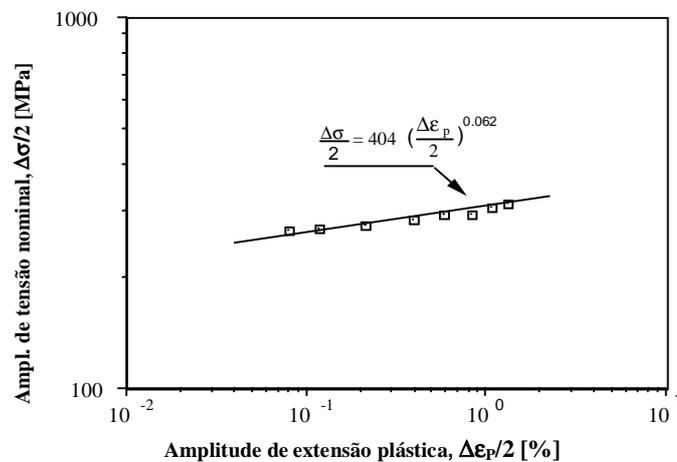


Figura 5 - Curva cíclica de tensão deformação plástica em escalas logarítmicas.

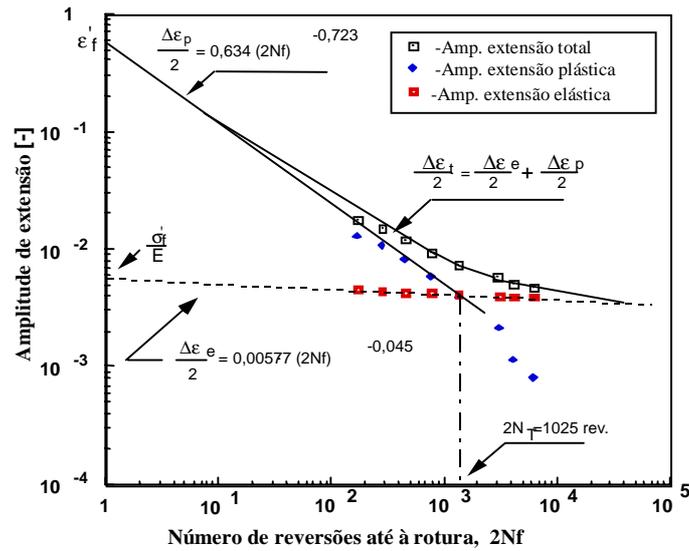


Figura 6 - Curvas de extensão em função do número de reversões.

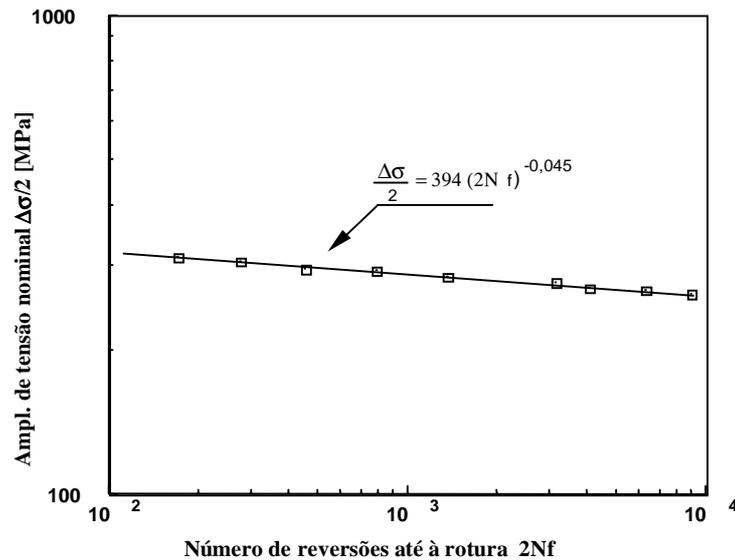


Figura 7 - Curva de tensão nominal em função do número de reversões.

6.1. Determinação das propriedades cíclicas da liga de Al 6061-651

A partir dos resultados representados na Fig. 5, em escalas logarítmicas, foram determinados o expoente e o coeficiente de endurecimento cíclico tendo-se obtido os valores registados na Tabela 3.

Tabela 3. Expoente e coeficiente de endurecimento cíclico da liga de Al 6061- T651.

Propriedade	Dir. longit.	Coef. de corr.
Exp. de end. cíclico n' [-]	0,062	0,965
Coef. de end.cíclico K' [MPa]	404	

Os resultados para a determinação das propriedades de ductilidade e resistência cíclica

destes ensaios estão representados nas Fig. 6 e Fig. 7, gráficos que apresentam a amplitude de extensão e a amplitude de tensão nominal em função do número de reversões $2N_f$. A opção por $2N_f$ ficou a dever-se à falta de equipamento para a detecção da iniciação para a geometria utilizada nos ensaios. As propriedades de ductilidade cíclica foram obtidas a partir da regressão linear através do método dos mínimos quadrados. Os valores obtidos estão indicados na Tabela 4, sendo a equação de Coffin – Manson expressa por:

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = 0,634 (2 N_f)^{-0,723} \quad (12)$$

Para a caracterização das propriedades de resistência cíclica foi utilizada a representação gráfica ilustrada na Fig. 7, que expressa a amplitude de tensão nominal em função do número de reversões. A partir da análise de regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, os valores obtidos estão indicados na Tabela 4. A equação de Basquin é expressa por:

$$\frac{\Delta \sigma}{2} = 394 (2 N_f)^{-0,045} \quad (13)$$

Através da representação gráfica ilustrada na Fig. 6 é possível obter-se o parâmetro σ'_f/E e o expoente de resistência cíclica, expressos em termos da amplitude de extensão elástica em função do número de reversões.

Em face dos resultados obtidos pode-se estabelecer para o módulo de Young o valor de 68284 MPa e, por conseguinte, a amplitude de extensão elástica é representada pela equação:

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = 0,0057 (2 N_f)^{-0,045} \quad (14)$$

Tabela 4. Propriedades de resistência e ductilidade da liga Al 6061-T651.

Propriedade	Dir. longit.	Coef. de corr.
Exp. de duct. cíclica, c [-]	-0,723	0,965
Coe. de duct. cíclica, ε'_f [-]	0,634	
Exp. de resist. cíclica b [-]	-0,045	0,986
Coef. de resist. cíclica σ'_f [Mpa]	394	
σ'_f / E	0,00577	

Fazendo a combinação das propriedades de ductilidade e de resistência cíclica, obtém-se a equação que exprime a resistência à fadiga para a amplitude de extensão total, expressa como:

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = 0,00577 (2 N_f)^{-0,045} + 0,634 (2 N_f)^{-0,723} \quad (15)$$

7. CONCLUSÕES

A liga de alumínio 6061 não apresentou uma capacidade de endurecimento cíclico significativa, verificando-se mesmo a ocorrência de amolecimento cíclico para amplitudes de deformação total inferiores a 1,0 %. Para valores de $\Delta \varepsilon_t/2 > 1,0$ % ocorre endurecimento cíclico sendo a sua importância crescente com o aumento de $\Delta \varepsilon_t/2$.

- A transição de vida à fadiga é aproximadamente de 1025 reversões. Para vidas superiores a este valor, a vida à fadiga depende essencialmente das propriedades de resistência à fadiga, enquanto que para valores inferiores a ductilidade do material determina a sua resistência à fadiga.

REFERÊNCIAS

- Basquin, O. H., 1910, The Exponential Law of Endurance Tests. ASTM Vol 10, pp. 625-630.
- Coffin, L. F., 1954, A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductil Metal., Trans. ASME, Vol 76, pp. 931-950.
- Costa, J. D., 1991, Análise da Tolerância de Defeitos em Ligas de Alumínio".Ph.D.Thesis, FCTUC - Coimbra.
- Landgraf, R. W., 1970, The Resistance of Metals to Cycle Deformation, ASTM STP 467 pp 3-36.
- Lefebvre, D., e Ellyin, F. , 1984, International Journal of Fatigue, Vol 6, Nº 1 January.
- Manson, S. S., 1953, Behaviour of Materials Under Conditions of Thermal Stress, Heat Transfer Symposium, University of Michigan, Eng. Research Inst, pp 9-75.
- Morrow, J. D., , 1965, Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals, Int. Friction Damping and Cyclic Plasticity ASTM, STP 378, pp. 45-87.
- Morrow, J. D., Tuler, F. R.,, 1965, Low Cycle Fatigue Evaluation of Inconel 713C and Waspaloy" Journal of Basic Eng.87, Nº 2, pp. 275-289.
- Richard W. Hertzberg, 1989, Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials., John Wiley and Sons, Third Edition.
- Silva Ribeiro, A., 1993, Efeito da Fase de Iniciação no Comportamento à Fadiga de Estruturas Soldadas". Ph.D. Thesis, UTAD.

LOW - CYCLE FATIGUE. CYCLIC PROPERTIES OF AN Al 6061-T651

Abstract: The use of linear elastic fracture mechanics for fatigue life prediction purposes, assumes that crack like defects are present in the structure component under evaluation. The analysis is conducted assuming that the defect grows until a critical size is attained and collapse of the structure occurs. Generally the initiation phase is not taken into consideration, underestimating the real fatigue life. The error can be considerable in the the case of long lifes where the initiation phase can represent up to 80% of the total fatigue life.

Of the current methods used to predict the initiation phase the local approach method is the most important .

Its application, however, supposes that cyclic properties of the material are known. In the present paper the results of an experimental program designed to obtain the cyclic properties of an Al 6061-T651 are presented.

Keywords: Fatigue, initiation, propagation, low- cycle fatigue.