

Caracterização do Fechamento de Trinca de Fadiga numa Liga Al 7475 Pré-deformada e com Shot Peening

T.G.VIANA¹, L.B.GODEFROID¹, E.K.L.BARROSO², K.S.AL-RUBAIE²

¹ REDEMAT - Universidade Federal de Ouro Preto.

Praça Tiradentes, 20 – CEP 35400-000 – Ouro Preto, MG, Brasil

e-mail: leonardo@demet.em.ufop.br

² EMBRAER, São José dos Campos, SP, Brasil

e-mail: kassim.rubaie@embraer.com.br, emerson.barroso@embraer.com.br

RESUMO

No presente trabalho procurou-se verificar o efeito de estiramento em tração e de tratamento mecânico superficial de *shot peening* na resistência à propagação de trinca de fadiga de uma liga de alumínio do tipo Al 7475-T7351. Trata-se de uma liga Al-Zn-Mg-Cu, com tratamento térmico de superenvelhecimento, para emprego aeronáutico. Corpos-de-prova do tipo C(T) foram confeccionados no sentido longitudinal de conformação mecânica, e posteriormente ensaiados de acordo com a Norma ASTM E 647, para a determinação da taxa de propagação de trinca da/dN em função da força motriz ΔK de propagação de trinca de fadiga, desde o limiar de propagação até a fratura. Os ensaios foram realizados para R (razão entre tensões) igual a 0,1 e 0,5. A espessura dos corpos-de-prova foi de 5 mm. O efeito do estiramento foi estudado em corpos-de-prova com 0%, 3% e 5% de deformação plástica. O efeito de *shot peening* foi estudado em corpos-de-prova com e sem este tratamento superficial. A resistência à propagação de trinca de fadiga diminuiu com o aumento do estiramento, mas pode ser melhorada através do *shot peening*. Quanto maior o valor de R, maior a taxa de propagação de trinca. Todos estes efeitos foram estudados e explicados a partir da determinação da variação da carga de fechamento de trinca em função da força motriz ΔK , assim como através de análise fratógráfica.

Palavras chaves: Al 7475-T7351, fechamento de trinca de fadiga, fechamento de trinca.

Crack Closure Characterization in a 7475 Aluminum Alloy Prestrained and With Shot Peening

ABSTRACT

Aluminum alloys are widely used in aeronautical design due to their good mechanical properties and low densities. Among these alloys, 7475 (Al-Zn-Mg-Cu), modified from 7075, is successfully used due to strength similar to that of 7075 and superior fracture toughness. In this study, strips of 7475-T7351 (overaged) were subjected to two tensile pre-strain levels of 3% and 5%, and surface treatment of shot peening. Using compact tension C(T) specimens with 5 mm thickness, fatigue crack growth (FCG) tests were conducted in air under constant amplitude loading at a stress ratio of 0.1 and 0.5, with specific emphasis at the fatigue threshold. The results showed that FCG resistance decreased with an increase in the pre-strain level, but increased with shot peening. Fatigue crack closure and fractographic analysis were used to explain the different behavior.

Keywords: Al 7475-T7351, fatigue crack growth, crack closure.

1 INTRODUÇÃO

A EMBRAER – Empresa Brasileira de Aeronáutica, considerada a quarta maior empresa de aviação civil no mundo, se preocupa constantemente com o estudo e conhecimento das ligas de alumínio empregadas em seus projetos. A empresa se destaca mundialmente pela qualidade de seus produtos, tanto em nível tecnológico quanto em nível de projeto, o que, através da aplicação de materiais de elevado desempenho, possibilita desenvolver aeronaves com ótima resistência à fadiga e tenacidade à fratura. Para isso, além de projetistas e do desenvolvimento de um plano de manutenção efetivo e de baixo custo, ela conta com um

departamento de engenharia de materiais, que é responsável pelo estudo e caracterização das ligas de alumínio aplicadas em seus projetos, visando verificar e assegurar a qualidade de suas ligas.

As ligas de alumínio são aplicadas em cerca de 70% dos componentes estruturais dos aviões, sendo que as ligas da família 2XXX e 7XXX, tratadas termicamente por precipitação, são as mais largamente utilizadas e que merecem maior destaque. Destas, as ligas de alumínio da família 7XXX são empregadas em uma série de aplicações, como nos revestimentos da fuselagem e asas, cavernas usinadas e conformadas, longarinas, nervuras, diversos perfis estruturais, reforçadores, etc. Assim pode-se perceber o quanto é importante o estudo destas ligas de alumínio e um melhor domínio das propriedades, visando aplicações mais adequadas aos requisitos. Neste sentido, o estudo da liga Al 7475-T7351, largamente aplicada nos projetos da EMBRAER, passou a ser mais discutido, visando conhecer melhor as características e comportamento do material sob diferentes aspectos, os quais são importantes no desenvolvimento de ligas para aplicação aeronáutica.

O estiramento é um método de conformação mecânica tradicional entre as ligas de alumínio, utilizado visando a melhoria de suas propriedades mecânicas [1]. Ele pode ser realizado a quente ou a frio, e pode ocorrer antes, durante ou após o tratamento térmico de envelhecimento por precipitação. Após o estiramento, as ligas devem apresentar uma subestrutura de discordâncias e uma distribuição de precipitados mais homogêneos [2, 3], melhorando a resistência em tração e em fadiga. Por outro lado, sabe-se [4-6] que a tenacidade à fratura varia inversamente com a resistência mecânica em tração, e diminui com a aplicação do estiramento.

O tratamento superficial de *shot peening* é um método conhecido na metalurgia para melhorar as propriedades mecânicas de um material, e tem despertado grande interesse dos pesquisadores nos últimos anos [7-22]. Trata-se de um processo de trabalho a frio, no qual a superfície do material é bombardeada com pequenas esferas, e deformada plasticamente. Com isto, introduz-se um campo de tensões compressivas no material e aumenta-se tanto a tenacidade à fratura como a resistência à iniciação e propagação de trincas de fadiga.

Nas duas últimas décadas o fenômeno de fechamento de trinca, introduzido originalmente por Elber [23], tem sido investigado para a maioria dos materiais de engenharia (por exemplo, metais, cerâmicos, polímeros, compósitos, concreto, osso humano, etc.), tendo em vista o reconhecimento de que se trata de um importante fenômeno que influencia o comportamento em fadiga dos materiais. Recentemente, diversos mecanismos distintos de fechamento de trinca foram considerados [24], dentre os quais o fechamento de trinca induzido por rugosidade/oxidação e por deflexão da trinca, que se manifestam em muitos materiais metálicos, têm sido usados para explicar o crescimento de trinca de fadiga na região do limiar ΔK_{th} , isto é, para valores da taxa de crescimento de trinca relativamente baixos. Considera-se a hipótese que durante o ciclo de fadiga o crescimento de trinca na forma de “zig-zag” e/ou o depósito de uma fina camada de óxido fazem com que as faces opostas da trinca entrem em contato antes que o carregamento atinja o valor mínimo do ciclo. A resultante re-distribuição de tensões na ponta da trinca levaria a uma redução na força motriz disponível para o crescimento da trinca. Considera-se também que a deflexão da trinca provoca uma decomposição do modo I de carregamento (abertura), com o aparecimento do modo II de carregamento (cisalhamento), com consequente diminuição da força motriz para o crescimento da trinca.

O nível de fechamento de trinca é afetado pelas influências concorrentes e competitivas de diversos fatores [25], como a microestrutura do material, a geometria do corpo de prova, a geometria da ponta da trinca, o tamanho da trinca, condições de carregamento (máxima intensidade de tensões, razão R entre tensões, variação na amplitude de carregamento), e condições do teste (ambiente e temperatura).

O presente trabalho estuda o desempenho em fadiga de uma liga de alumínio Al 7475-T7351 superenvelhecida, em função de diferentes níveis de estiramento e em função do tratamento superficial de *shot peening*, para dois níveis de razão R entre tensões. Estuda-se a resistência ao crescimento de trinca de fadiga, principalmente na região do limiar ΔK_{th} . O fechamento de trinca é utilizado para explicar a diferença de comportamento entre os materiais, com comprovação a partir de análise fratógráfica.

2 MATERIAL E METODOLOGIA

O material estudado neste trabalho foi uma liga de alumínio Al-Zn-Mg-Cu, do tipo Al 7475-T7351, tratada termicamente por precipitação, no nível de superenvelhecimento. A composição química desta liga está apresentada na Tabela I. Nota-se os teores bem baixos das impurezas ferro e silício, no sentido de se minimizar a formação de inclusões. A presença de cromo possibilita a formação de dispersóides inibidores de recristalização durante a conformação mecânica e tratamento térmico industrial da liga.

Tabela 1: Composição química da liga de alumínio Al 7475 (% em peso).

Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
Al 7475	0,029	0,085	1,661	0,01	2,376	5,722	0,21	0,0266	balanço

A Tabela 2 apresenta as principais propriedades mecânicas obtidas dos ensaios de tração, inclusive com o efeito do estiramento. Observa-se que, à medida que se aumenta o estiramento, a resistência mecânica da liga vai aumentando. As propriedades mecânicas obtidas estão de acordo com as especificações para esta liga [26].

Tabela 2: Propriedades mecânicas em tração da liga de alumínio Al 7475.

Liga	Situação	σ_{ys} (MPa)	σ_{uts} (MPa)	ϵ_t (%)	E (MPa)	ν
Al 7475	entrega	391	471	12,11	71000	0,33
	3%	412	497	9,82		
	5%	416	501	8,82		

σ_{ys} : limite de escoamento; σ_{uts} : limite de resistência; ϵ_t : deformação total; E: módulo de elasticidade; ν : coeficiente de Poisson; entrega: material no estado de entrega; 3% : material estirado a 3%; 5% : material estirado a 5%.

Os corpos-de-prova foram confeccionados na EMBRAER, de acordo com a norma ASTM 647 [27] para ensaios de propagação de trinca de fadiga. Os corpos-de-prova utilizados para os ensaios foram do tipo C(T), na orientação L-T, com uma espessura de 5 mm e uma largura de 80 mm. O estiramento foi realizado em uma estiradeira de conformação de chapas, sendo escolhidos os valores de 3% e 5% de deformação plástica.

O tratamento superficial mecânico de *shot peening* foi realizado apenas para a amostra de 3% de estiramento. Esta etapa foi realizada de acordo com a norma SAE AMS-S-13165 [28], para promover uma intensidade de *shot peening* de 0,006 A – 0,010 A. A região tratada compreendeu 5 mm para cada lado, a partir da linha central do corpo-de-prova, em toda sua extensão.

De posse dos corpos-de-prova, foram realizados os seguintes procedimentos, com os ensaios sendo feitos à temperatura ambiente: metalografia, ensaios de propagação de trinca de fadiga, fratografia.

A metalografia foi realizada em um microscópio ótico, marca LEICA, com analisador de imagens QWIN. O reativo químico utilizado foi o tradicional Keller.

Os ensaios de fadiga foram realizados numa máquina servo-hidráulica MTS de 10 ton, com controle computacional, e aquisição de dados de tamanho de trinca por *clip-gage*. Os ensaios de fadiga foram realizados com dois valores para a razão R entre tensões da ciclagem: 0,1 e 0,5, sempre numa frequência de 30 Hz. A Figura 1 ilustra a montagem de um corpo-de-prova na máquina de ensaios.

A fratografia foi realizada em um microscópio eletrônico de varredura - MEV, modelo JEOL JSM 5510.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A microestrutura da liga estudada apresentou grãos basicamente alongados, com um pequeno grau de recristalização. Esta microestrutura é proveniente do tratamento térmico de precipitação, na etapa de superenvelhecimento, e conformada mecanicamente. Não foi detectada variação microestrutural significativa em função do estiramento ou do *shot peening*. A Figura 2 apresenta um exemplo desta microestrutura, para 3% de estiramento.

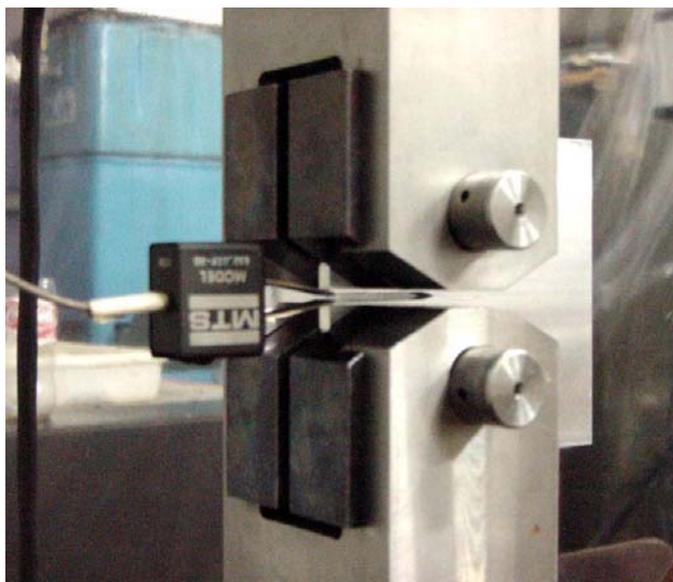


Figura 1: Montagem de um corpo-de-prova para ensaios de fadiga na máquina.



Figura 2: Microestrutura da liga Al 7475-T7351, 3% de estiramento. Ataque Keller. 200X.

As Figuras 3 e 4 apresentam o gráfico de taxa de propagação de trinca da/dN versus fator cíclico de intensidade de tensões ΔK , para cada uma das condições estudadas, tomando-se R ($= \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$) igual a 0,1 e 0,5. Observa-se que a resistência à propagação de trinca da liga de alumínio diminui à medida que se aumenta o estiramento, sendo este efeito mais pronunciado para a região do limiar ΔK_{TH} de propagação de trinca. Por outro lado, o tratamento superficial de *shot peening* (SP) melhora o desempenho da liga, e mais uma vez este efeito é mais pronunciado na região do limiar ΔK_{TH} de propagação de trinca.

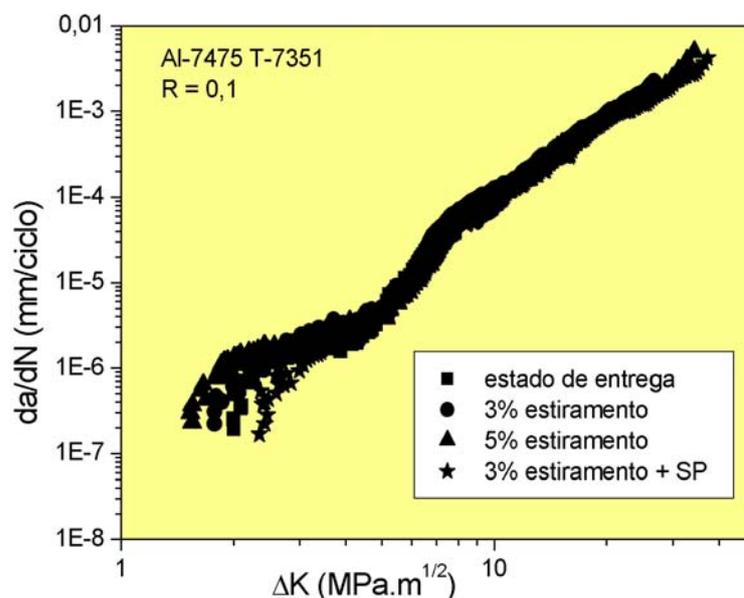


Figura 3: Propagação de trinca de fadiga, todas as condições, R=0,1.

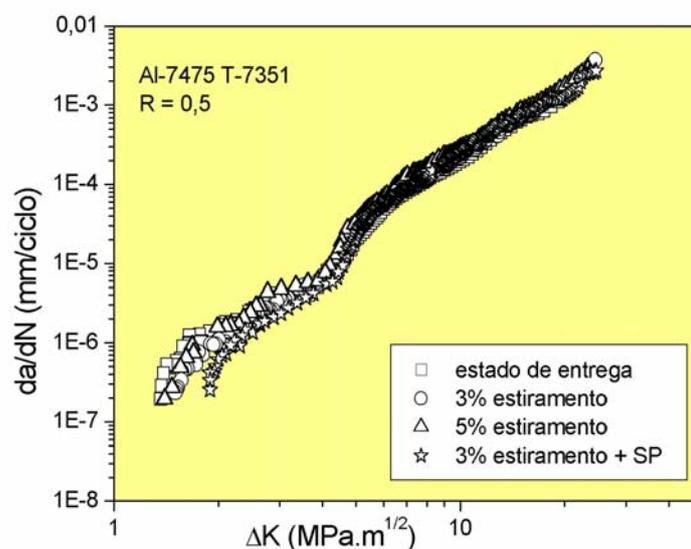


Figura 4: Propagação de trinca de fadiga, todas as condições, R=0,5.

A análise fractográfica dos corpos-de-prova de propagação de trinca de fadiga mostrou um comportamento distinto entre a região próxima do limiar ΔK_{TH} e a transição entre a região do limiar e a região linear de propagação de trinca. Na região do limiar ΔK_{TH} a propagação de trinca é cristalográfica. Neste caso, como os grãos do material se apresentam de forma alongada, a superfície de fratura correspondente vai também apresentar platôs alongados. A propagação de trinca se dá de forma semelhante a um arranjo tipo divisor de trinca de um material compósito. A Figura 5(a) ilustra esta situação, para a condição no estado de entrega, com $R = 0,1$. Já na região de transição a propagação de trinca se apresenta de forma mais plana. Neste caso, a superfície de fratura também será mais plana, com o aparecimento das tradicionais estrias de fadiga e mostrando bifurcações. Todas as condições estudadas neste trabalho mostraram estas características. A única diferença significativa encontra-se na amostra que foi submetida ao tratamento superficial de *shot peening*. Neste caso, percebe-se em toda a extensão da trinca uma diferença de morfologia de fratura entre as superfícies e o centro do corpo-de-prova. O tratamento de *shot peening*

provocou uma mudança no mecanismo de fratura do material, mudança esta que serviu para dificultar a propagação de trinca. Esta constatação reforça os resultados encontrados no gráfico apresentado anteriormente, e a conclusão de que esta condição é mais resistente à propagação de trinca. A Figura 5(b) ilustra esta situação, para a condição no estado de entrega, com $R = 0,1$.

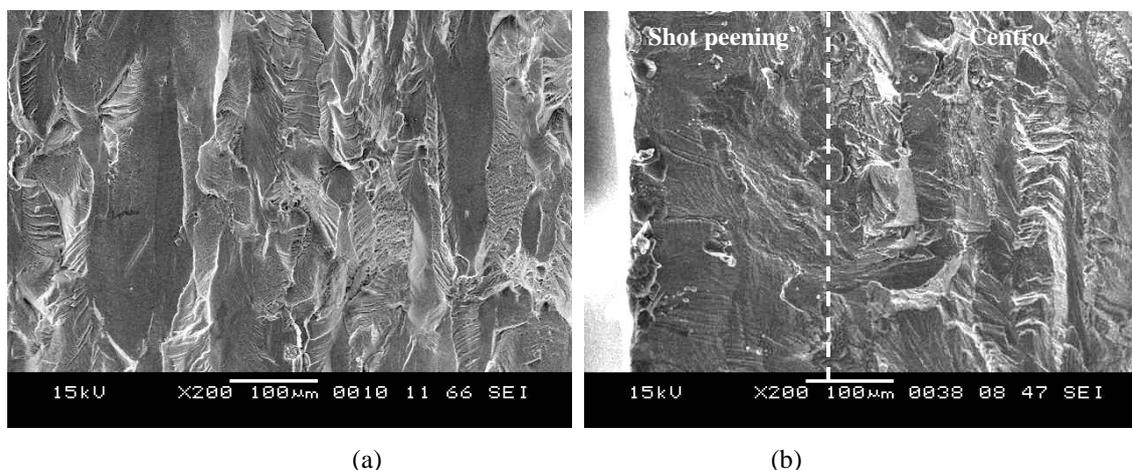


Figura 5: Superfície de fratura, liga Al 7475-T7351, ensaio de propagação de trinca de fadiga, $R = 0,1$, região próxima ao limiar ΔK_{TH} no gráfico $da/dN \times \Delta K$. (a) estado de entrega; (b) 3% estirado + shot peening. Aumento 200X.

Todo este comportamento está relacionado com o fenômeno de fechamento de trinca. Na região de ΔK_{TH} o material estirado 3% e tratado superficialmente vai apresentar uma trinca que se propaga de forma tortuosa, e que está sob a ação de um campo de tensões compressivas. Para as outras situações tem-se somente a propagação tortuosa da trinca. Daí, o nível de fechamento de trinca tornar-se maior para a primeira situação, diminuindo para as outras situações. A Figura 6 mostra ajustes por regressão linear da variação do fechamento de trinca para todas as situações estudadas, na região de ΔK_{TH} . Observa-se que o material estirado e tratado por “shot peening” apresenta os maiores valores para a relação K_{cl}/K_{max} .

O efeito da razão R no comportamento da liga de alumínio foi mais pronunciado na região do limiar ΔK_{TH} de propagação de trinca. A Figura 7 ilustra esta dependência para todas as condições estudadas. Para um mesmo valor de ΔK , quanto maior o valor de R , menor o valor do limiar, já que a ciclagem está sendo realizada em um nível de K_{max} mais elevado. Conseqüentemente, o fechamento de trinca será menor. O efeito de fechamento de trinca está apresentado na Figura 8, a partir de ajustes por regressão linear, para a condição de 3% de estiramento mais *shot peening*. Observa-se na região de ΔK_{TH} que o fechamento de trinca é mais pronunciado para o ensaio com $R = 0,1$.

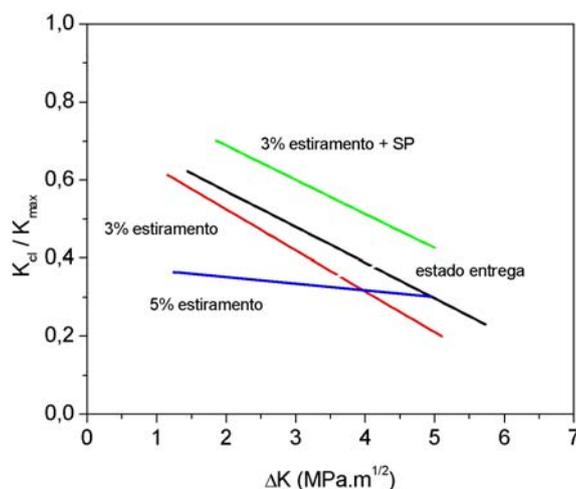


Figura 6: Fechamento de trinca para todas as situações estudadas. $R = 0,1$.

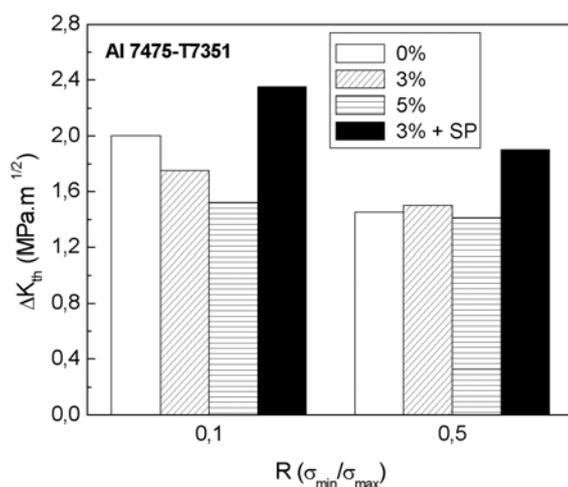


Figura 7: Efeito da razão R no limiar ΔK_{TH} , diversas condições.

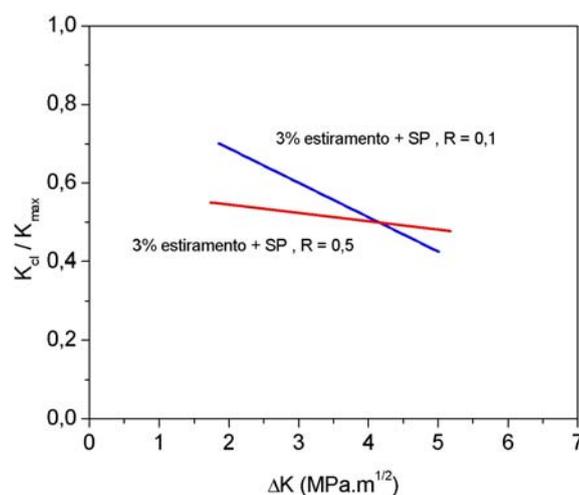


Figura 8: Fechamento de trinca para a situação de 3% de estiramento e “shot peening”. Efeito da razão R.

4 CONCLUSÕES

- 1) A liga de alumínio Al 7475-T7351 apresentou uma microestrutura constituída de grãos basicamente alongados, com um pequeno grau de recristalização.
- 2) Não foi detectada variação microestrutural significativa em função do estiramento ou do *shot peening*.
- 3) A resistência à propagação de trinca de fadiga da liga de alumínio diminuiu à medida que se aumentou o valor da razão R entre tensões, qualquer que seja a condição da liga. Este efeito foi significativo principalmente na região do limiar ΔK_{TH} de propagação de trinca.
- 4) Observou-se que a resistência à propagação de trinca de fadiga da liga de alumínio diminuiu à medida que se aumentou o estiramento. Por outro lado, o tratamento superficial de *shot peening* melhorou o desempenho da liga. A diferença de comportamento ocorreu de forma significativa apenas na região do limiar ΔK_{TH} .
- 5) Na região do limiar ΔK_{TH} a superfície de fratura apresentou platôs alongados. Na região de transição a superfície de fratura foi mais plana, com o aparecimento de estrias de fadiga e bifurcações. Na amostra que foi submetida ao tratamento superficial de *shot peening* percebe-se em toda a extensão da trinca uma diferença de morfologia de fratura entre as superfícies e o centro do corpo-de-prova.
- 6) Todas as conclusões relativas à propagação de trinca de fadiga podem ser explicadas em função do nível de fechamento de trinca atuante.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] OSTERMANN, F.G., REIMANN, W.H., “Thermomechanical Processing and Fatigue of Aluminum Alloys”, *ASTM-STP 467*, pp.169-187, 1970.
- [2] OSTERMANN, F.G., “Improved Fatigue Resistance of Al-Zn-Mg-Cu (7075) Alloys Through Thermomechanical Processing”, *Met. Trans.*, v. 2A, pp. 2897-2909, 1971.
- [3] RUSSO, E.D., CONSERVA, M., GATTO, F., MARKUS, H., “Thermomechanical Treatments on High Strength Al-Zn-Mg (-Cu) Alloys”, *Met. Trans.*, v. 4A, pp. 1133-1145, 1973.
- [4] LIAW, P.K., LANDES, J.D., “Effects of Monotonic and Cyclic Prestrain on Fracture Toughness: A Summary”, *ASTM-STP 945*, pp.622-646, 1988
- [5] BAR-ON, I., TULER, F.R., HOWERTON, W.M., “Effect of Prestrain on the J-Resistance Curve of HY-100 Steel”, *ASTM-STP 995*, pp. 244-258, 1989
- [6] CASSADA, W.A., “The Influence of Natural Aging and Plastic Deformation on Mechanical Properties in Na Al-4Cu-1.4Mg-0.4Mn Alloy”, *Proc. 3rd Intl. Conference Aluminum Alloys*, SINTEF, v.1, pp.243-248, 1992
- [7] LEADBEATER, G., NOBLE, B., WATERHOUSE, R.B., “The Fatigue of an Aluminium Alloy Produced by Fretting on a Shot Peened Surface”, *Proc. of the ICF6*, Pergamon Press, pp. 2125-2132, 1984
- [8] MUTOH, Y., FAIR, G., NOBLE, B., WATERHOUSE R.B., “The Effect of Residual Stresses Induced by Shot Peening on Fatigue Crack Propagation in Two High Strength Aluminum Alloys”, *Fat. Fract. Mater. Engng. Struct.*, v. 10, pp. 261-272, 1987.
- [9] BIGNONNET, A., “Fatigue Strength of Shot Peened Grade 35NCD16 Steel Variation of Residual Stresses Introduced by Shot Peening According to Type of Loading”, *Proc. 3rd Intl. Conference on Shot Peening*, pp. 659-666, 1987.
- [10] KOPSOV, I.E., “The Influence of Hammer Peening on Fatigue in High-Strength Steel”, *Int. J.Fat.*, v. 13, pp. 479-482, 1991.
- [11] SHAW, W.J.D., ZHU, X.Y., DERRY, R., “Fatigue Crack Propagation Rates as Affected by Various Conditions of Surface Residual Stress”, *Proc. 5th Intl. Fatigue Conference*, Pergamon Press, pp. 699-705, 1993.
- [12] LLOYD, J.R.T., *Proc. 5th Intl. Fatigue Conference*, Pergamon Press, pp. 589-595, 1993.
- [13] SHARP, P.K., CLAYTON, J.Q., CLARK, G., “The Effect of Peening 7050-T7451 Aluminum alloy on Fatigue Life”, *Fat. Fract. Mater. Engng. Struct.*, v. 17, pp. 243-252, 1994.
- [14] RIOS, E.R., WALLEY, A., MILAN, M.T., HAMMERSLEY, G., “Fatigue Crack Initiation and Propagation on Shot-peened Surfaces in A316 Stainless Steel”, *Int. J.Fat.*, v. 17, pp. 493-499, 1995.
- [15] FARRAHI, G.H., LEBRUN, J.L., COURATIN, D., “Effect of Shot Peening on Residual Stress and Fatigue Life of a Spring Steel”, *Fat. Fract. Mater. Engng. Struct.*, 18, pp. 211-220, 1995.
- [16] ZHU, X.Y., SHAW, W.J.D., “Correlation of Fatigue Crack Growth Behavior with Crack Closure in Peened Specimens”, *Fat. Fract. Mater. Engng. Struct.*, v. 18, pp. 811-820, 1995.
- [17] DORR, T., WAGNER, L., “S-N behavior of prefatigued 2024 Al: Effects of Surface Crack Length and Shot Peening”, *Proc. 6th Intl. Fatigue Conference*, Pergamon Press, pp. 1391-1396, 1996.
- [18] SHARP, P.K., CLARK, G., “The Effect of Peening on the Fatigue Life of Aluminium Alloys”, *Proc. of the ICF9*, Pergamon Press, pp. 1491-1499, 1997.

- [19] SONG, P.S., WEN, C.C., “Crack Closure and Crack Growth Behavior in Shot Peened Fatigued Specimen”, *Engng. Fract. Mech.*, v. 63, pp. 295-304, 1999.
- [20] LIU, Q., BARTER, A., BABURAMANI, P., SHARP, P.K., CLARK, G., “Use of Surface Treatment Life Extension Methods for Aircraft Components”, *Proc. of the ICF10*, Pergamon Press, 2001, CD-ROM.
- [21] MASAKI, K., OCHI, Y., MATSUMURA, T., “Estimation of High Cycle Fatigue Limit of Hard Shot Penned Austenitic Stainless Steel”, *Proc. of the ICF10*, Pergamon Press, 2001, CD-ROM
- [22] QUAN, G., BROCKS, W., “Fatigue Behaviour of Cold Worked Al₂O₃/Al6061 with Different Surface Treatment”, *Proc. 8th Intl. Fatigue Conference*, EMAS, pp. 1475-1482, 2002.
- [23] ELBER, W., “Fatigue Crack Closure Under Cyclic Tension”, *Eng. Fract. Mech.*, v. 2, pp. 37-45, 1970.
- [24] SURESH, S., RITCHIE, R.O., “Near-threshold Fatigue Crack Propagation: A Perspective on The Role of Crack Closure”, *Fatigue Crack Growth Threshold Concepts*, AIME, pp. 227-261, 1984.
- [25] ALLISON, J.E., “The Measurement of Crack Closure During Fatigue Crack Growth”, *Fracture Mechanics – Eighteenth Symposium, ASTM-STP 945*, ASTM, pp. 913-933, 1988.
- [26] CIESLAK, S.J., MEHR, P.L., “Alcoa 7475 Sheet and Plate”, *Alcoa Green Letter*, 4th Revised Edition, 1985.
- [27] ASTM E-647-01, “Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates”, *2001 Annual Book of ASTM Standards*.
- [28] SAE AMS-S-13165, “Shot Peening of Metal Parts”, *1998 SAE Standards*.