

INFLUÊNCIA DO MEIO CORROSIVO NA TAXA DE PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR FADIGA NA LIGA Al 7050-T7451

Sergio Schneider

Faculdade de Engenharia de Lorena – FAENQUIL

Departamento de Engenharia de Materiais – DEMAR, Polo Urbo Industrial – Gleba AI6, Mondesir – Lorena, SP – C.P. 116 – CEP 12600-000 - sergiosch@demar.faenquil.br

Ana Cristina Mendes da Silva

Faculdade de Engenharia de Lorena – FAENQUIL

Departamento de Engenharia de Materiais – DEMAR, Polo Urbo Industrial – Gleba AI6, Mondesir – Lorena, SP – C.P. 116 – CEP 12600-000

Sandra Giacomin Schneider

Faculdade de Engenharia de Lorena – FAENQUIL

Departamento de Engenharia de Materiais – DEMAR, Polo Urbo Industrial – Gleba AI6, Mondesir – Lorena, SP – C.P. 116 – CEP 12600-000 - sandra@demar.faenquil.br

Miguel Justino Ribeiro Barboza

Faculdade de Engenharia de Lorena – FAENQUIL

Departamento de Engenharia de Materiais – DEMAR, Polo Urbo Industrial – Gleba AI6, Mondesir – Lorena, SP – C.P. 116 – CEP 12600-000 - mbarbosa@demar.faenquil.br

Resumo. O presente trabalho utiliza os conceitos da Mecânica da Fratura Elástica Linear (MFEL) para estudar o efeito do ambiente corrosivo na propagação de trinca por fadiga na liga de Al 7050 T7451. O meio corrosivo é composto por uma solução aquosa salina (3,5 wt% NaCl,) e os resultados obtidos são comparados com aqueles realizados ao ar. Para isso, em ambos os casos, será utilizado a equação de Paris-Erdogan, com especial interesse no estágio II de crescimento de trinca, empregando-se o programa de computador RPCA (Research on Fatigue Crack Propagation under Constant Amplitude Load). Uma caracterização inicial é feita para determinar a tenacidade à fratura (K_{IC}) da liga, ao ar de acordo com a norma ASTM E 399, utilizando corpos de prova do tipo CT compacto. Uma análise complementar é feita através da utilização de microscópio eletrônico de varredura (MEV), em que, são estudadas as principais características e micromecanismos associados ao processo de fratura.

Palavras-Chave: propriedades mecânicas; mecânica da fratura; fadiga; ligas de alumínio

1. INTRODUÇÃO

As ligas de alumínio da série 7000 ou ligas do sistema Al-Zn-Mg-Cu foram desenvolvidas com o objetivo de apresentarem uma alta resistência mecânica e alto desempenho como componente estrutural em aplicações na indústria aeronáutica e aeroespacial. São ligas tratáveis térmicamente,

pois elementos como Zn e Mg, com as devidas razões de proporção, são responsáveis pela formação de precipitados resistentes tipo η e η' que produzem endurecimento do material (Carvalho, 1999). Algumas dessas ligas merecem destaque pela elevada resistência mecânica, tais como: 7075 T6 (570 MPa), 7010 T73 (500 MPa) e 7050 T73 (541 MPa) (Bresciani Filho, 1992 e Schra, 1983). A liga 7075, amplamente usada na condição T6 (solubilizada seguida de envelhecimento artificial), apresenta maior resistência mecânica. No entanto, essa liga apresenta limitações na performance estrutural devido a susceptibilidade à trincas por corrosão sob tensão e a deterioração de sua resistência ao longo da espessura da placa (Schra, 1983 e Chih-Kuang, 1998).

A liga de Al 7050 foi desenvolvida especificamente para suprir as limitações da liga Al 7075 T6, modificando a concentração de certos elementos de liga. As principais modificações devem-se ao aumento da concentração de Cu que promoveu uma boa relação entre resistência mecânica e resistência à corrosão sob tensão, e a restrição na concentração de impurezas como o Fe e o Si, que promoveram o aumento da tenacidade à fratura sem comprometimento significativo da resistência mecânica (Chih-Kuang, 1998).

Seleção de materiais e os critérios de projeto utilizados na indústria aeronáutica utilizam conceitos da Mecânica da Fratura para se evitar falhas catastróficas. A tenacidade à fratura tem sido um dos objetos de investigação mais determinantes na avaliação de ligas de alumínio como componente estrutural (Kaufman, 1971). As configurações e condições que são impostas a esses materiais, na indústria aeronáutica, favorecem o surgimento de defeitos como a nucleação de trincas.

Muitas das falhas em estruturas ocorrem devido a carregamentos cíclicos, e a sua prevenção torna-se de vital importância em projetos de engenharia. Porém, a utilização da abordagem tradicional baseadas nas curvas de "Wöhler" (curva S-N) pode ser insuficiente por não trazer informações relativas a iniciação e propagação de trincas por fadiga (Bastian, 1987). A abordagem utilizando a Mecânica da Fratura tem sido uma ferramenta efetiva na caracterização das taxas de propagação de trinca por fadiga. Geralmente, a taxa de crescimento de trinca (da/dN) é apresentada em função da variação do Fator Intensidade de Tensão (ΔK), cujas leis de propagação são de natureza empírica e algumas são fundamentalmente teóricas (Satish, 1985).

A tenacidade à fratura pode ser sensível a uma série de fatores tais como: composição química, tratamento térmico, meio ambiente e temperatura. O objetivo desse trabalho é investigar o efeito do ambiente corrosivo na propagação de trinca por fadiga na liga de Al 7050 T7451. O meio corrosivo corresponde a uma solução aquosa salina (3,5 wt% NaCl) e os resultados obtidos são comparados com aqueles realizados ao ar. O comportamento em fadiga do material, em ambos os casos, será representado pela equação de Paris-Erdogan, com especial interesse no estágio II de crescimento de trinca, empregando-se o programa de computador RPCA para o cálculo dos parâmetros da equação proposta (Pastoukhov, 1995). Como complementação, são feitas análises da superfície de fratura via MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura).

2. MATERIAL E MÉTODOS

O material a ser utilizado neste trabalho é a liga de alumínio 7050 na condição T7451. O primeiro passo foi confirmar a identificação da liga indexando os elementos da liga, através de uma análise química. Essa análise química foi realizada na FAENQUIL/DEMAR (Departamento de Engenharia de Materiais). A Tabela (1) apresenta a composição química em peso, do material adquirido, obtida por meio de ICP (*Inductively Coupled Plasma*), modelo ARL 3410 ICP.

Tabela 1 - Análise Química (wt. %)

Material	Zn	Cu	Mg	Fe	Mn	Ti	Cr	Ca	V	Ga	Zr
Al 7050	6.16	2.01	1.97	0.08	0.006	0.038	0.005	0.003	0.004	0.005	0.08

Procedimentos convencionais para a análise metalográfica visando a verificação da morfologia dos grãos, envolveu etapas de lixamento e polimento seqüenciais seguido de ataque eletrolítico (HBF4– 5,4 ml, H₂O destilada – 294,6 ml, tensão 20 V, 1,5 A, tempo 3 minutos). A Figura (1) mostra a morfologia dos grãos de acordo com a orientação estabelecida.

Todos os ensaios mecânicos foram executados em um equipamento servo-hidráulico MTS mod. 810.23M com capacidade de 250 kN. Foram obtidas propriedades do material através de tração uniaxial. Os corpos de prova de tração foram confeccionados com um diâmetro útil de 6 mm de acordo com a norma (ASTM E8M-97). O ensaio foi realizado com uma velocidade de 0,5 mm/min e para aquisição de dados de deformação utilizou-se o extensômetro modelo MTS 634.12F21 com comprimento inicial de 25 mm.

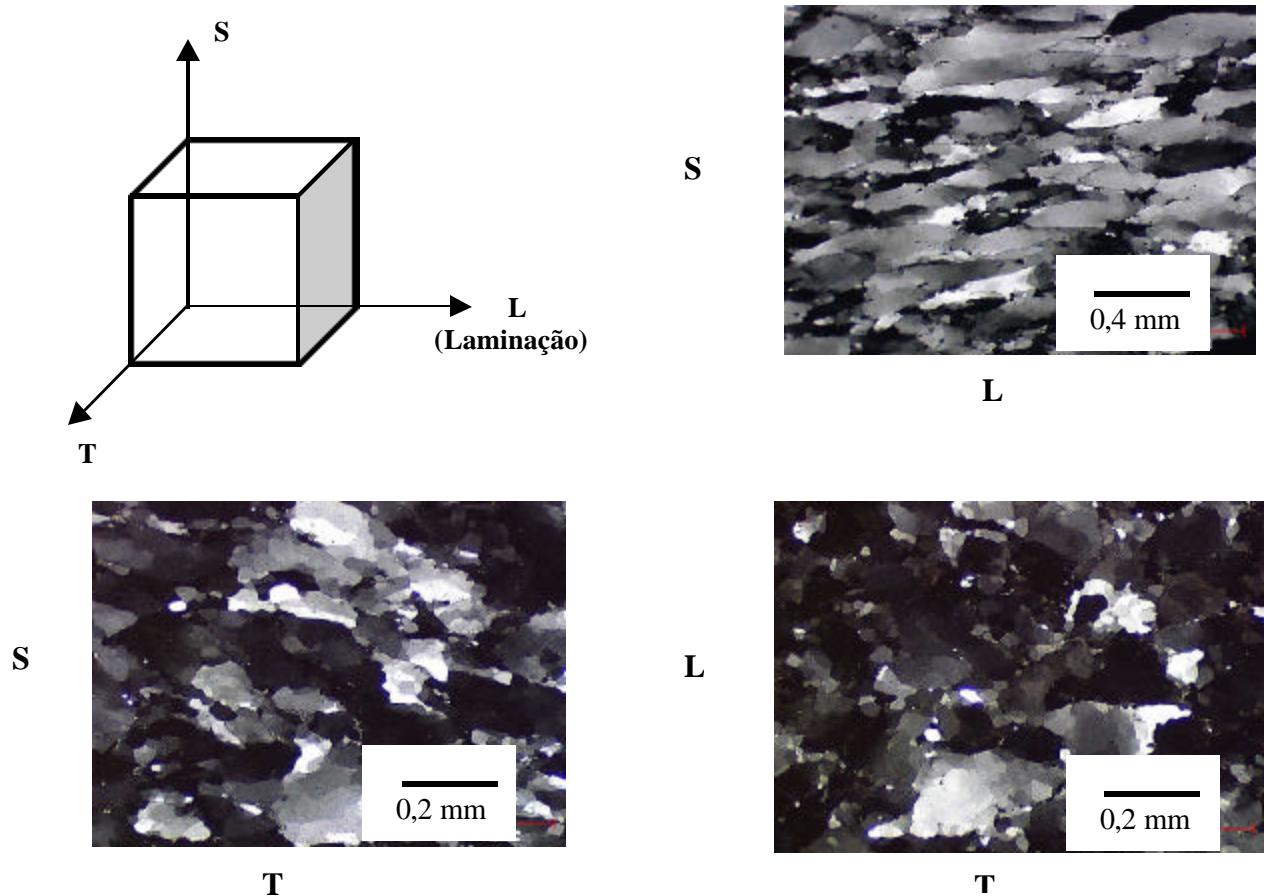


Figura 1. Microestruturas obtidas da liga 7050-T7451, aumento 100 x. Ataque eletrolítico: HBF4– 5,4 ml, H₂O destilada – 294,6 ml, tensão 20 V, 1,5 A, tempo 3 minutos.

O parâmetro de tenacidade à fratura K_{IC} foi obtido de acordo com a norma (ASTM E399-90), utilizando corpos de prova de padrão do tipo CT compacto, com espessura (B) de 25,40mm e 9,95mm e largura (W) de 50,8mm. Para realização destes ensaios foram utilizados corpos de prova com orientação TL conforme norma ASTM E399-90. Os ensaios de K_{IC} foram realizados e analisados com auxílio de um software específico da MTS 790.50. Na etapa de execução da pré-trinca, o comprimento da trinca foi medido pelo método da flexibilidade elástica (*compliance*), em que, o deslocamento da abertura da trinca foi medido por meio de um extensômetro MTS 632.12 F21. A pré-trinca do ensaio de K_{IC} foi feita de acordo com a norma (ASTM E647-95), com uma freqüência de 15 Hz e $R = 0,1$.

Nos ensaios de propagação de trinca por fadiga utilizou-se razão de carga, $R=0,1$ e corpos de prova do tipo CT compacto, com espessura (B) de 10 mm e largura (W) de 50,8mm. A obtenção da curva da d/dN versus ΔK foi traçada com auxílio de software específico MTS 790.40, que permite medir, via *compliance*, o comprimento da trinca, tudo com base e procedimentos de acordo com as

normas ASTM E399-90 e ASTM E647-95. Para medir o deslocamento da abertura na ponta da trinca foi utilizado um extensômetro modelo MTS 632.12 F21. A relação entre a taxa de propagação de trinca em termos da amplitude do fator intensidade de tensão é descrita pela equação de Paris como mostrado na Eq. (1), em que, C e n são constantes do material.

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

A taxa de crescimento de trinca por fadiga foi obtida utilizando os seguintes procedimentos: os dados da curva tamanho de trinca (a) versus número de ciclos (N), obtidos experimentalmente, foram introduzidos no programa de computador RPCA (Pastoukhov, 1995), e convertidos em taxa de propagação de trinca (da/dN) em função da amplitude do fator intensidade de tensão (ΔK) para a condição amplitude de carregamento constante; posteriormente, escolheu-se o trecho linear da curva referente ao estágio II que se ajusta melhor ao modelo de Paris (Eq. 1), em que, os parâmetros “C” e “n” são calculados automaticamente pelo método da regressão linear desses pontos experimentais. O ajuste ideal desses valores de “C” e “n” pode ser observado na linearização da curva (a) x (N) fornecida pelo programa.

Tendo em vista que a liga estudada encontra aplicação na indústria aeronáutica e sujeita a exposição em meios agressivos, achou-se conveniente, além da realização do teste de propagação de trinca por fadiga ao ar, realizá-lo em meio corrosivo (solução aquosa salina, 3,5 wt % NaCl). Para estes testes os corpos de prova utilizados foram pré-trincados ao ar com uma freqüência de 20 Hz e $R = 0,1$.

Células especiais em acrílico foram desenvolvidas com o propósito de que a solução aquosa pudesse circular pela região que englobasse tanto a pré-trinca quanto as regiões de propagação da trinca. O sistema é composto por duas dessas células colocadas em ambos os lados do CDP, de tal forma que o sistema não influenciasse na flexibilidade elástica do CDP. Uma melhor visualização desse sistema é mostrado na Fig. (2). Também fazem parte do sistema os seguintes equipamentos: reservatório de água salina, filtro e bomba d’água para manter a solução em circulação. A solução salina aquosa do reservatório manteve um pH constante de aproximadamente 7.0 durante o teste.



Figura 2. Foto da célula em acrílico montada no corpo de prova.

Foram realizadas análise fractográfica nos corpos de prova, dos ensaios de propagação de trinca por fadiga, através do Microscópio Eletrônico de Varredura LEO 1450 VP.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos ensaios de tração foram obtidos o módulo de elasticidade (E), limite de escoamento ($\sigma_{0,2}$), limite de resistência (σ_u), coeficiente de encruamento (n) e coeficiente de resistência (A). A Tabela (2) mostra os valores dos cálculos das propriedades mecânicas, em relação a média de três corpos ensaiados ao ar. Os resultados obtidos comprovam a alta resistência dessa liga de alumínio com uma característica de baixa capacidade de encruamento. Valores de K_{IC} para essa liga apresentados na literatura (ASM HANDBOOK,1990), situam-se numa faixa de valores mínimos entre 24,2 a 27,5 MPa \sqrt{m} e típicos entre 28 a 33 MPa \sqrt{m} .

Tabela 2- Propriedades mecânicas da liga de alumínio 7050 T7451.

E (GPa)	σ_e (MPa)	σ_u (MPa)	n	A (MPa)	K_{IC} (MPa \sqrt{m})
66	464	500	0,069	644	26,26

As Figuras (3) e (4), ilustram os pontos utilizados para o cálculo de “C” e “n” para cada condição de ensaio. O cálculo dos parâmetros “C” e “n” foram realizados a partir da linearização da curva tamanho de trinca (a) x número de ciclos (N).

A Tabela (3) ilustra os valores de “C” e “n” obtidos através da regressão linear para cada condição de ensaio, sendo que, em todos os ensaios foram utilizados: $P_{\text{máx}} = 2,85$ kN e $P_{\text{mín}} = 0,285$ kN.

Tabela 3 – Parâmetros de ajuste da equação de *Paris* para cada condição.

Meio	n	C
Ao ar	4,01	1,15 E-11
NaCl	2,58	1,66 E-09

Comparando os valores de C obtidos ao ar com os valores do meio corrosivo, percebe-se que tais valores para o meio corrosivo são maiores do que o obtido ao ar, o que implica numa taxa de propagação de trinca maior. No entanto, os valores obtidos para o n (coeficiente linear da reta) no meio ambiente são maiores, indicando que taxa de propagação de trinca sofre maior influência da variação da amplitude do fator intensidade ao ar. Isso implica que a taxa de propagação de trinca é menos sensível, a variação do fator intensidade de tensão, em meio corrosivo que ao ar. Os resultados mostram que o parâmetro C foi mais determinante em descrever a taxa de propagação de trinca dada a grande diferença encontrada entre os valores.

A Figura (5) mostra as curvas das taxas de propagação de trinca por fadiga ao ar e em meio corrosivo (NaCl). Observa-se que a taxa de crescimento é maior no meio corrosivo. Isso pode ser atribuído a formação de pites de corrosão que atuam como concentradores de tensão diminuindo a resistência do material na propagação da trinca. Por outro lado, o parâmetro n, que define a inclinação da reta do estágio de propagação de trinca constante foi menor no meio corrosivo. Isso implica que há uma diminuição da diferença entre as taxas de propagação de trinca para esses meios, com o aumento de ΔK . Esse comportamento pode ser observado na Fig. (5).

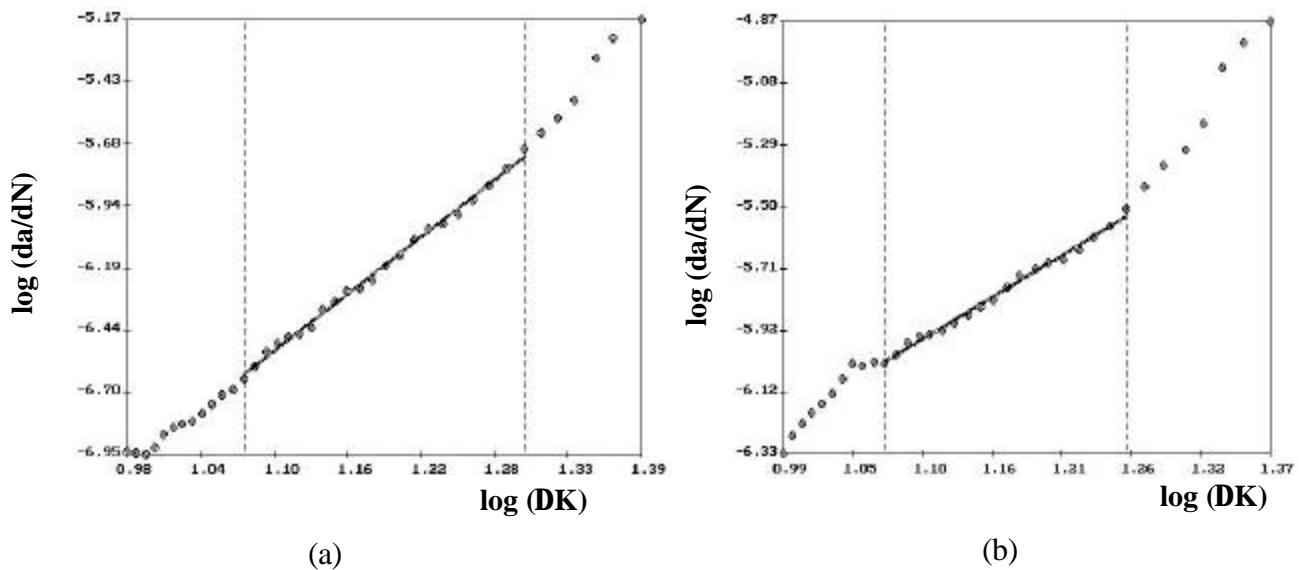


Figura 3. Região da curva $\log(\text{da/dN}) \times (\log \Delta K)$, usada no cálculo dos parâmetros “C” e “n” para o material testado: (a) ao ar; (b) NaCl.

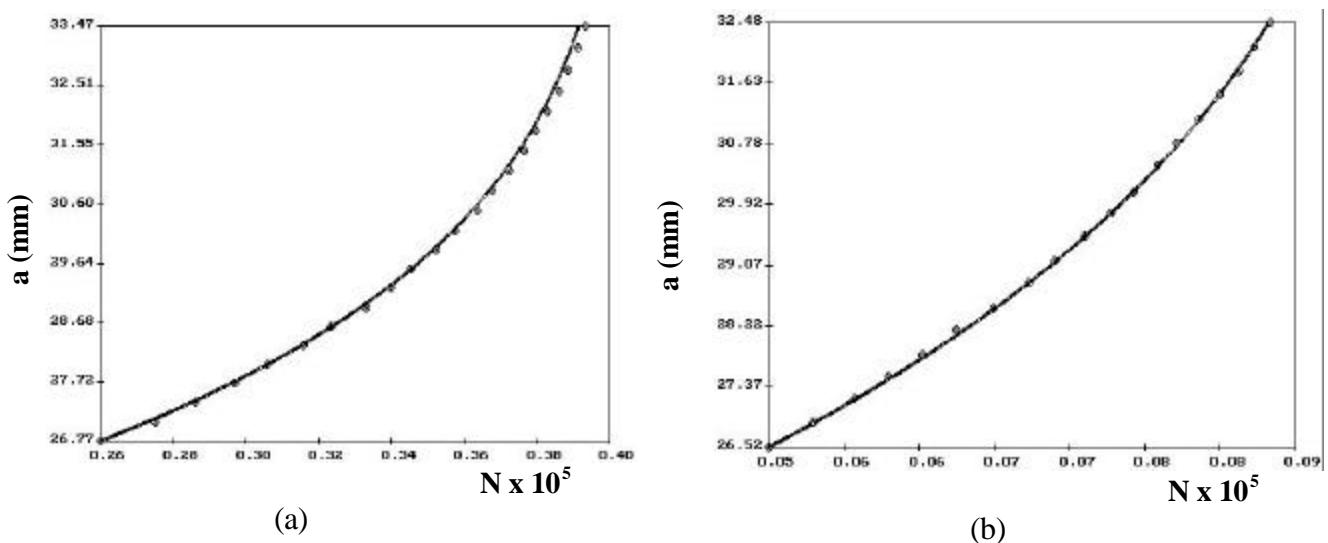


Figura 4. Ajuste dos dados experimentais do tamanho da trinca a (mm) x número de ciclos N ($\times 10^5$) pela Eq. 1 para o material testado: (a) ao ar; (b) NaCl.

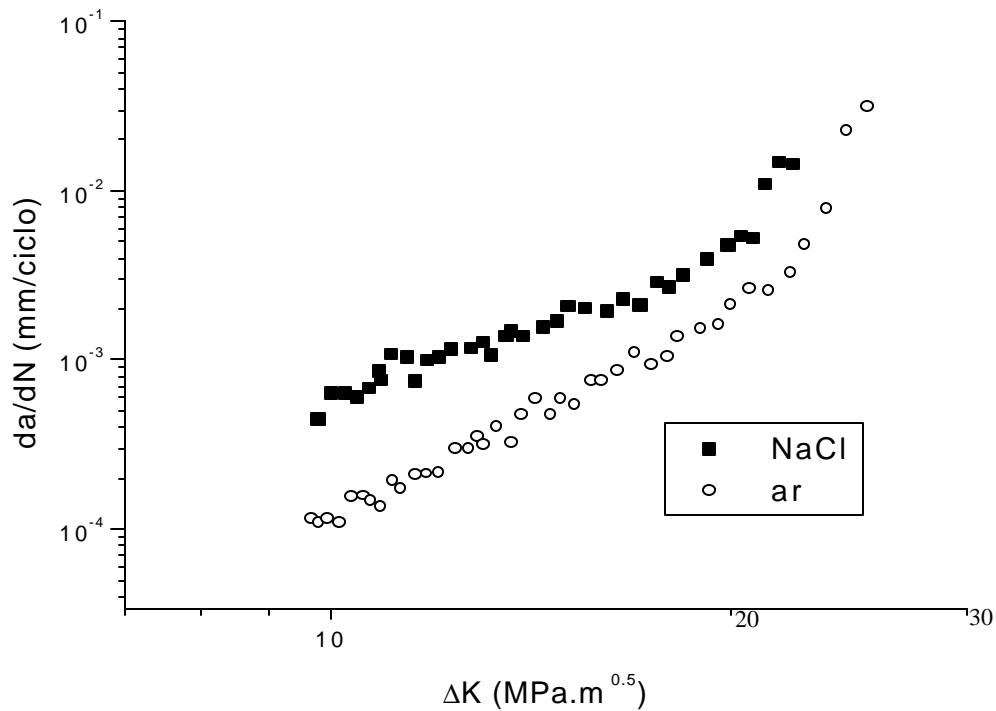


Figura 5. Comparação das curvas ((da/dN) versus ΔK) em meio corrosivo (NaCl) e ao ar.

4. ANÁLISE FRACTOGRÁFICA

Nas Figuras (6) e (7) são mostradas as superfícies de fratura do material testado ao ar. A Figura (6) apresenta uma superfície caracterizada pela formação e coalescência de microcavidades de dimensões variadas e de pouca profundidade. Observa-se ainda trincas secundárias e regiões de aparente fratura frágil. A Figura (7) apresenta estrias bem definidas de aspecto aparentemente frágil. A Figura (8) corresponde a superfície de fratura do material testado no meio corrosivo, e o aspecto geral das superfícies apresenta uma topografia mais irregular, em que prevalecem estrias de característica frágil com diferentes orientações.

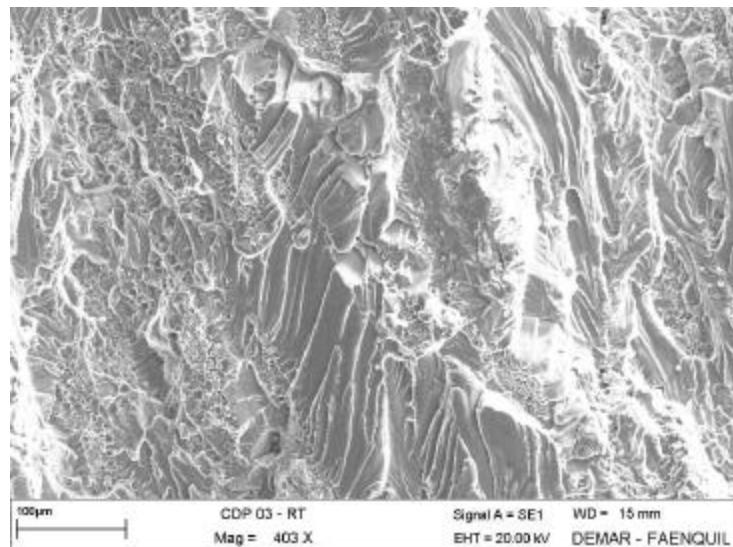


Figura 6. Superfície de fratura no ensaio de crescimento de trinca por fadiga ao ar.

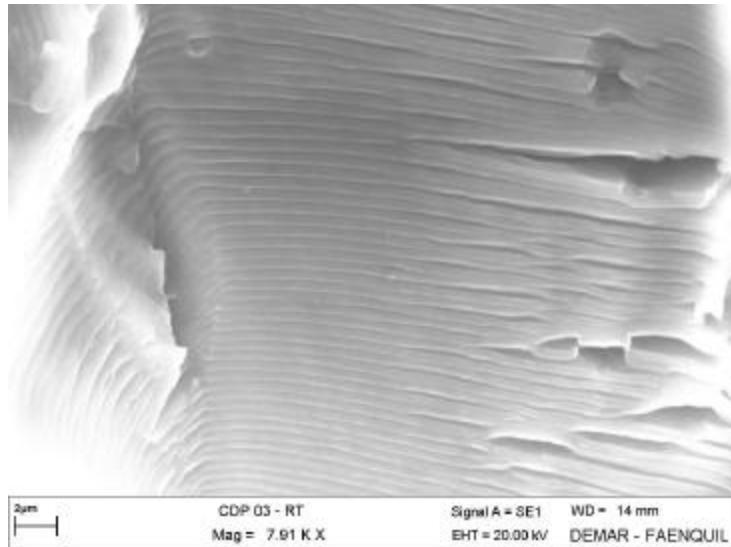


Figura 7. Estrias de fadiga na superfície de fratura do material testado ao ar.

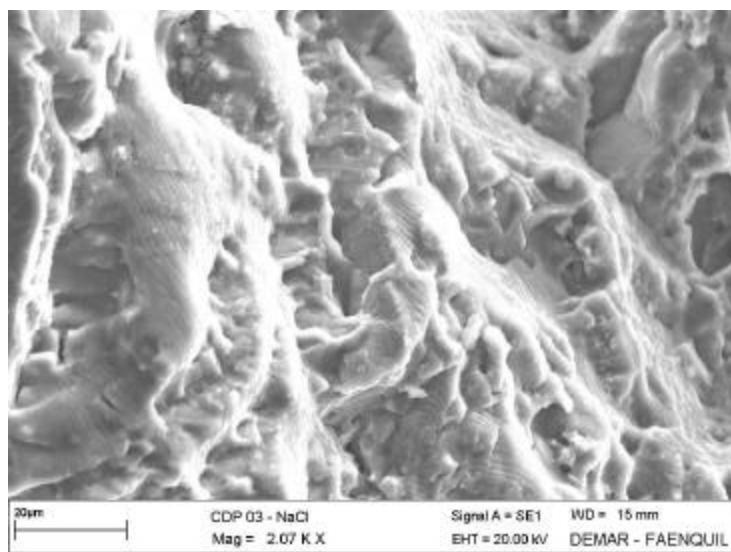


Figura 8. Superfície de fratura no ensaio de crescimento de trinca por fadiga em NaCl.

5. CONCLUSÕES

Pode-se observar no ensaio de propagação de trinca por fadiga que o valor de **C** obtido no ensaio realizado em meio ambiente é menor que aquele obtido no ensaio realizado em meio corrosivo, o que implica em menores taxas de propagação de trinca, ou seja, maior resistência a propagação das mesmas. Por outro lado, no ensaio realizado no meio corrosivo, o coeficiente **n** apresentou um valor menor que aquele obtido no ensaio em meio ambiente. Apesar de **C** e **n** apresentarem tendências contrárias, o maior valor de **C** em meio corrosivo acabou contribuindo para maiores taxas de propagação da trinca nessas condições.

As fractografias mostram que em ambos os casos (ensaio realizado ao ar e em meio corrosivo) as características de fratura são de estruturas mistas, ou seja, apresentam morfologia tipicamente frágil caracterizadas por estrias achatadas. Nas fractografias realizadas no material ensaiado ao ar observa-se como característica principal a estrutura alveolar, ao passo as amostras testadas em NaCl apresentam facetas de clivagem.

A influência do meio é menos significativa com o aumento de ΔK , ou seja, a diferença da taxa de propagação da trinca diminui com o aumento de ΔK .

Pode-se concluir, portanto, que a liga de alumínio 7050 apresenta características frágeis, cujo efeito é intensificado quando submetido a um meio corrosivo. Isso deve-se a presença dos pites que surgem do ataque corrosivo, que por sua vez agem como entalhes e causam a redução da resistência à fadiga e propriedades de fratura.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASM HANDBOOK, 1990, "Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials", USA Metal Handbook, Tenth Edition, v. 2.
- ASTM E399-90, 1990, "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", American Society for Testing and Material.
- ASTM E647-95, 1995, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", American Society for Testing and Material.
- ASTM E8M-97, 1997, "Standard Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]", American Society for Testing and Material, v.3.1.
- Bastian, F.L; Caminha JR.,H.M.; Moraes,M.M., 1987, Mecânica da Fratura, Rio de Janeiro: IBQN- Instituto Brasileiro da Qualidade Nuclear.
- Bresciani Filho, E., 1992, "Seleção de Metais Não-Ferrosos", Campinas: editora da Unicamp, p.25-42.
- Carvalho, A.L.M., 1999, "Comportamento Mecânico das Ligas de Alumínio 7010-T74 e 7050-T7451 de Aplicação Aeronáutica", Dissertação de Mestrado. Guaratinguetá: FEG – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.
- Chih-Kuang Lin and Sheng-Tseng Yang, 1998, "Corrosion Fatigue Behavior of 7050 Aluminum Alloys in Different Tempers", Engineering Fracture Mechanics, v.59, No 6, p.779-795.
- Kaufman,J.G; Moore,R.L. and Schilling,P.E, 1971, "Fracture Toughness of Structural Aluminum Alloys", Engineering Fracture Mechanics, v.2, p.197-210.
- Pastoukhov, V.A. e Baptista,CA.R.P.,1995, "Análise da Resistência à Propagação Subcrítica de Trincas sob Carregamento Cíclico", Anais do I Seminário de Mecânica da Fratura, Ouro Preto, Brasil, p.227-240.
- Satish, S. and Garg, S.B.L., 1985, "Crack Propagation Under Constant Amplitude Loading", Engineering Fracture Mechanics, v.21, N°1, p.1-30.
- Schra, L. and T'hart, W.G.J, 1983, "Engineering Property Comparisons of 7050-T73651,7010-T761 and 7010-T73651 Aluminum Alloy Plate", Engineering Fracture Mechanics, v.17, nº6, p.493-507.

EFFECT OF THE CORROSION ENVIRONMENT ON THE FATIGUE CRACK GROWTH RATE OF 7050 T7451 ALUMINUM ALLOY

Sergio Schneider

Faculdade de Engenharia de Lorena – FAENQUIL

Departamento de Engenharia de Materiais – DEMAR, Polo Urbo Industrial – Gleba AI6, Mondesir – Lorena, SP – C.P. 116 – CEP 12600-000 - sergiosch@demar.faenquil.br

Ana Cristina Mendes da Silva

Faculdade de Engenharia de Lorena – FAENQUIL

Departamento de Engenharia de Materiais – DEMAR, Polo Urbo Industrial – Gleba AI6, Mondesir – Lorena, SP – C.P. 116 – CEP 12600-000

Sandra Giacomin Schneider

Faculdade de Engenharia de Lorena – FAENQUIL

Departamento de Engenharia de Materiais – DEMAR, Polo Urbo Industrial – Gleba AI6, Mondesir – Lorena, SP – C.P. 116 – CEP 12600-000 - sandra@demar.faenquil.br

Miguel Justino Ribeiro Barboza

Faculdade de Engenharia de Lorena – FAENQUIL

Departamento de Engenharia de Materiais – DEMAR, Polo Urbo Industrial – Gleba AI6, Mondesir – Lorena, SP – C.P. 116 – CEP 12600-000 - mbarbosa@demar.faenquil.br

Abstract. In this present work, the Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) concepts are used to described the effect of the corrosion environment on the fatigue crack growth rate of 7050-T7451 aluminum alloys. The corrosion environment is the sodium chloride solution on the 3,5wt% NaCl and the results are compared with the some material tested in air. Fatigue crack growth (FCG) tests were performed on the compact tension (CT) specimens. In both cases, the FCG tests were expressed by the Paris-Erdogan equation with particular interest in the stage II. The computer program RPCA (Research on Fatigue Crack Propagation Under Constant Amplitude Load) was used to determine the da/dN - ΔK relationship. Additional analyze is performed by Scanning Electron Microscope (SEM) to investigate the main characteristics of the fracture surfaces.

Keywords: mechanical properties; fracture mechanics; fatigue; aluminum alloys