ESTUDO DO COMPORTAMENTO EM FADIGA POR *FRETTING* DA LIGA DE Al 7050-T7451 [1]

Luciana Sgarbi Rossino [2]
Marcos Dorigão Manfrinato [3]
Luiz Homero Lopes Martins [4]
Allisson Ribeiro [4]
José Alexander Araújo [5]
Waldek Wladimir Bose Filho [6]

Resumo

Para o estudo do comportamento em fadiga por *fretting* da liga de alumínio 7050-T7451, foi utilizado um dispositivo que permitiu realizar ensaios de modo que as cargas de contato fossem controladas e medidas. As cargas de contato e a tensão alternada de fadiga foram mantidas constantes para todos os ensaios realizados, variando apenas a tensão média aplicada. Este tipo de consideração permitiu observar, com a constância da amplitude de tensão cisalhante no plano crítico e com a variação na tensão máxima normal obtida, o efeito das cargas envolvidas no fenômeno da fadiga por *fretting* do material estudado. Devido às cargas severas de contato, a nucleação de trincas na região de contato foi inevitável, as quais se propagaram devido às cargas trativas de fadiga aplicadas. Tensões médias altas aumentaram a severidade das cargas cíclicas, diminuindo a vida em fadiga por *fretting* do material estudado.

Palavras-chave: Fadiga por *fretting*; Tensão média; Alumínio; Dispositivo de *fretting*.

STUDY OF FRETTING FATIGUE BEHAVIOR OF AL 7050-T7451 ALUMINUM ALLOY

Abstract

To evaluate the fretting fatigue behavior of a 7050-T7451 aluminum alloy, a fretting device was specially designed, so that the contact loads could be controlled and accurately measured. The contact load and the alternating stress were kept constant for all tests, and only the applied mean stress varied. This type of consideration has allowed to observe, with the constancy of the tangential load amplitude in the critical plane and with the variation in the obtained maximum normal stress, the effect of mean stress on the fretting fatigue life of the studied material. Due to the severe contact loads, the crack nucleation in the contact zone was inevitable, and it propagates under the fatigue tensile loads applied. High mean stress has increased the severity of the cyclic loads, decreasing the fretting fatigue life of the material studied.

Key words: Fretting fatigue; Mean stress; Aluminum; Fretting device.

[1] *Contribuição técnica ao 63° Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1° de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

[2] *Doutoranda em Engenharia e Ciência dos Materiais, EESC, Universidade de São Paulo, Brasil*
[3] *Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais, EESC, Universidade de São Paulo, Brasil*
[4] *Graduando em Engenharia Mecânica ENM, Universidade de Brasília, Brasil*
[5] *Prof. Dr. de Engenharia Mecânica ENM, Universidade de Brasília, Brasil*
[6] *Prof. Tit. Dr. de Engenharia e Ciência dos Materiais, EESC, Universidade de São Paulo, Brasil*

1 INTRODUÇÃO

A fadiga é um processo de degradação contínua de um componente sujeito a carregamento cíclico, podendo eventualmente levar à ruptura do material devido à iniciação e posterior propagação de uma ou múltiplas trincas. A fadiga por *fretting* é um tipo particular de fadiga de materiais que vem recebendo muita atenção de engenheiros e pesquisadores devido ao crescente número de falhas de componentes em serviço que têm sido atribuídos a este fenômeno.

O termo *fretting* é usado para caracterizar o desgaste superficial causado por um pequeno movimento oscilatório entre superfícies em contato que invariavelmente ocorre em montagens mecânicas sujeitas as cargas vibratórias ou tensões cíclicas, bem como diferenças na expansão ou contração térmica devida a flutuações de temperatura.[1]

Warlow-Davis[2] (1941) percebeu que os componentes que eram submetidos à condição de *fretting* e depois a carregamentos cíclicos apresentavam uma redução em torno de 13% a 17% em sua resistência em fadiga. Assim, a ocorrência de *fretting* simultaneamente a uma solicitação de fadiga reduz consideravelmente a vida útil de um componente. Um dos fatores que podem contribuir para isto é a concentração de tensão local causada pela força de atrito devida ao contato e movimento entre as duas superfícies.[3,4] Em um processo de fadiga convencional, a iniciação pode chegar a 90% da vida total do componente, enquanto que em fadiga por *fretting*, a iniciação pode ocorrer em até 5% da vida total.[5] Observou-se também que o dano devido somente à ação do *fretting* é muito menor do que o dano causado pela ação combinada do *fretting* e tensão axial cíclica (fadiga).[6]

Sendo assim, entender a interação entre o *fretting* e o processo de fadiga se torna essencial e de suma importância para a prevenção e redução de acidentes em um futuro próximo. Sabendo-se que a fadiga por *fretting* pode acontecer entre o contato de membros estruturais de qualquer espécie, o significado deste estudo pode ter um efeito extensivo, atingindo principalmente áreas relacionadas ao custo econômico e segurança de um projeto.

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento da liga de Al 7050-T7451 frente a solicitações de fadiga por *fretting*. Para isto, foi utilizado um dispositivo que possibilitou realizar ensaios de fadiga por *fretting*, de modo que os principais parâmetros que regem este fenômeno, tais como carga de contato P e carga cisalhante Q, fossem adequadamente controlados e medidos, sendo possível então determinar analiticamente o campo de tensão gerado nos ensaios realizados. As sapatas utilizadas para produzir o contato serão cilíndricas, da mesma liga de alumínio estudada. Os testes formam conduzidos de modo a manter constantes todos os parâmetros de ensaio, exceto a tensão média de fadiga, que em termos do Método da curva de Wöhler modificada, corresponde a manter constante o valor da amplitude da tensão cisalhante e variar a tensão normal máxima no plano crítico. Assim, será possível observar se o efeito da tensão média nos testes de fadiga por *fretting* é similar ao encontrado em fadiga convencional, determinando se as teorias, tais como os critérios de fadiga multiaxial, são adequadas para descrever o comportamento dos materiais frente a tais condições de ensaio.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material Utilizado

O alumínio e suas ligas sempre foram considerados materiais aeronáuticos por excelência.[7] A grande variedade de ligas comerciais de alumínio e a possibilidade de inúmeros tratamentos térmicos fornecem diversas combinações de resistência mecânica, tenacidade à fratura, resistência à fadiga, resistência à corrosão, soldabilidade e conformidade. Estas características, aliadas à elevada relação de resistência/peso específico fazem com que as ligas de alumínio sejam uma das melhores escolhas para diversas aplicações em componentes estruturais da indústria aeronáutica.

Tabela 1. Composição Química, wt%, da Liga Al 7050-T7451.[8]

	Zn	Ti	Mg	Cu	Zr	Fe	Mn	Cr	Si
Norma	5,7-6,7	0,06	1,9-2,6	2,0-2,6	0,08-0,15	0,15	0,1	0,04	0,12
obtido	5,85	0,024	1,96	2,11	0,12	0,07	0,01	-	0,03

O material utilizado no desenvolvimento deste trabalho foi a liga de alumínio 7050, uma liga quaternária Al-Zn-Mg-Cu, na condição T7451, de aplicação estrutural, fornecido pela EMBRAER-LIEBHERR (ELEB) na forma de placas laminadas. Esta condição T7451 designa o tratamento térmico sofrido pela liga, na condição de duplo envelhecimento com alívio de tensão. A análise química do material está apresentada na Tabela 1.

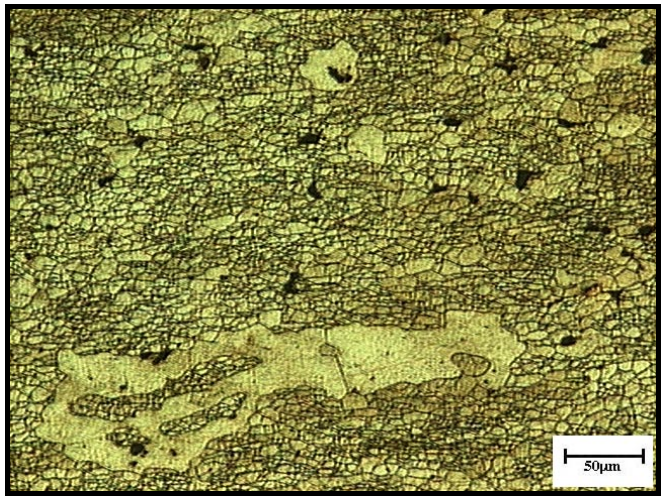


Figura 1. Tamanhos de grãos da liga Al7050-T7451, na direção T, atacada com reagente $(NH_4)_2S_2O_8$

A Figura 1 ilustra a microestrutura típica da liga Al7050-T7451, composta principalmente por pequenos grãos recristalizados, e regiões de grãos coalescentes de forma alongada que acompanham o sentido do processo de laminação. Não considerando as regiões de grãs grandes, o tamanho de grão foi medido conforme a norma ASTM E 1382-97, variando entre 4 mícron a 7 mícron. Os pontos pretos correspondem a partículas inter-metálicas Al_7Cu_2Fe e Mg_2Si, características da liga Al7050-T7451.

2.2 Ensaios Mecânicos

Os parâmetros de resistência mecânica do material, tais como limite de escoamento, limite de resistência e módulo de elasticidade, foram obtidos do ensaio de tração uniaxial. As dimensões e configuração do corpo de prova de tração estão mostradas na Figura 2, conforme norma ASTM E8M. Foram realizados 3 ensaios de tração para a liga estudada.

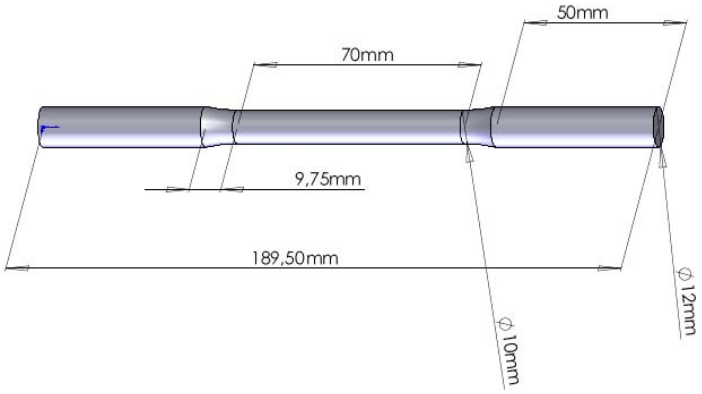


Figura 2. Dimensões do corpo-de-prova para os ensaios de tração

O limite de fadiga foi determinado para dois níveis de tensão média: sem tensão média aplicada e 120 MPa. A Figura 3 ilustra as dimensões do corpo-de-prova para os ensaios de fadiga, e estão de acordo com a norma ASTM E-466. Os ensaios foram realizados no sentido L de laminação do material, em uma máquina servo-hidráulica MTS modelo 810.23M, com capacidade de 250 KN, pertencente ao Departamento de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, da Escola de Engenharia de São Carlos. A freqüência utilizada para a realização dos ensaios foi de 30 Hz. O critério de falha utilizado foi ruptura do material, sendo determinado vida infinita para 10^7 ciclos alcançados sem a ruptura do material.

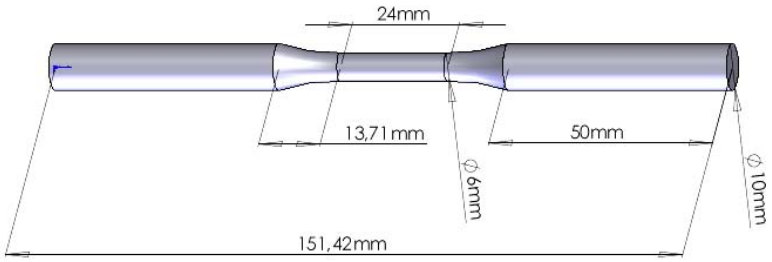


Figura 3. Dimensões do corpo-de-prova para ensaios de fadiga

2.3 Fadiga por *Fretting*

Para a realização de ensaios de fadiga por *fretting*, foi utilizado um aparato experimental, cujo layout está ilustrado na Figura 4, o qual foi montado na máquina de ensaios universal MTS-810 disponível no laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade de Brasília. Nesta configuração, o atuador hidráulico da máquina de ensaios universal é responsável por aplicar a carga remota de fadiga F_0, e o aparato acoplado à máquina produz as cargas cisalhantes Q no contato, ou seja, tem a função de um elemento mola reagindo ao deslocamento da sapata devido à deformação longitudinal no corpo de prova causada pela carga remota de fadiga.

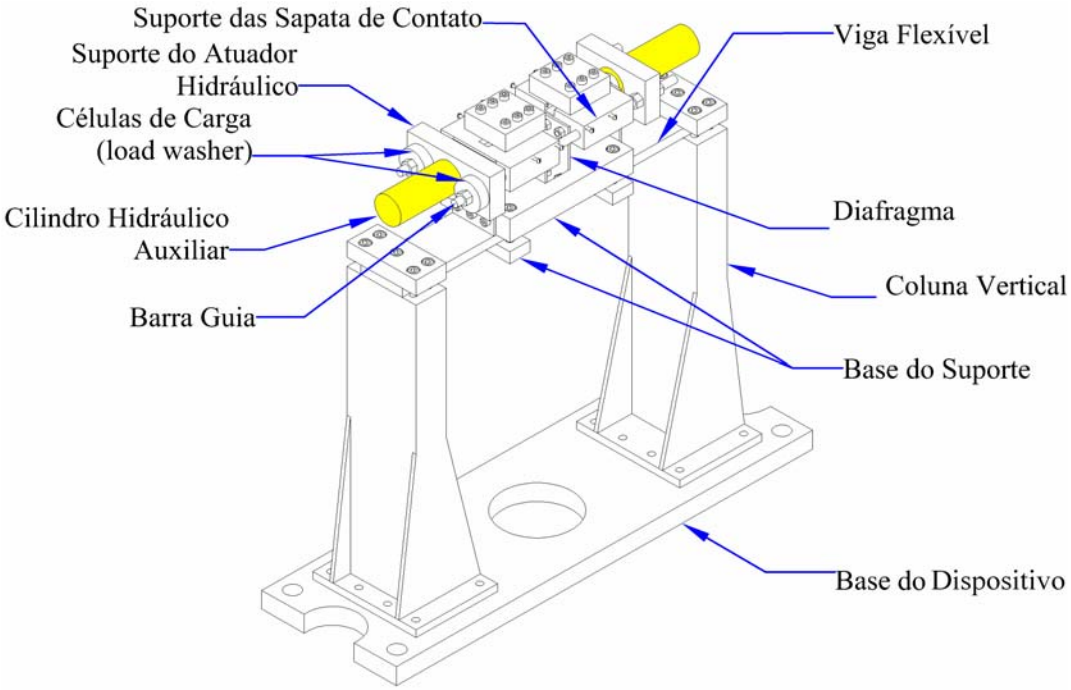


Figura 4. Esquema geral do dispositivo de *fretting* desenvolvido.

As forças envolvidas no fenômeno de fadiga por *fretting* estão apresentadas na Figura 5. Pode-se observar que a carga F corresponde à carga Q, resultante da rigidez do dispositivo, produzida em cada região de contato, como ilustra o diagrama de forças da Figura 5(b).

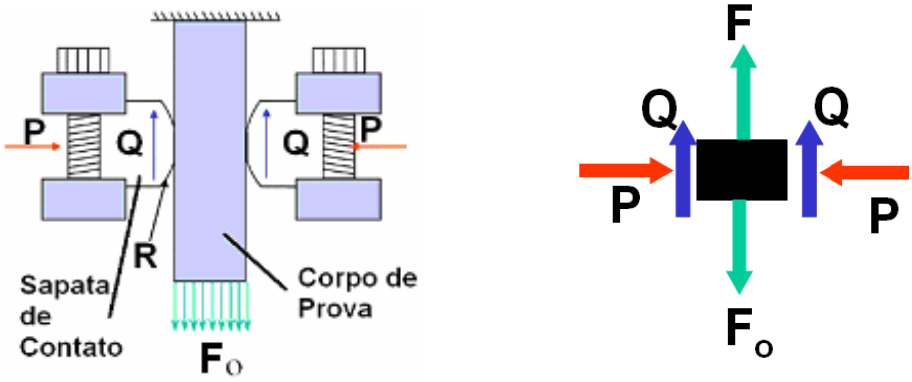
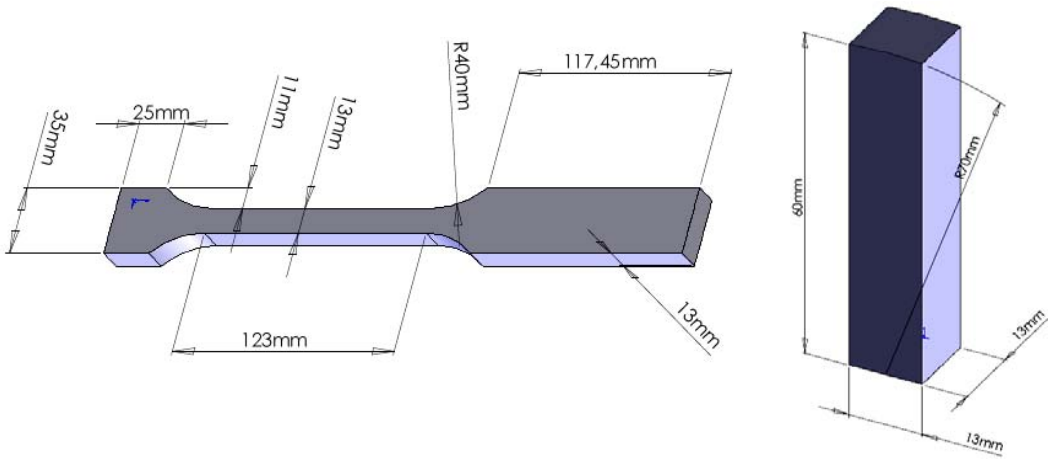


Figura 5. Forças envolvidas (a) no contato (b) diagrama de forças

A configuração de contato adotada foi cilíndrico-plana. As dimensões do corpo de prova e sapata de contato projetadas para o desenvolvimento dos ensaios estão ilustradas na Figura 6.



(a) (b)

Figura 6. Dimensões (a) corpo-de-prova (b) sapata de contato, para os ensaios de fadiga por *fretting*

Levando em conta as propriedades mecânicas da liga de alumínio 7050-T7451 a fim de manter as condições de carregamento no regime elástico, determinou-se a magnitude do carregamento de *fretting* a ser aplicado, conforme ilustra a Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros utilizados na realização dos ensaios de fadiga por *fretting*

σ_a [MPa]	F_0 [kN]	p_0 [MPa]	P [kN]	Q/P	f	Q [kN]	σ_m [MPa]
92,7	15,67	350	8,5	0,25	0,54	2,130	variável

Para completar a definição das condições de contato, um método analítico proposto por Nowell[9] foi usado para estimar o coeficiente de fricção na zona de escorregamento. Os ensaios foram realizados utilizando-se as mesmas forças aplicadas nos ensaios de fadiga por *fretting*, em que a média do coeficiente de fricção encontrado foi de 0,54. O procedimento realizado está devidamente explicado em Araújo.[10]

Para a realização dos ensaios de fadiga por *fretting*, mantidos em regime de escorregamento parcial, o corpo de prova é fixado na máquina servo-hidráulica de ensaios universais MTS. A carga média F_m de fadiga é aplicada ao corpo de prova antes de serem produzidas as tensões de contato, de modo que esta não irá alterar a tensão no componente causada pelas cargas de contato. Assim, será possível isolar e observar o efeito das cargas trativas e compressivas causadas pela tensão média de fadiga na vida em fadiga por *fretting*. As sapatas são pressionadas contra o corpo de prova por uma carga normal estática P, gerada por um sistema hidráulico, acionado por uma bomba manual. Então, é aplicada a carga alternada de fadiga, F_0. Enquanto o corpo de prova se estende, de acordo com sua deformação, sob a ação de uma carga remota oscilatória, o ponto de contato é deslocado e as vigas flexíveis aplicam uma carga tangencial, Q, ao corpo de prova por meio das sapatas. Os carregamentos são aplicados como descrito na Figura 7, isto é, P e F_m são carga estática e Q e F_0 são funções senoidais do tempo e terão a mesma freqüência e fase. Assim, a força alternada de fadiga tem como efeito o deslocamento da zona de adesão ao longo do ciclo de carregamento, porém, como a componente média, F_m, havia sido aplicada antes da carga normal, P, esta não é sentida pelo contato e seu computo pode ser feito pela simples superposição de um campo de tensão uniforme e constante.

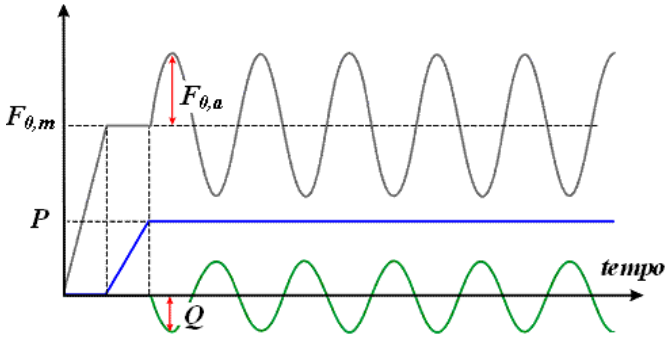


Figura 7. Modo de aplicação das cargas do teste de *fretting*

3 RESULTADOS

3.1 Efeito da Tensão Média na Vida em Fadiga e Fadiga por *Fretting*

Na Tabela 2 relata-se o resultado dos ensaios de tração realizados neste trabalho, para obtenção das propriedades mecânicas da liga de Al 7050-T7451. Estes dados serviram de base para a determinação do limite elástico do material e ajudaram a estimar sua curva S-N, além de ser um dado essencial na determinação dos parâmetros de ensaio da fadiga por *fretting*.

Tabela 2. Propriedades mecânicas da liga Al 7050-T7451

Limite de Escoamento (σ_e) [MPa]	453,8 ± 2,8
Limite de Resistência (σ_R) [MPa]	513,3 ± 4,1
Módulo de Elasticidade (E) [GPa]	73,4 ± 2,0
Alongamento [%]	11,1 ± 0,6
Microdureza [HV]	153,6 ± 2,6
Coeficiente de Poisson (υ)	0,33

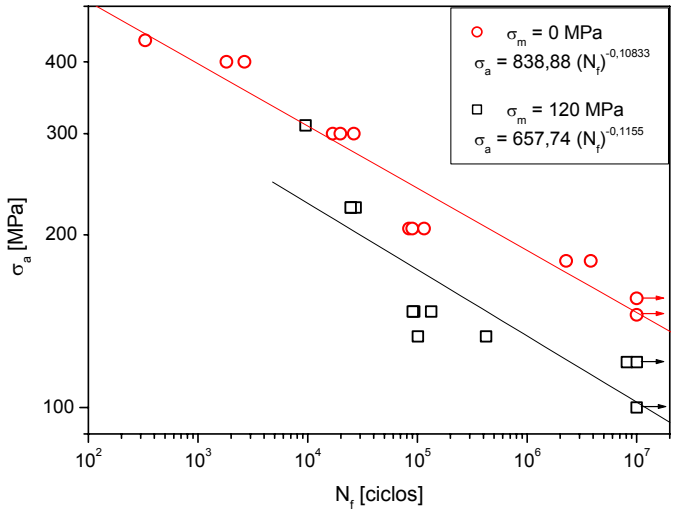


Figura 8. Curvas S-N para σ_m = 0 MPa e σ_m =120 MPa

Curvas S-N foram determinadas para uma tensão média de 120 MPa e sem tensão média, como ilustra a Figura 8. Através da equação de Basquin, e fazendo-se o ajuste linear dos pontos obtidos nos ensaios de fadiga convencional, obteve-se o limite de fadiga do material para as duas condições estudadas. O limite de fadiga do material para a curva de fadiga sem aplicação da tensão média, considerada para

uma vida de 10^7 ciclos, é dada para uma tensão alternada de 146,4 MPa, sendo que para a tensão média de 120 MPa, o limite é para tensão alternada de 102,2 MPa.

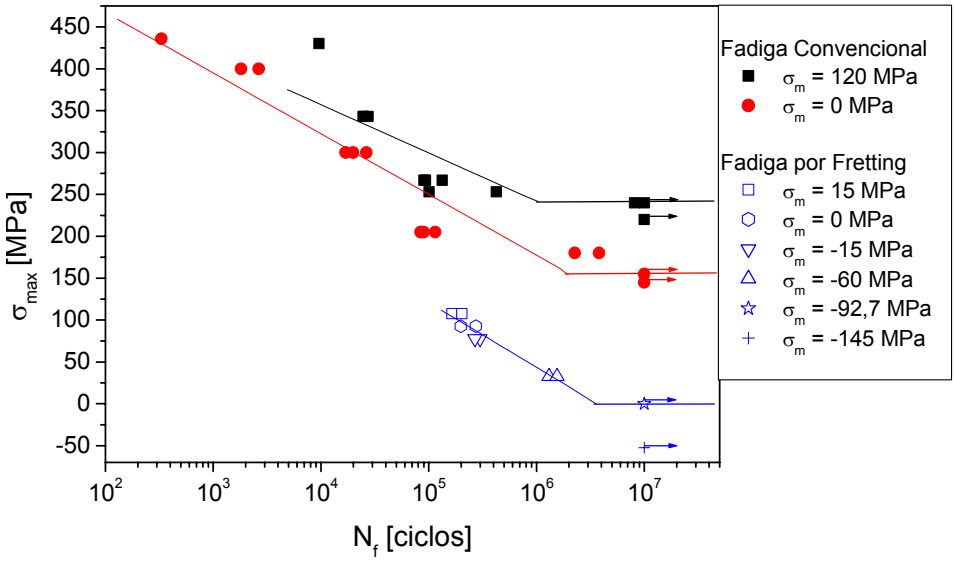


Figura 9. Curva S-N para os ensaios de fadiga convencional e fadiga por *fretting*

A Figura 9 ilustra os resultados obtidos dos ensaios de fadiga por *fretting*. Comparando os resultados obtidos para os ensaios de fadiga convencional sem aplicação de tensão média com aqueles obtidos em fadiga por *fretting* na mesma condição de tensão média, observa-se que o *fretting* reduz consideravelmente a vida em fadiga do material.

3.2 Análise Fractográfica

A Figura 10 ilustra a fractografia típica dos corpos de prova ensaiados em fadiga por *fretting*. Observa-se que a trinca que partiu do lado A iniciou-se a partir de múltiplos sítios, indicados pelas setas, que se formaram a partir do contato entre a sapata e o corpo de prova.

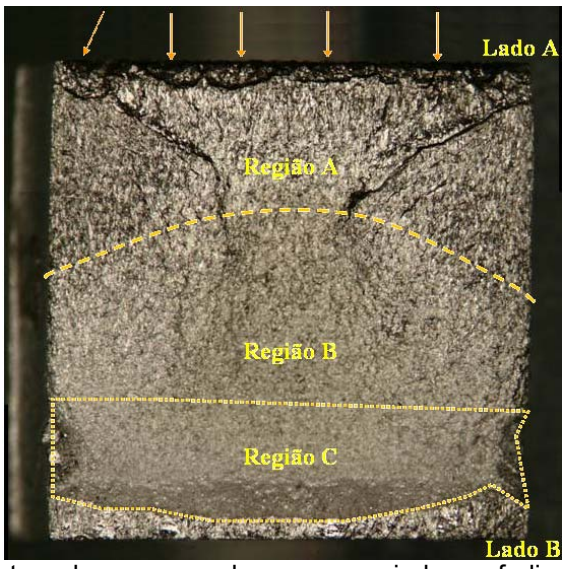
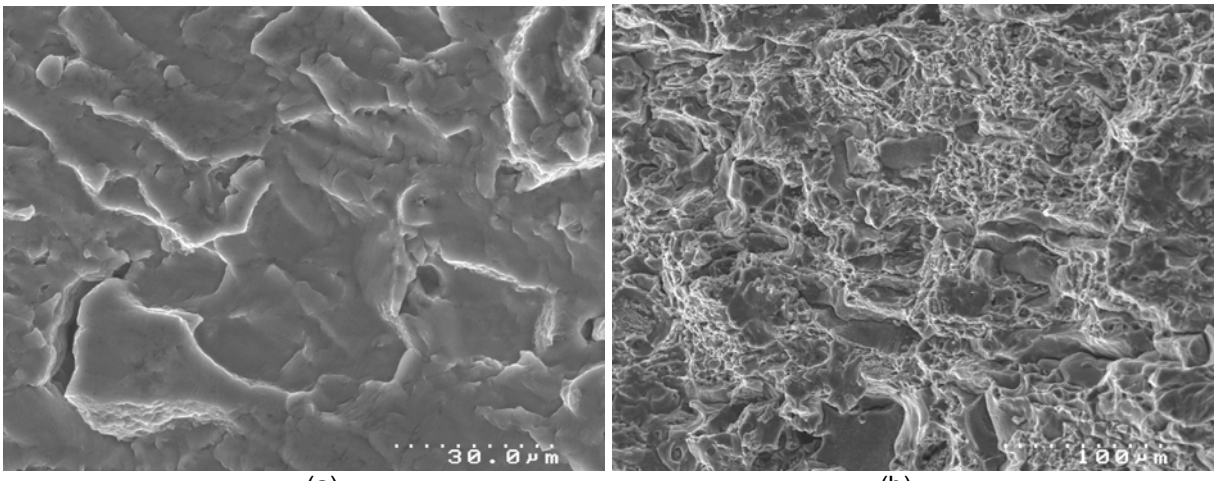


Figura 10. Superfície de fratura de um corpo de prova ensaiado em fadiga por *fretting* sem aplicação de tensão média, observada em microscópio esteroscópico

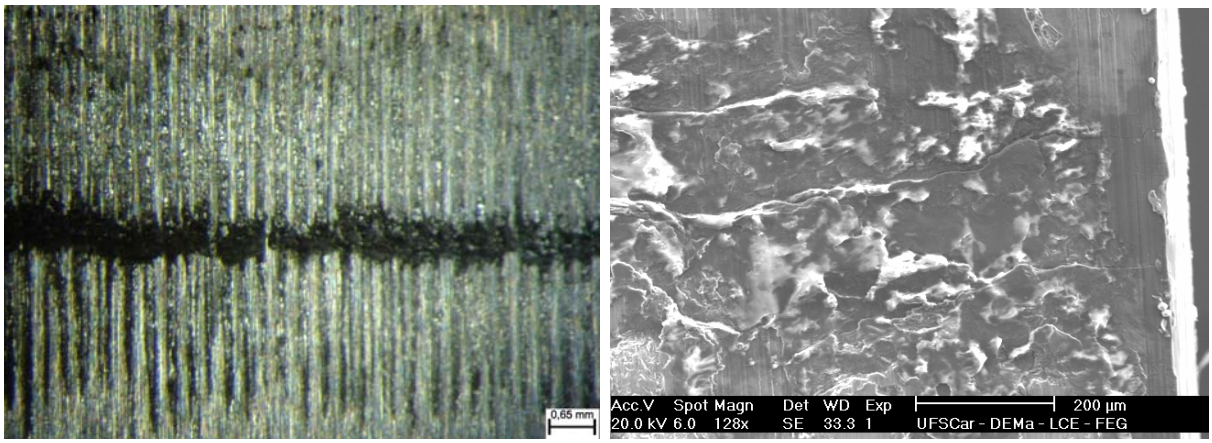
As trincas iniciadas, após alcançarem alguns micra, formaram uma única frente que se propagou perpendicular à superfície de carregamento principal, determinada pela região B (Figura 11(a)). Com o aumento progressivo da tensão, o processo ficou quase que monotônico e a fratura por colapso plástico aconteceu, determinado pela região C, com formação de alvéolos (dimples), como ilustra a Figura 11(b). Observas-se na linha final da região C o encontro das frentes de propagação de trinca por fadiga iniciada no lado B com o colapso plástico caudado pela frente de propagação do lado A.



(a) (b)

Figura 11. Estágio de propagação da trinca (a) detalhe da superfície de fratura (b) Estágio de ruptura final – colapso plástico

A Figura 12(a) ilustra a região de contato para o ensaio realizado a uma tensão média de -92,7 MPa. Pode-se observar o arrancamento de material devido ao desgaste abrasivo, adesivo e trincamento da camada superficial devido ao desgaste de delaminação. Este tipo de dano foi observado em toda a região de contato, com iniciação de trincas principalmente nas margens do contato, como ilustra a Figura 12(b). Isto confirma as condições severas à qual o material foi submetido devido às cargas de *fretting*, a qual foi capaz de causar a iniciação de trincas na superfície de contato, independente das cargas de fadiga aplicadas.



(a) (b)

Figura 12. Região de contato observada em esteroscópico, para o ensaio com tensão média de -92,7 MPa (a) vista geral (b) detalhe da margem direita do contato, ilustrando a iniciação de trinca

4 DISCUSSÃO

O efeito da tensão média na propagação das trincas de fadiga leva em conta a razão de tensão como principal parâmetro de análise. Quando se aumenta R, aumentam σ_{max} e σ_{min}, e há uma tendência ao aumento nas taxas de propagação das trincas, diminuindo a vida do material.[11] O limite de fadiga convencional determinada para a tensão média de 120 MPa é menor que aquele encontrado para a condição sem tensão média aplicada, já que esta última condição apresenta valores de R menores, apresentando assim condições menos severas de carregamento. Estes limites correspondem às condições em que as tensões trativas não mais são capazes de iniciar trincas por fadiga, utilizadas como parâmetros de projeto de vida infinita.

É sabido que, em geral, as tensões médias de compressão são benéficas enquanto que as de tração são maléficas para a vida em fadiga convencional em uma mesma amplitude de tensão. Isso ocorre porque as tensões de tração ($\sigma_m > 0$) favorecem a abertura e conseqüentemente a propagação de trincas, enquanto que as de compressão ($\sigma_m < 0$) têm o efeito contrário.[12] Este efeito é bem conhecido para os casos de fadiga convencional.

Através da Figura 9, pode-se observar que o aumento na tensão média diminui a vida do material também para os casos de fadiga por *fretting*, correspondendo a condições mais severas de carregamento. Mesmo com a diminuição significativa da tensão média para valores negativos, ocorre a iniciação de trincas devido a severidade das condições de carregamento causadas pelo *fretting*, e as cargas de fadiga que, inicialmente seriam muito baixas para causar a iniciação de trincas, são capazes de propagá-la, levando o material à ruptura. Este resultado foi encontrado para o caso de tensão média de até -60 MPa, em que uma pequena tensão máxima trativa foi aplicada no material.

Quando a tensão média de fadiga é suficientemente negativa, mantendo o material em condições de carregamento cíclico compressivos, observada para o caso de tensão média de -92,7 MPa e -145 MPa, ocorre a iniciação de trincas devido ao alto campo de tensão gerado em *fretting*, porém esta não se propaga, levando o material a alcançar vida infinita. Análises fractográficas da região de contato para o corpo de prova ensaiado a uma tensão média de – 92,7 MPa revelou a existência de trincas iniciadas na superfície, comprovando a existência de trincas paradas para esta condição de ensaio.

O fenômeno do *fretting* gera uma concentração de tensão, que decresce a partir da superfície.[13] A iniciação de trincas em materiais sujeitos à fadiga por *fretting* é influenciada por este campo de tensão, e sua conseqüente propagação é determinada pela tensão local presente na ponta da trinca, governada pela tensão alternada ou *far-field*.[14] Hutson et al.[15] variaram o campo de tensão no material para determinar a contribuição das cargas de contato e cargas de fadiga na iniciação e propagação de trincas geradas em fadiga por *fretting*. Para os casos onde as cargas de contato são altas, a iniciação da trinca é inevitável, e sua propagação dependerá do campo de tensão na ponta da trinca gerado devido as cargas de fadiga aplicadas. Neste caso, observa-se a existência de trincas paradas (*crack arrest*) para as condições em que as cargas de fadiga aplicadas são menores que as condições necessárias para causar o crescimento desta. Um outro caso corresponde àquele em que as cargas de contato são menores, e toda trinca iniciada irá se propagar devido às altas cargas de fadiga aplicada no material. Esta condição é basicamente governada pelas cargas de fadiga, e não se observa a existência de trincas paradas no material. Foi determinada também a existência de

um caso intermediário, em que a combinação das cargas de contato e das cargas de fadiga aplicadas determinarão o comportamento da resposta do material frente a este tipo de solicitação.
Observa-se que o campo de tensão gerado devido ao *fretting* para a condição de ensaio aplicada neste trabalho é severo o suficiente para causar a iniciação de trincas, independente das cargas de fadiga aplicadas. Deve-se lembrar aqui que a magnitude do campo de tensão devido às cargas de fadiga foi variada através da carga média aplicada. A trinca irá se propagar como conseqüência da influência do campo de tensão gerado na frente desta, e a magnitude, para profundidades em que as cargas de contato deixam de ser significantes, deve ser suficiente para causar o crescimento desta. Assim, a magnitude da tensão média é um fator crucial na determinação da ruptura do material.
Para todas as tensões médias aplicadas, mesmo para os casos em que não se observou a ruptura do material, o carregamento sub-superficial aplicado foi severo o suficiente para iniciar trincas, as quais atingiram uma distância suficiente da superfície a não sofrer mais a influência do campo de tensão gerado por *fretting*. Porém, estas trincas só se propagarão sobre a influência do carregamento de fadiga aplicado, onde cargas compressivas tendem a impedir o crescimento das trincas iniciadas. Assim, mesmo para condições de tensões trativas de menores magnitudes aplicadas, comprova-se que o *fretting* aumenta a severidade do dano causado no material, reduzindo consideravelmente a vida em fadiga do Al 7050-T7451, como observado na Figura 9.
Desta forma, através dos dados experimentais obtidos neste trabalho, podemos determinar se teorias utilizadas em fadiga plana, tais como a teoria de fadiga multiaxial, são satisfatórias para prever a resistência em fadiga por *fretting* dos materiais, ou se outros modelos matemáticos devem ser desenvolvidos ou melhorados para tal finalidade.

5 CONCLUSÃO

O fenômeno do *fretting* reduziu consideravelmente a vida em fadiga do material. Este fenômeno foi responsável pela nucleação de trincas de fadiga em toda a região de contato, independente das cargas de fadiga aplicadas.
Tensões médias altas aumentaram a severidade das cargas de fadiga, diminuindo a vida. Este efeito foi também verificado no estágio de propagação de trincas sujeitos a condições de fadiga por *fretting*.
Devido à severidade das cargas de contato aplicada neste trabalho, a iniciação de trincas na camada sub-superficial de contato foi inevitável, porém sua propagação foi determinada pelo campo de tensão aplicado na frente da trinca em uma profundidade tal que é influenciada principalmente pelas cargas de fadiga. Campos de tensão trativos foram capazes de propagar as trincas iniciadas, as quais não se propagaram apenas sob condição de tensões compressivas.
Análises fractográficas ilustraram o dano severo ao qual o material foi submetido devido às cargas de *fretting*, o qual foi capaz de iniciar trincas na região de contato independente das cargas de fadiga aplicadas. Observaram-se múltiplos sítios de nucleação de trincas localizadas em toda a região de contato, às quais formaram uma única frente de propagação, causando a ruptura do material.

Agradecimentos

Ao CNPq, pela bolsa concedida em nível de doutorado e suporte técnico-científico concedido ao trabalho, e a EMBRAER, pelo suprimento de materiais concedidos para a realização da parte experimental do trabalho.

REFERÊNCIAS

1 HUTCHINGS, I.M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Cambridge: Butterworth-Heinemann, 1992. 280p.

2 WARLOW-DAVIS, F. J. Fretting corrosion and fatigue strength. In: Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, 146, 1941. 32p.

3 Araújo, J.A. Fatigue Initiation Life under Fretting Conditions. In: Brazilian Congress of Mechanical Engineering, 16., 2001, Uberlândia. Uberlândia: COBEM, 2001. 1CD.

4 RAYAPROLUS, D. B., COOK, R. A Critical Review of Fretting Fatigue Investigation at the Royal Aerospace Establishment. In: Attia M.H. & Waterhouse R.B. Standardization of Fretting Fatigue Test Methods and Equipment. ASTM STP 1159. Baltimore : ASTM, 1992. p. 129-152.

5 WATERHOUSE, R. B. Fretting Fatigue. International Materials Reviews, v. 37, 1992.

6 ENDO, K., GOTO, H., NAKAMURA, T. Effect of Cycle Frequency on Fretting Fatigue Life of Carbon Steel. Bull. of JSTM, v. 12, n. 54, p. 1300-1308, 1969.

7 GUIMARÃES, A. V. Estudo Comparativo da Deformação a Frio sobre as Propriedades Mecânicas de uma Liga de Alumínio de Liga 7475-T761, Guaratinguetá. 1994. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

8 WARMUZEK, M. Metallographic Techniques for Alluminum and Its Alloys. Metallography and Microstructures, v. 9, ASM Handbook, ASM International, 2004. p. 711-751.

9 NOWELL, D. An Analysis of Fretting Fatigue, Oxford. 1988. Thesis (Doctor Phil.) - University of Oxford.

10 ARAÚJO, J. A. On the Initiation and Arrest of Fretting Fatigue Cracks, Oxford. 2000. Thesis (Doctor Phil.) - University of Oxford.

11 VIANA, T.G., GODEFROID, L.B., BARROSO, E.K.L., AL-RUBAIE, K.S. Caracterização do Fechamento de Trinca de Fadiga numa Liga Al 7475 Pré-Deformada e com Shot-Peening. Revista Matéria, v. 10, n. 3, p. 454-462, 2005.

12 SHARP, M.L., NORDMARK, G.E., MENZEMER, C.C. Fatigue Design of Aluminum Components & Structures. New York : Mc Graw-Hill, 1996. 353p.

13 ARAÚJO, J.A., NOWELL, D. The Effect of Rapidly Varying Contact Stress Fields on Fretting Fatigue. International Journal of Fatigue, v. 24, p. 763-775, 2002.

14 NICHOLAS, T. High Cycle Fatigue: A Mechanics of Materials Perspective. Oxford : Elsevier Science, 2006. 656p.

15 HUTSON, A.L., NICHOLAS, T., OLSON, S.E., ASHBAUGH, N.E. Effect of Sample Thickness on Local Contact Behavior in a Flat-on-Flat Fretting Fatigue Apparatus. International Journal of Fatigue, v. 23, p. 445-453, 2001. *apud* NICHOLAS, T. High Cycle Fatigue: A Mechanics of Materials Perspective. Oxford : Elsevier Science, 2006. 656p.