



## COMPORTAMENTO ELASTOPLÁSTICO CÍCLICO E À FADIGA DA LIGA DE ALUMÍNIO 6061 – T651

ALFREDO DA SILVA RIBEIRO<sup>1</sup>, ABÍLIO M. P. DE JESUS<sup>1</sup>, ANTÓNIO A. FERNANDES<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro  
Departamento de Engenharias

Quinta de Prados, 5001-801 Vila Real, Portugal

<sup>2</sup>IDMEC – Instituto de Engenharia Mecânica  
Rua Dr. Roberto Frias, S/N, 4200-465 Porto, Portugal

*(Recibido 7 de octubre de 2004, para publicación 2 de agosto de 2005)*

**Resumen** – A aplicação da Mecânica da Fractura, na previsão da vida à fadiga, pressupõe a presença de defeitos iniciais que actuam como fendas. A análise é efectuada de modo a estimar o número de ciclos necessário para o crescimento de um defeito inicial até este atingir uma dimensão crítica responsável pela ruína da estrutura. A vida passada na fase de iniciação das fendas não é considerada neste método, o que pode subestimar significativamente a vida real de uma estrutura. Este erro é particularmente importante no caso de vidas longas, para as quais a fase de iniciação pode atingir, em determinados casos, valores da ordem de 80% da vida total à fadiga. Dentro dos métodos actualmente usados na previsão da iniciação de uma fenda, os métodos locais são os mais importantes. A sua aplicação exige o prévio conhecimento das propriedades elastoplásticas cíclicas do material. Assim, apresentam-se neste trabalho um conjunto de resultados de ensaios realizados para obtenção das propriedades elastoplásticas cíclicas e de fadiga oligocíclica para a liga de alumínio 6061-T651.

**Palabras clave** – Fadiga, Iniciação, Comportamento cíclico, Al 6061-T651.

### 1. INTRODUÇÃO

A vida total à fadiga de um componente estrutural,  $N_t$ , pode ser expressa através da soma do número de ciclos passados na fase de iniciação de uma fenda,  $N_i$ , com o número de ciclos decorridos na fase de propagação,  $N_p$ :

$$N_t = N_i + N_p$$

A aplicação da Mecânica da Fractura, na previsão da vida total à fadiga, pressupõe a existência de defeitos iniciais que actuam como uma fenda. Verifica-se que a vida passada na fase de iniciação da fenda não é considerada neste método, o que pode subestimar significativamente a vida real de uma estrutura.

Dos métodos actualmente usados na previsão da iniciação de uma 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 cíclicos necessários à sua identificação.

### 2. COMPORTAMENTO À FADIGA DOS MATERIAIS

O comportamento à fadiga dos materiais, componentes estruturais ou estruturas, pode ser caracterizado com base em resultados obtidos em ensaios de fadiga. Estes ensaios podem ser realizados usando quer provetes lisos quer componentes estruturais quer ainda as próprias estruturas. Os ensaios de fadiga de provetes lisos têm interesse especial nos métodos de aproximação local usados essencialmente na estimativa da fase de iniciação de fendas de fadiga.

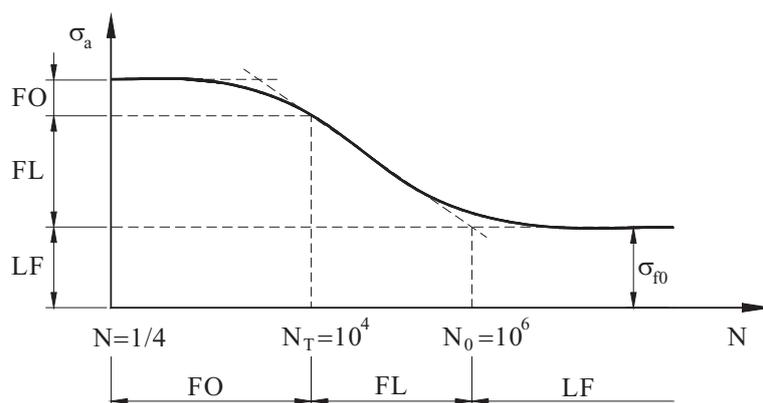


Fig. 1. Domínios da fadiga (FO: Fadiga Oligocíclica; FL: Fadiga de Longa Duração; LF: Limiar de Fadiga-vida infinita ou "quase infinita").

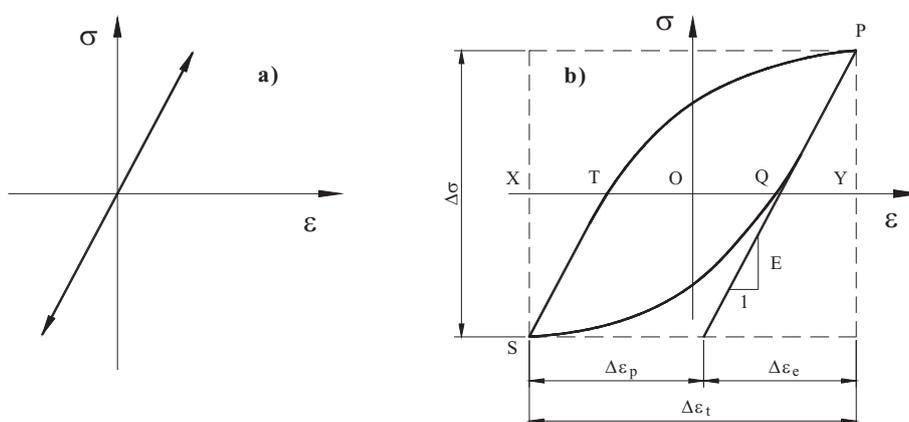


Fig. 2. Relações tensão-deformação cíclicas típicas: a) comportamento elástico; b) comportamento elastoplástico.

O método tradicional de apresentação de resultados experimentais relativos à fadiga é através das curvas S-N ou diagramas de Wöhler. A Fig. 1 ilustra os diferentes domínios da fadiga recorrendo ao diagrama de Wöhler. Normalmente, verifica-se que, quando o número de ciclos de ruptura ultrapassa  $10^4 - 10^5$  ciclos, os provetes são solicitados num domínio essencialmente elástico podendo, no entanto, observar-se o desenvolvimento de deformações plásticas localizadas. Para tensões elevadas, a vida à fadiga decresce progressivamente devido ao desenvolvimento de deformações plásticas importantes, podendo estas serem generalizadas. A existência de fenómenos de plasticidade mais ou menos generalizada conduz à ruptura por fadiga para vidas inferiores a  $10^4 - 10^5$  ciclos, sendo este domínio da fadiga denominado de fadiga de curta duração ou fadiga oligocíclica. O termo fadiga oligocíclica é, pois, utilizado para designar os fenómenos de fadiga em que a ruptura ocorre entre  $10^2$  e  $10^5$  ciclos, devido ao desenvolvimento de deformações plásticas cíclicas que dependem da resistência mecânica e da ductilidade do material. Sendo este domínio da fadiga governado por fenómenos de plasticidade, torna-se essencial caracterizar o comportamento elastoplástico cíclico do material.

Enquanto que o comportamento elástico é caracterizado por uma relação tensão-deformação linear (ver Fig. 2-a), o comportamento elastoplástico apresenta uma relação tensão-deformação não-linear que, para carregamentos cíclicos, origina ciclos de histerese, tal como se ilustra na Fig. 2-b. A gama de deformação total compreende uma componente de deformação elástica,  $\Delta\epsilon_e$ , e uma componente de deformação plástica,  $\Delta\epsilon_p$ . A área definida por cada ciclo de histerese representa a densidade de energia de deformação plástica, por ciclo, sendo a maior parte desta energia dissipada, irreversivelmente, sob a forma de calor e a restante absorvida pelo material, na modificação da sua estrutura de deslocações (Costa, 1991). A energia

total dissipada é obtida através da soma das áreas dos vários ciclos de histerese apresentando, cada material, a capacidade de libertar uma quantidade limitada de energia. Quando esse limite é atingido, propagam-se fendas no material que conduzem à sua ruptura (Lefevre *et al*, 1989).

Quando um material é solicitado, quer em controlo de tensão quer em controlo de deformação, verifica-se que a sua resposta varia ligeiramente, de ciclo para ciclo, durante os primeiros ciclos, acabando por estabilizar após um determinado número de ciclos. Nos ensaios realizados com uma amplitude de deformação constante, a amplitude de tensão varia inicialmente, de ciclo para ciclo, aumentando ou diminuindo, consoante o tipo de material. Enquanto que o fenómeno de aumento progressivo da amplitude de tensão é denominado de endurecimento cíclico, o fenómeno de diminuição progressiva da amplitude de tensão é designado de amaciamento cíclico. Os fenómenos de endurecimento e amaciamento cíclicos também se observam nos ensaios realizados com amplitude de tensão constante (controlo de tensão). Para este tipo de solicitação, enquanto o endurecimento cíclico se traduz por uma diminuição da amplitude de deformação, o amaciamento cíclico resulta num aumento da gama de deformação.

Geralmente, após um determinado número de ciclos, que pode ser reduzido ( $\leq 100$ ), os ciclos de histerese estabilizam alcançando, o material, as condições de equilíbrio, para os limites de tensão ou deformação impostos (Hertzberg, 1989). Se se unirem as extremidades dos ciclos de histerese estabilizados, relativos a diferentes níveis de deformação, obtém-se uma curva, designada curva cíclica do material, que descreve o comportamento cíclico estabilizado do material. Estas curvas podem ser obtidas usando diversas técnicas. Landgraf *et al* (1969) sugeriram cinco técnicas diferentes para determinação da curva cíclica dos materiais, das quais se destaca a técnica de um provete por cada ponto da curva, usada no presente estudo.

A curva cíclica do material pode ser expressa recorrendo à relação empírica proposta por Ramberg e Osgood (1943):

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left( \frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{1/n'}$$

onde  $K'$  e  $n'$  representam, respectivamente, o coeficiente e expoente de endurecimentos cíclicos. A equação anterior relaciona a amplitude de deformação com a amplitude de tensão dos ciclos de histerese correspondentes ao comportamento estabilizado do material.

### 3. LEIS FENOMENOLÓGICAS DA FADIGA. PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E DUCTILIDADE CÍCLICAS

No início do século XX as investigações, no que se refere às propriedades de fadiga dos materiais centravam-se, essencialmente, na definição de relações empíricas entre uma tensão e o número de ciclos de rotura. Um resultado desses esforços foi a obtenção da equação de Basquin (1910), adoptada sistematicamente nos estudos seguintes da fadiga, a qual relaciona a amplitude de tensão com a duração da solicitação:

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (1)$$

onde  $\sigma'_f$  representa o coeficiente de resistência cíclica o qual assume, normalmente, um valor inferior à tensão verdadeira de fractura, resultante do ensaio de tracção simples. A amplitude de deformação elástica é dada por  $\Delta\varepsilon_e / 2 = \sigma_a / E$  pelo que a Eq. (1) pode ser expressa em função da amplitude de deformação elástica:

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

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

A partir dos anos 50, e após a compreensão dos ciclos de histerese desenvolvidos nos materiais sujeitos a carregamentos elastoplásticos cíclicos, verificou-se que a deformação plástica desempenha um papel importante na previsão da resistência à fadiga. Coffin (1954) e Manson (1953), sugeriram a relação:

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (3)$$

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

As propriedades de resistência e de ductilidade cíclica podem ser usadas conjuntamente para exprimir a resistência à fadiga em termos da deformação total. Conforme se ilustra na Fig. 2, a deformação total pode ser decomposta numa componente de deformação elástica e numa componente da deformação plástica de tal modo que, combinando as Eqs. (2) e (3), resulta a seguinte relação geral, que relaciona a deformação total com a vida à fadiga:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (4)$$

A equação anterior é em geral utilizada para determinar o número de ciclos necessário à iniciação de uma fenda de fadiga, onde  $\sigma'_f/E$  e  $\varepsilon'_f$  representam, respectivamente, as amplitudes de deformação elástica e plástica, para  $2N_f = 1$ .

Morrow *et al* (1965) demonstraram que os expoentes  $b$  e  $c$  variam com o expoente de endurecimento cíclico,  $n'$ , tendo proposto as seguintes relações:

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

Vários autores têm sugerido relações entre  $\varepsilon'_f$  e  $\varepsilon_f$  (deformação verdadeira de fractura obtida num ensaio de tracção monótono). As relações apresentadas são numerosas variando  $\varepsilon'_f$  entre  $0.35\varepsilon_f$  e  $\varepsilon_f$ , dependendo do tipo de material. Landgraf (1970) sugeriu, para a determinação do coeficiente de ductilidade cíclica, a seguinte expressão:

$$\varepsilon'_f = 0.002 \left( \sigma_f / \sigma_{0.2} \right)^{1/n'} \quad (6)$$

onde  $\sigma_f$  representa a tensão verdadeira de fractura e  $\sigma_{0.2}$  representa a tensão limite convencional de elasticidade correspondente a uma deformação permanente de 0.2%. A aplicação desta relação tem permitido obter bons resultados.

#### 4. MATERIAL, PROGRAMA EXPERIMENTAL E RESULTADOS

O material sobre o qual incidiu este estudo foi a liga de alumínio 6061 – T651. Esta liga de alumínio apresenta magnésio e silício como principais elementos de liga (liga Al-Mg-Si). Estes elementos de liga combinam-se formando fases metaestáveis do composto intermetálico Mg<sub>2</sub>Si. A liga contém ainda elementos de liga suplementares tais como o cobre, usado para aumentar a resistência mecânica, e o crómio, usado para aumentar a tenacidade e o tamanho de grão. Esta liga possui resistência mecânica média, boa resistência à corrosão e boas características de soldabilidade. No que concerne as aplicações, estas procuram tirar partido do elevado índice resistência/peso. Assim, esta liga é usada em aplicações estruturais importantes salientando-se, no domínio dos transportes, o fabrico de carroçarias, vagões de



Fig. 3. Micrografia da liga de alumínio 6061-T651 correspondente à direcção longitudinal (c/ ataque químico, ampl. 50×).

Tabela 1. Composição química da liga Al 6061-T651 (% em peso).

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	B	Zr	Pb	Ti+Zr
<b>0.69</b>	0.29	0.297	0.113	<b>0.94</b>	0.248	0.15	0.019	0.0021	0.001	0.02	0.02

caminho de ferro e caravanas e, noutros domínios, estruturas de *pipelines*, equipamentos de manutenção e mobiliário.

A Tabela 1 resume a composição química nominal da liga de alumínio 6061-T651. O teor de magnésio de 0.94% é o principal responsável por algumas propriedades importantes da liga, nomeadamente a elevada resistência à corrosão e a boa soldabilidade.

A liga de alumínio foi fornecida na forma de placas de 24 mm de espessura obtidas por laminagem. Na Fig. 3 apresenta-se uma micrografia da liga de alumínio correspondente à direcção de laminagem ou direcção longitudinal. A amostra foi observada num microscópio óptico metalográfico Zeiss, tipo Axiobhot. As amostras foram polidas mecanicamente e posteriormente sujeitas a um ataque químico, durante 60 segundos, empregando-se reagente Graft-Sargent composto por água destilada (84 ml), HNO<sub>3</sub> (15.5 ml), HF (0.5 ml) e CO<sub>3</sub> (3 gr).

A liga de alumínio 6061 é tratável termicamente com vista a obtenção de uma maior dureza. O material foi fornecido já tratado termicamente com o tratamento T651. Este tratamento tem como base o tratamento térmico T6 o qual é composto pelas fases de solubilização, têmpera e envelhecimento artificial. A temperatura de solubilização é de cerca de 530 °C. A temperatura de envelhecimento é de cerca de 160 °C e o tempo de envelhecimento é de cerca de 18 horas. Adicionalmente ao tratamento T6 é aplicado um estiramento entre 1.5-3% de modo a produzir um alívio de tensões residuais. Este estiramento é aplicado após o tratamento de solubilização. Após este estiramento não são aplicadas quaisquer operações adicionais com o intuito de eliminar eventuais desalinhamentos (ASM, 1992).

As propriedades de resistência mecânica da liga de alumínio 6061-T651 foram determinadas à temperatura ambiente através do ensaio de tracção uniaxial. Os ensaios foram conduzidos segundo a direcção longitudinal da placa laminada, utilizando-se provetes de secção cilíndrica. Os resultados são representados na Tabela 2. Também se inclui, na Tabela 2, os valores das propriedades sugeridos pela ASM (1992).

Com vista à obtenção das propriedades elastoplásticas cíclicas e de fadiga da liga de alumínio 6061-T651 foram efectuados ensaios de fadiga oligocíclica em provetes lisos cilíndricos com a geometria ilustrada na Fig. 4. Estes provetes foram retirados de uma placa de 24 mm de espessura segundo a direcção longitudinal. Os provetes foram sujeitos a polimentos locais com lixas de granulometrias decrescentes, desde 320 a 4000, seguido de polimento com pano de feltro embebido em alumina normal e finalmente em alumina fina.

Tabela 2. Propriedades de resistência mecânica da liga Al 6061-T651.

Propriedades	$\sigma_r$ [MPa]	$\sigma_c$ [MPa]	HB	$\epsilon_r$ [%]
Valor máximo	317	279	72	15.8
Valor mínimo	290	242	70	10.0
ASM (1992)	310	276	95	17

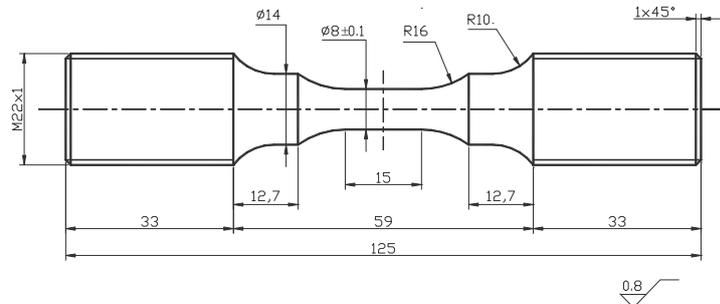


Fig. 4. Dimensões dos provetes utilizados.

Tabela 3. Programa de ensaios de fadiga oligocíclica.

Nº do Prov.	$\Delta\epsilon$ [%]	$\phi$ [mm]	$\Delta P$ [kN]	$f$ [Hz]
1	3.5	7.970	31.250	0.057
2	3.0	7.980	30.750	0.067
3	2.5	7.970	29.375	0.080
4	2.0	7.960	29.125	0.100
5	1.6	8.021	28.625	0.125
6	1.2	7.965	27.500	0.166
7	1.0	7.967	26.750	0.200
8	0.9	7.970	26.500	0.222

Os ensaios de fadiga oligocíclica foram realizados numa máquina servohidráulica INSTRON, modelo 1341, com capacidade máxima de carga de 100 kN. Os ensaios foram realizados em controlo de deformação, tendo-se utilizado oito provetes cilíndricos de 8 mm de diâmetro. Para o efeito utilizou-se um extensómetro axial, tipo dinâmico, da marca INSTRON, modelo 2620-601 e com curso 5 mm. O registo simultâneo da força e deformação foi obtido com um registador X-Y da marca Advance Bryans. A Tabela 3 resume o programa de ensaios de fadiga oligocíclica. Durante os ensaios procurou-se impor uma velocidade de deformação média constante de 0.4%/s. Com base nesta velocidade de deformação média calculou-se a frequência de cada ensaio usando a seguinte expressão:

$$f = \frac{d\epsilon/dt}{4\epsilon_a} = \frac{d\epsilon/dt}{2\Delta\epsilon} \quad (7)$$

A Tabela 3 lista a gama de deformação imposta a cada provete, o diâmetro do provete, a gama de carga aplicada e a frequência do ensaio. A gama de carga corresponde ao valor medido para metade da vida dos provetes (comportamento cíclico estabilizado).

Tabela 4. Resultados dos ensaios de fadiga oligocíclica.

Nº Prov.	$\Delta\sigma / 2$ [MPa]	$\Delta\varepsilon$ [%]	$\Delta\varepsilon_p$ [%]	$\Delta\varepsilon_e$ [%]	$2N_f$
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

O início de cada ensaio foi precedido de balanceamentos, quer do extensómetro axial, quer da célula de carga, de forma a colocar a zero os seus valores.

A Tabela 4 resume os resultados dos ensaios de fadiga oligocíclica. Os resultados incluem as gamas de deformação axiais,  $\Delta\varepsilon$ ,  $\Delta\varepsilon_e$  e  $\Delta\varepsilon_p$ , a amplitude de tensão,  $\Delta\sigma / 2$ , e o número de reversões de rotura,  $2N_f$ .

A gama de deformação total foi imposta e posteriormente verificada/rectificada pela análise directa dos ciclos de histerese (distância XY da Fig. 2b). A amplitude de tensão foi determinada com base na relação:

$$\Delta\sigma = \Delta P / A_0 \quad (8)$$

onde  $A_0$  representa a área inicial da secção transversal dos provetes. A gama de deformação plástica foi medida, directamente, através da largura dos ciclos de histerese (distância TQ da Fig. 2b). A gama de deformação elástica calculada através da relação seguinte:

$$\Delta\varepsilon_e = \Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon_p \quad (9)$$

## 5. ANÁLISE DE RESULTADOS

As Figs. 5 a 10 apresentam alguns registos gráficos obtidos com base na análise dos resultados dos ensaios de fadiga oligocíclica. Na Fig. 5 apresenta-se a curva cíclica da liga de alumínio 6061-T651. Esta curva relaciona a amplitude de tensão com a amplitude de deformação axial, relativas ao comportamento cíclico estabilizado do material. Na mesma figura também se representa a curva monótona, constatando-se que a liga não apresenta uma capacidade de endurecimento cíclico apreciável. Com efeito, para amplitudes de deformação até cerca de 0.9% verifica-se um ligeiro amaciamento cíclico do material; para amplitudes de deformação superiores observa-se um ligeiro endurecimento cíclico do material.

Na Fig. 6 representa-se a evolução da amplitude de tensão com o número de ciclos para os vários provetes testados. A análise da figura confirma a pouca capacidade de endurecimento cíclico da liga de alumínio 6061-T651, sendo apenas visível um ligeiro endurecimento para as gamas de deformação mais elevadas.

Com o intuito de facilitar a identificação do coeficiente e expoente de endurecimentos cíclicos, respectivamente  $K$  e  $n'$ , representa-se na Fig. 7, em escalas logarítmicas, a amplitude de tensão em função da amplitude de deformação plástica. A análise de regressão linear sobre os dados representados na Fig. 7 permitiu identificar o coeficiente e expoente de endurecimento cíclico, indicados sobre o gráfico. O coeficiente de correlação resultante da análise de regressão foi de 0.9528.

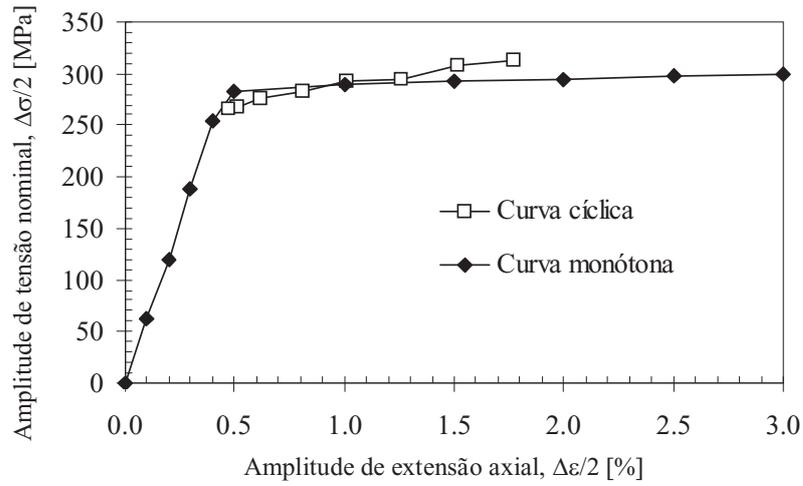


Fig. 5. Curva cíclica e monótona da liga de alumínio 6061-T651.

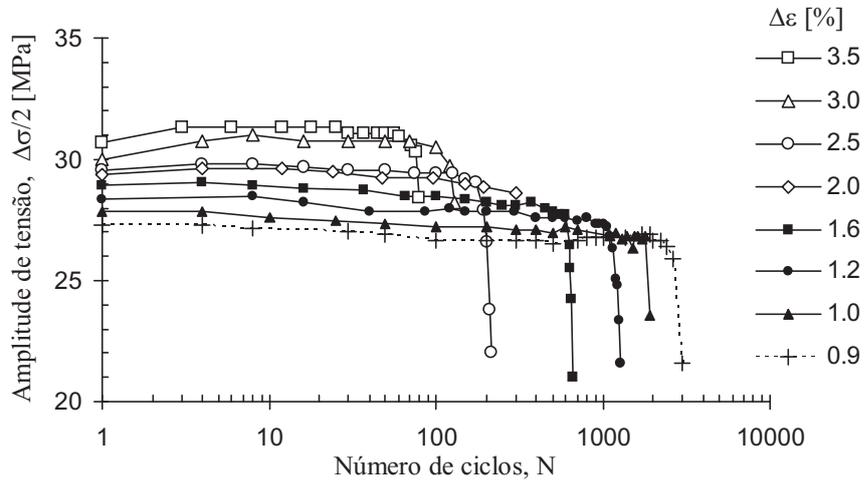


Fig. 6. Evolução da amplitude de tensão com o número de ciclos para a liga de alumínio 6061-T651.

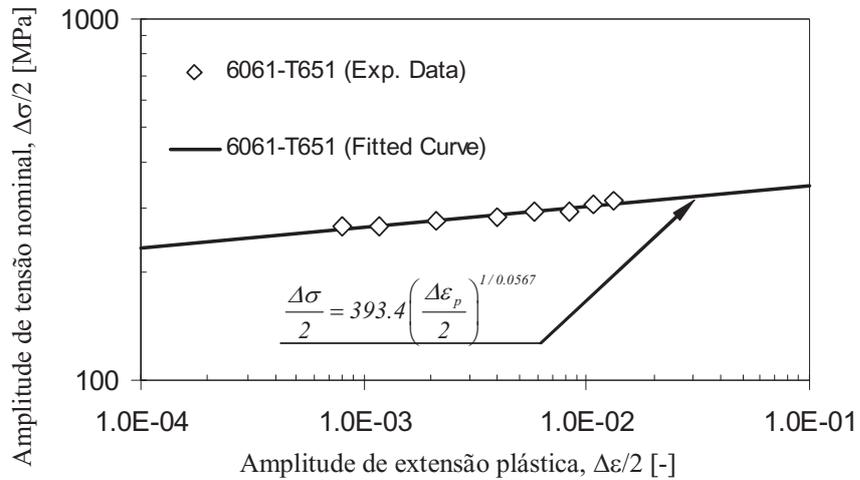


Fig. 7. Curva cíclica da liga de alumínio 6061-T651.

A Fig. 8 apresenta os resultados de resistência à fadiga da liga de alumínio 6061 – T651. São representadas as deformações elástica, plástica e total em função do número de reversões até à ruptura. Neste caso, considerou-se a rotura como sendo a separação total do provete em duas partes, em vez da iniciação de uma fenda. Esta opção deveu-se à falta de equipamento para detectar a iniciação para a geometria de provete utilizada. No entanto, o eventual erro cometido, ao se considerar a rotura final em vez da iniciação, é mínimo pois o número de ciclos de propagação é extremamente reduzido.

Análises de regressão linear sobre os dados experimentais deformação elástica *versus* número de reversões de rotura e deformação plástica *versus* número de reversões de rotura permitiram determinar as seguintes relações:

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = 0.0058 (2N_f)^{-0.0453} \quad (10)$$

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = 0.8680 (2N_f)^{-0.7745} \quad (11)$$

O coeficiente e expoente da relação (10) são respectivamente  $\frac{\sigma'_f}{E}$  e  $b$ . A relação (11) corresponde à relação de Coffin-Manson sendo os seu coeficiente e expoente respectivamente  $\varepsilon'_f$  e  $c$ . Os coeficientes de correlação das regressões lineares que levaram à identificação das relações (10) e (11) foram, respectivamente, 0.9823 e 0.9680.

Na Fig. 9 representa-se os resultados dos ensaios de fadiga em termos da amplitude de tensão. A amplitude de tensão foi calculada dividindo a amplitude da carga correspondente ao comportamento estabilizado do material (metade da vida do provete) pela área de secção do provete. A análise de regressão linear destes resultados experimentais permitiu identificar a relação de Basquin:

$$\frac{\Delta \sigma}{2} = 394 (2N_f)^{-0.0453} \quad (12)$$

O coeficiente e expoente da relação (12) correspondem a  $\sigma'_f$  e  $b$  respectivamente. A relação (12) pode ser convertida na relação (10), dividindo-a pelo módulo de elasticidade do material. Desta constatação resulta uma estimativa indirecta do módulo de elasticidade do material igual a 68.4 MPa. Este valor do módulo de elasticidade está muito próximo do valor sugerido na referência (ASM, 1992) para a liga Al 6061-T651. Esta última referência sugere o valor de 68.9 GPa.

A informação experimental apresentada nas Figs. 8 e 9 possibilitou a caracterização das propriedades de resistência e ductilidade à fadiga. A informação de ductilidade à fadiga é determinante para realizar estimativas da vida à fadiga no domínio de deformações plásticas importantes; a informação de resistência à fadiga é necessária para realizar estimativas da vida à fadiga no domínio de fadiga onde as deformações elásticas são predominantes. A transição entre os dois domínios de fadiga corresponde a uma igualdade entre deformações elásticas e plásticas. Igualando as equações (10) e (11) obtém-se o seguinte número de reversões de transição:

$$2N_T = 969 \quad (13)$$

A amplitude de deformação total de transição resulta somando as equações (10) e (11) com o número de reversões definido em (13):

$$\frac{\Delta \varepsilon_T}{2} = 0.0084 = 0.84\% \quad (14)$$

Combinando as Eqs. (10) e (11) resulta a seguinte relação global:

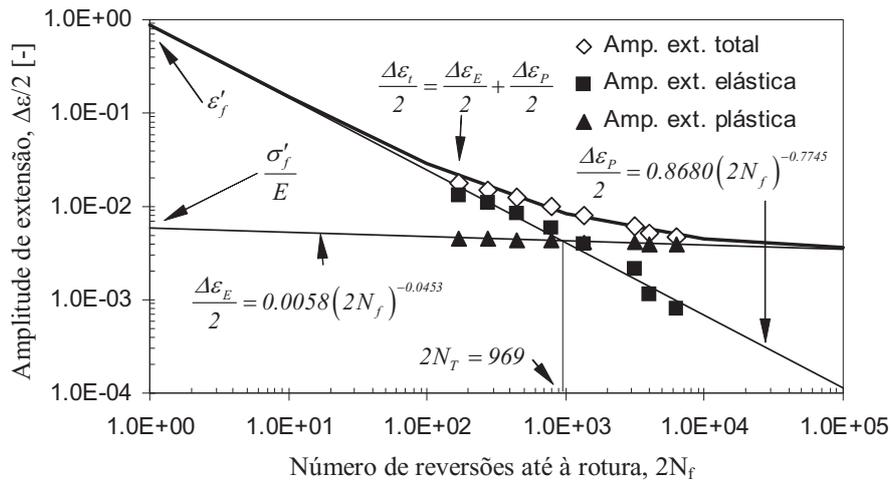


Fig. 8. Curvas de resistência à fadiga da liga de alumínio 6061-T651.

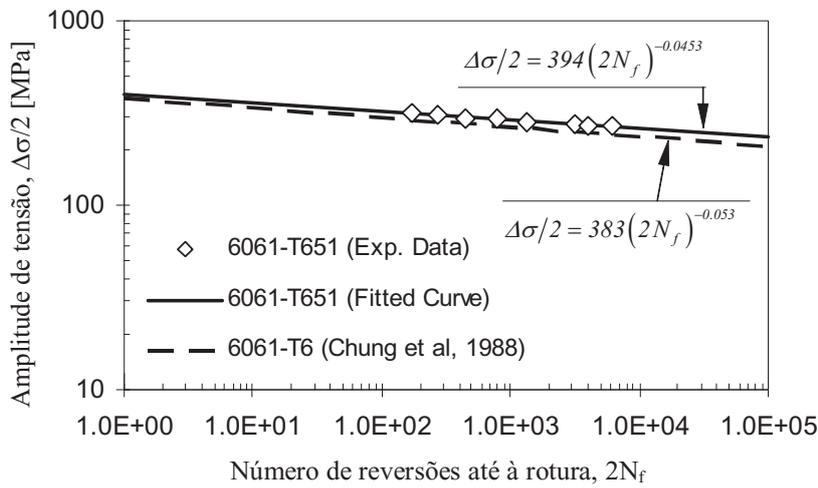


Fig. 9. Curva gama de tensão *versus* número de reversões.

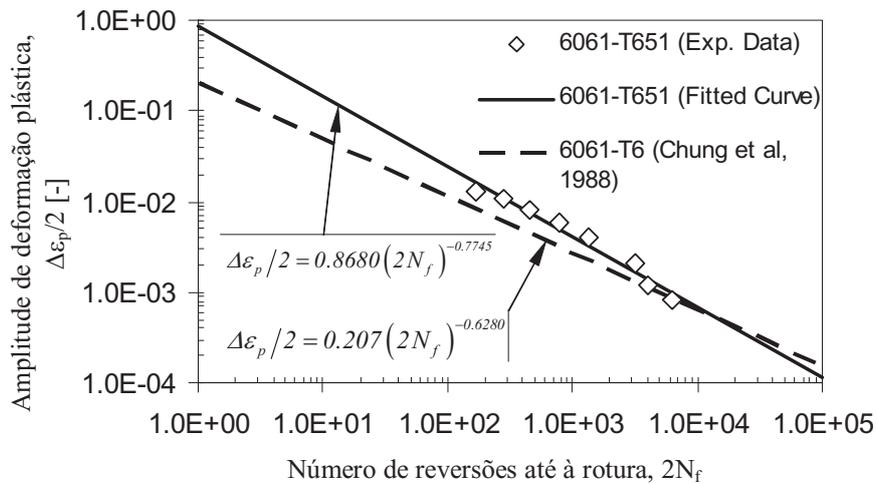


Fig. 10. Curva gama de deformação plástica *versus* número de reversões.

Tabela 5. Resumo das propriedades elastoplásticas cíclicas e de fadiga da liga Al 6061-T651.

Parâmetros	Al 6061 – T651	Al 6061 – T6 (Chung <i>et al.</i> , 1988)
$n'$	<b>0.057</b>	0.089
$n' = b/c$	<b>0.059</b>	0.084
$c$ [-]	<b>-0.775</b>	-0.628
$c = -1/(1+5n')$ [-]	<b>-0.779</b>	-0.692
$\varepsilon_f$	-	1.335
$\varepsilon'_f$	<b>0.868</b>	0.207
$\varepsilon'_f = 0.35\varepsilon_f$	-	0.467
$b$ [-]	<b>-0.045</b>	-0.053
$b = -n'/(1+5n')$ [-]	<b>-0.044</b>	-0.062
$\sigma'_f$ [MPa]	<b>394</b>	383
$K'$ [MPa]	<b>393.4</b>	-

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = 0.0058(2N_f)^{-0.0453} + 0.8680(2N_f)^{-0.7745} \quad (15)$$

ou usando a relação (12):

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{394}{E}(2N_f)^{-0.0453} + 0.8680(2N_f)^{-0.7745} \quad (16)$$

Na Tabela 5 resumem-se as propriedades elastoplásticas cíclicas e de fadiga da liga Al6061-T651, obtidas neste trabalho. Os coeficientes  $c$  e  $b$ , para além de terem sido obtidos directamente através dos dados experimentais, também foram estimados indirectamente através do coeficiente de endurecimento cíclico,  $n'$ , com base nas relações (5). Os valores estimados são muito próximos dos obtidos experimentalmente, o que revela uma boa aptidão das relações (5).

A Tabela 5 também inclui os valores das propriedades apresentadas por Chung e Abel (1988), para a liga Al 6061 –T6. A liga estudada por Chung e Abel (1988) foi fornecida na forma de varões com um tratamento de solubilização, têmpera e envelhecimento artificial semelhante ao sofrido pela liga estudada neste trabalho. No entanto, ao contrário da liga analisada neste artigo, a liga estudada por Chung e Abel (1988) não sofreu qualquer tratamento mecânico de estiramento para alívio de tensões. A liga estudada por Chung e Abel (1988) apresenta um percentagem de Manganês e Silício iguais a 1.45 e 0.59%, respectivamente. Enquanto que a percentagem de Silício da liga estudada por Chung e Abel (1988) é apenas ligeiramente inferior à liga estudada neste trabalho, a percentagem de Manganês é substancialmente superior. Com o intuito de tornar a comparação dos dois conjuntos de propriedades mais facilitada, representou-se nas Figs. 9 e 10 as curvas de deformação elástica *versus* vida e deformação plástica *versus* vida para os dois conjuntos de propriedades. Consta-se que as propriedades de resistência à fadiga conduzem a vidas muito semelhantes; já as propriedades de ductilidade à fadiga conduzem a previsões com desvios importantes, sobretudo se as comparações forem realizadas para domínios de fadiga de curta duração. Com efeito, os tratamentos termo-mecânicos das duas ligas, o semi-producto de base e as composições químicas apresentam diferenças que contribuem para estas diferenças detectadas nas propriedades.

Na Fig. 11 comparam-se curvas de deformação total - vida para várias ligas de alumínio da série 6000. Todas as ligas consideradas têm um tratamento térmico tipo T6. Adicionalmente a liga estudada neste trabalho apresenta um tratamento mecânico de estiramento entre 1.5 e 3% de modo a produzir um alívio de tensões (T651). Da análise da Fig. 11 constata-se que todas as ligas com tratamento T6 apresentam curvas muito próximas; já a liga testada neste trabalho apresenta um comportamento significativamente

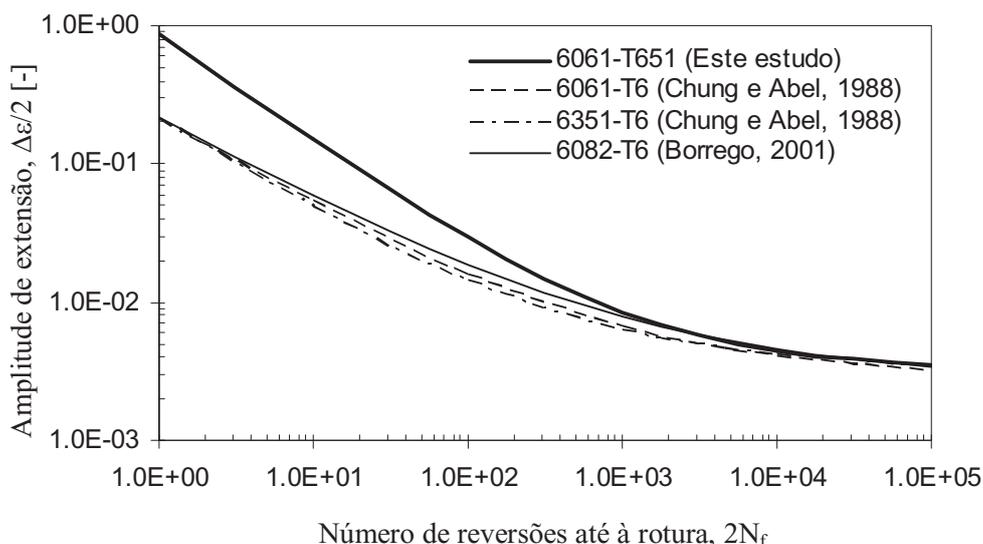


Fig. 11. Comparação entre as curvas deformação total – vida para várias ligas de alumínio da série 6000.

diferente para domínios de fadiga de curta duração. Pode-se então concluir que o tratamento mecânico de estiramento tem um efeito no comportamento à fadiga para domínios de curta duração muito importante. Para vidas à fadiga mais elevadas –superiores a  $10^5$  ciclos– todas as ligas apresentam a mesma resistência à fadiga.

## 6. CONCLUSÕES FINAIS

Neste artigo foi apresentado um estudo sobre a liga de alumínio 6061-T651. Esta liga apresenta uma relação resistência mecânica/peso elevada tornando-a interessante para aplicações estruturais diversas e em particular nos transportes. O trabalho permitiu caracterizar alguns aspectos do comportamento elastoplástico cíclico da liga, tendo-se verificado que a liga apresenta pouca capacidade de endurecimento cíclico. Só para amplitudes de deformação elevadas, acima de 1%, se verifica um ligeiro endurecimento cíclico. O presente estudo também permitiu caracterizar o comportamento à fadiga de curta-média duração da liga Al6061-T651. Este comportamento à fadiga foi descrito essencialmente recorrendo a curvas deformação *versus* vida. Finalmente, foram estabelecidas comparações entre a liga objecto de estudo neste trabalho e outras ligas da mesma série cuja informação está disponível na literatura. Todas as ligas usadas na comparação apresentavam um tratamento térmico idêntico (T6). Já a liga deste estudo para além do tratamento T6 apresenta um tratamento mecânico adicional de estiramento com o objectivo de reduzir as tensões residuais. Da comparação, pode-se constatar que o tratamento mecânico é responsável por uma diferença significativa entre o comportamento à fadiga da liga estudada e as ligas usadas na comparação. A liga estudada apresenta uma maior resistência à fadiga para domínios de fadiga de curta duração. Para vidas de fadiga de média-longa duração ( $>10^4$  reversões) todas as ligas apresentam comportamentos muito semelhantes.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] ASM, “Metals Handbook - Vol. 2: Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials”, 10<sup>th</sup> eds., ASM International Handbook Committee (1992)
- [2] Basquin, O.H., “The Exponential Law of Endurance Tests”, *ASTM*, **10**, 625-630 (1910)
- [3] Borrego, L.F.P., “Propagação de fendas de fadiga a amplitude de carga variável em ligas de alumínio AlMgSi”. Tese de Doutoramento, FCTUC, Coimbra (2001)

- [4] Coffin, L.F., “A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal”, *Trans. ASME*, **76**, 931-950. (1954)
- [5] Costa, J.D., “Análise da Tolerância de Defeitos em Ligas de Alumínio”, Tese de Doutorado, FCTUC – Coimbra (1991)
- [6] Chung, Y.S., Abel, A., “Low Cycle Fatigue of Some Aluminum Alloys”, *Low Cycle Fatigue*, ASTM STP 942, H. D. Solomon, G. R. Halford, L. R. Kaisand, and B. N. Leis, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 94-106 (1988)
- [7] Landgraf, R.W., “The Resistance of Metals to Cycle Deformation”, ASTM STP 467, 3-36 (1970)
- [8] Landgraf, R. W., Morrow J. D. e Endo T., “Determination of the cyclic stress-strain curve”, *Journal of Materials*, *JMSLA*, **4**, 176-188 (1969)
- [9] Lefebvre, D., Ellyin, F., “Cyclic response and inelastic strain energy in low cycle fatigue”, *International Journal of Fatigue*, **6** (1), 9-15 (1984)
- [10] Manson, S.S., “Behaviour of Materials under Conditions of Thermal Stress”, *Heat Transfer Symposium*, *University of Michigan*, Eng. Research Inst, 9-75 (1953)
- [11] Morrow, J.D., “Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals”, *Int. Friction Damping and Cyclic Plasticity*, ASTM STP 378, 45-87 (1965)
- [12] Morrow, J.D., Tuler, F.R., “Low Cycle Fatigue Evaluation of Inconel 713C and Waspaloy”, *Journal of Basic Engineering*, **87**(2), 275-289 (1965)
- [13] Ramberg, W., Osgood, W.R., “Description of stress-strain curves by three parameters”, Technical Report No 902, National Advisory Committee for Aeronautics, NACA (1943)
- [14] Hertzberg, Richard W., “Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials”, John Wiley and Sons, Third Edition (1989)

### **CICLIC ELASTOPLASTIC AND FATIGUE BEHAVIOUR OF THE 6061-T651 ALUMINUM ALLOY**

**Abstract** – The Fracture Mechanics can be applied in fatigue analysis, in particular to perform residual life calculations for structures or components exhibiting initial defects acting like cracks. The number of cycles to failure is evaluated as the number of cycles required to propagate an initial crack until a critical dimension, responsible for the failure of the structure or component. This approach does not take into account the crack initiation phase, which can underestimate significantly the fatigue life of the structures or components. In particular, for long life fatigue regimes, the crack initiation can represent 80% of the whole fatigue process. For these cases, the local approaches are the most appropriate ones. The application of the local approaches requires the previous knowledge of the cyclic elastoplastic behaviour of the materials as well as their fatigue properties. Therefore, this paper proposes the cyclic elastoplastic and low-cycle fatigue properties of the 6061-T651 aluminium alloy.

**Keywords** – Fatigue, Initiation, Cyclic behaviour, AL 6061-T651.