

RESISTÊNCIA À FADIGA POR FRETTING DA LIGA AA7050-T745 I

Luciana Sgarbi Rossino ¹Edgar Ashiuchi ²Marcos Dorigão Manfrinato ³José Alexander Araújo ⁴Waldek Wladimir Bose Filho ⁵

Resumo

Foram realizados ensaios de fadiga por *fretting* na liga AA7050-T745 I, com cargas de contato e tensões alternadas de fadiga constantes para todos os ensaios realizados. Foi apenas variada a tensão média aplicada, responsável pela variação da tensões cíclicas máxima e mínima obtidas para cada condição de ensaio. Tais resultados são comparados com as curvas de fadiga convencional obtidas para o material estudado. Como observado para os casos de fadiga convencional, o aumento na tensão média diminui a vida do material para os casos de fadiga por *fretting*. Existiram casos que, mesmo com a diminuição da tensão máxima cíclica para valores próximos a zero, ocorreu a iniciação de trincas devido ao carregamento severo de *fretting*. Cargas de fadiga com valores muito baixos para iniciar trincas foram capazes de propagá-las, causando ruptura do material. Para carregamentos cíclicos totalmente compressivos, ocorreu a iniciação de trincas, que não se propagaram e o material apresentou vida infinita. O fenômeno do *fretting* associado a um carregamento de fadiga reduz significativamente a vida de um componente.

Palavras-chave: Ensaio de fadiga; Fadiga; *Fretting*; Trincas.

FRETTING FATIGUE STRENGTH OF AN AA7050-T745 I ALLOY

Abstract

Fretting fatigue tests were performed in an AA7050-T745 I alloy, with both contact load and fatigue alternate stresses kept constants. Only the applied mean stress, responsible for the maximum and minimum cyclic stresses are varied for each test condition. Such results are compared with the ones from the conventional fatigue tests obtained for the studied material. Similarly to the conventional fatigue results, it was observed that increasing the mean stress, lead to a reduced *fretting* fatigue life. There were cases that, crack nucleation took place due to the severity of the *fretting* loads, and they were propagated due to the applied fatigue stress, even with the maximum cyclic stress close to zero, which is considered too low to initiate a crack, leading the specimens to fracture. For cyclic loading totally compressive, again crack nucleation took place, due to the *fretting* loading, and the cracks did not propagated, leading the specimen to infinite life. The *fretting* effect in conjunction with fatigue loads significantly reduces the specimen life.

Key words: Fatigue tests; Fatigue; *Fretting*; Cracks.

I INTRODUÇÃO

Componentes que trabalham em conjunto com outras peças, submetidos a vibrações ou tensões cíclicas, sempre apresentam algum movimento relativo entre as superfícies em contato, podendo ocasionar desgaste superficial e falhas em serviço. A fadiga por *fretting* é um dos modos mais comuns de fadiga por contato e

refere-se ao deslizamento de pequena amplitude entre duas superfícies em contato, favorecendo a nucleação de trincas que, devido ao carregamento cíclico aplicado ao componente, podem propagar-se e causar a sua falha. A ocorrência do *fretting* simultaneamente a uma solicitação de fadiga reduz consideravelmente a vida útil de um

¹Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Universidade de São Paulo – USP, Av. Trabalhador São-carlense, nº 400, Bairro Arnold Schimidt, CP 440, Cep 13566-590, São Carlos, SP, Brasil. E-mail: lu-sgarbi@hotmail.com

²Mestre em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília – UnB, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Ed. SG-09, Cep 70910-900, Brasília, DF, Brasil. E-mail: eashiuchi@hotmail.com

³Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Universidade de São Paulo – USP, Av. Trabalhador São-carlense, nº 400, Bairro Arnold Schimidt, CP 440, Cep 13566-590, São Carlos, SP, Brasil. E-mail: prof.dorigao@gmail.com

⁴Prof. Dr. de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília – UnB, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Ed. SG-09, Cep 70910-900, Brasília, DF, Brasil. E-mail: alex07@unb.br

⁵Prof. Dr. de Ciência e Engenharia dos Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Universidade de São Paulo – USP, Av. Trabalhador São-carlense, nº 400, Bairro Arnold Schimidt, CP 440, Cep 13566-590, São Carlos, SP, Brasil. E-mail: waldek@sc.usp.br

componente. Um dos fatores que podem contribuir para isto é a concentração de tensão local causada pela força de atrito devido ao contato e movimento entre as duas superfícies, acelerando o processo de iniciação de trincas.^(1,2)

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento da liga AA7050-T7451 frente a solicitações de fadiga por *fretting*. Foram realizados ensaios de fadiga por *fretting* de modo que as cargas de contato e a tensão alternada de fadiga foram mantidas constantes para todos os ensaios, variando apenas a tensão média aplicada. Assim, foi possível observar se o efeito da tensão média nos testes de fadiga por *fretting* é similar ao encontrado em fadiga convencional. Para a observação da influência das cargas de contato no dano provocado ao material estudado, realizaram-se ensaios em que o campo de tensão gerado devido às carga de fadiga fosse sempre compressivo, esperando-se obter possíveis trincas paradas, que são nucleadas devido ao campo de tensão local, produzidas pelas cargas de *fretting* aplicadas, sem causar a ruptura do corpo de prova devido ao campo de tensão compressivo gerado devido ao carregamento de fadiga.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado no desenvolvimento deste trabalho foi uma liga de alumínio 7050-T7451, na condição de duplo envelhecimento com alívio de tensão, fornecido pela Embraer-Liebherr. Na Tabela 1 está apresentada a análise química, determinada pela técnica de espectrometria de emissão óptica, equipamento ARL 3460 por centelha. Na Tabela 2 relatam-se as propriedades mecânicas do material estudado.

Tabela 1. Composição química (%p) da liga AA7050-T7451.⁽³⁾

	Zn	Ti	Mg	Cu	Zr	Fe	Mn	Cr	Si
Nominal	5,70-6,70	0,06	1,90-2,60	2,0-2,6	0,08-0,15	0,15	0,10	0,04	0,12
Obtido	5,85	0,024	1,96	2,11	0,12	0,07	0,01	-	0,03

Tabela 2. Propriedades mecânicas da liga Al 7050-T7451.⁽⁴⁾

Limite de escoamento (σ_e) [MPa]	Limite de resistência (σ_R) [MPa]	Módulo de elasticidade (E) [GPa]	Coefficiente de Poisson (ν)
454	513	73	0,33

A Figura 1 ilustra a microestrutura típica da liga AA7050-T7451, revelada por meio de ataque químico com o reagente $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ (8 g de $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$, 1 mL de HF e 99 mL de H_2O), composta principalmente por pequenos grãos recristalizados, e regiões de grãos coalescidos, de forma alongada que acompanham o sentido do processo de laminação do material. Os pontos pretos correspondem a partículas intermetálicas $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ e Mg_2Si , características da liga AA7050-T7451. O tamanho médio de grão medido foi de 5 μm , obtido conforme a norma ASTM E 1382-1397.⁽⁵⁾

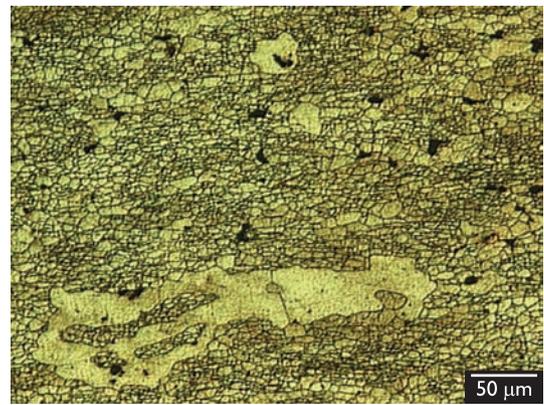


Figura 1. Microestrutura típica da liga AA7050-T7451.

O limite de fadiga foi determinado para dois níveis de tensão média (σ_m): 0 e 120 MPa, cujas dimensões do corpo-de-prova estão ilustradas na Figura 2, e estão de acordo com a norma ASTM E-466.⁽⁶⁾ A rugosidade superficial (R_a) dos corpos de prova, medidas utilizando-se um rugosímetro portátil Mitutoyo SJ.201P, comprimento de onda limite 2.5 x 3, após preparação superficial, ficou na faixa de 0,04 μm . Os ensaios de fadiga foram realizados em uma máquina servo-hidráulica MTS, modelo 810.23M e capacidade de 250 kN, com frequência de 30 Hz. O critério de falha utilizado foi a ruptura do corpo de prova, sendo considerada vida infinita para 10^7 ciclos, alcançados sem a sua ruptura.

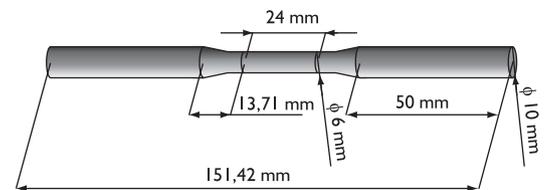


Figura 2. Dimensões do corpo de prova para ensaios de fadiga conforme a norma ASTM E 1382-1397.⁽⁵⁾

Para a realização de ensaios de fadiga por *fretting*, foi utilizado um aparato experimental, montado na máquina de ensaios, como ilustrado na Figura 3a. 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. As forças envolvidas no fenômeno de fadiga por *fretting* estão apresentadas na Figura 3b. 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 3c. A carga P é aplicada por um par de cilindros hidráulicos auxiliares, conectado a um acumulador de pressão a gás (nitrogênio/óleo), acionado por uma bomba manual. A descrição completa do dispositivo desenvolvido pode ser encontrada em Martins et al.⁽⁷⁾

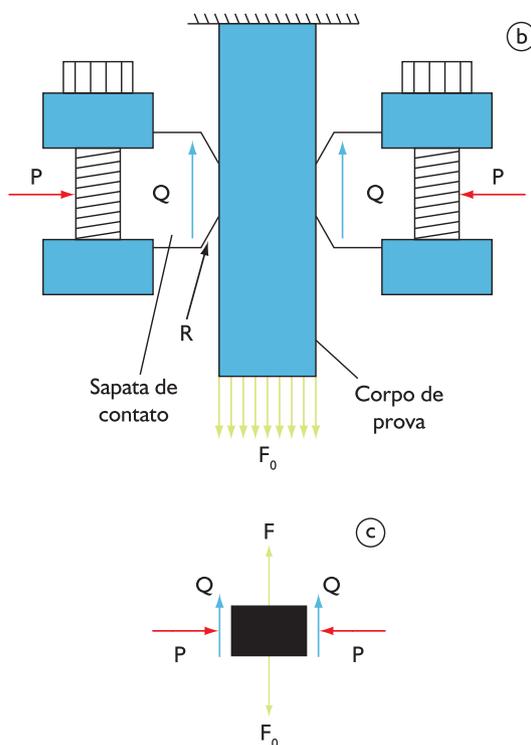
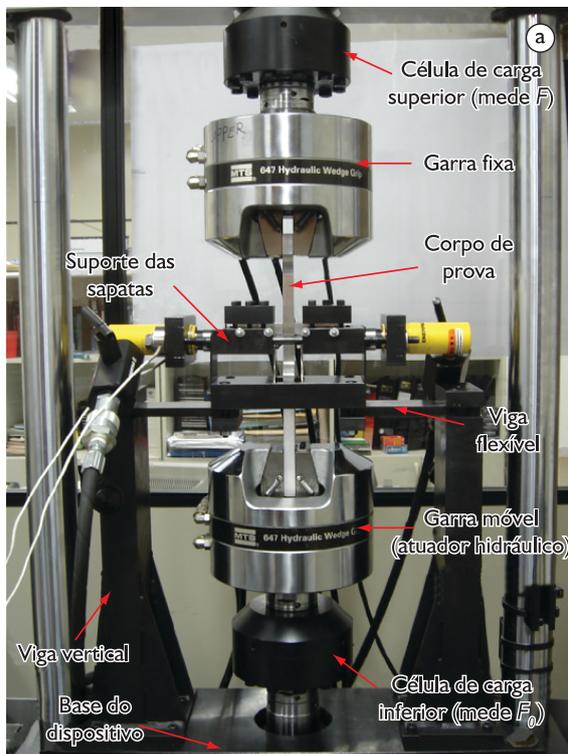


Figura 3. a) Dispositivo de fretting montado em uma máquina servo-hidráulica, b) forças envolvidas no contato e c) diagrama de forças.

A configuração de contato adotada foi cilíndrico-plana. As dimensões do corpo de prova e sapata de contato utilizados no desenvolvimento dos ensaios estão ilustradas na Figura 4. A rugosidade superficial (R_a) dos corpos de prova utilizados para realizar os ensaios de fadiga por fretting, medidas após acabamento de retífica, ficou em torno de $0,6 \mu\text{m}$, enquanto que, para as sapatas cujos raios foram produzidos por eletro-erosão a fio, este valor ficou em torno de $0,2 \mu\text{m}$.

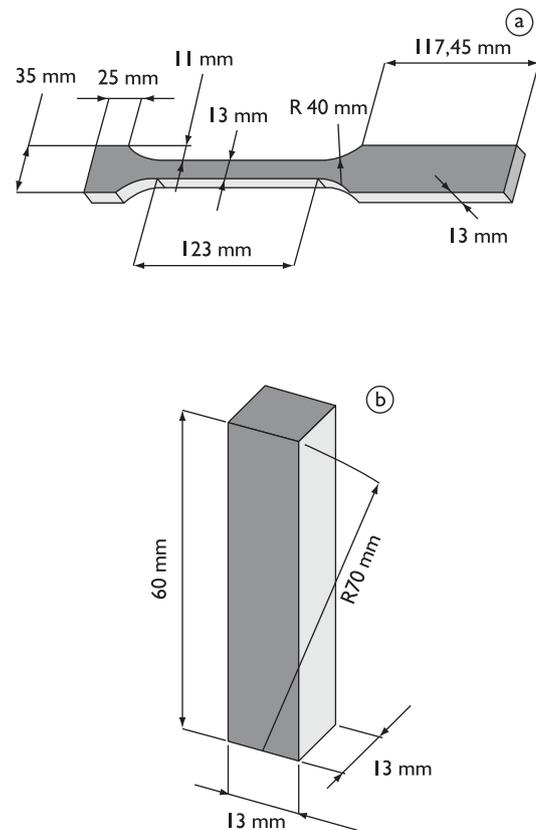


Figura 4. Dimensões: a) do corpo de prova, e b) da sapata de contato, utilizados nos ensaios de fadiga por fretting.

Mantendo-se as condições de carregamento no regime elástico, determinou-se a magnitude do carregamento de fretting a ser aplicado, conforme ilustra a Tabela 3. Um método analítico proposto por Nowell⁽⁸⁾ foi usado para estimar o coeficiente de fricção na zona de escorregamento, cuja média encontrada foi de 0,54, conforme procedimento realizado em Martins et al.⁽⁷⁾

Tabela 3. Parâmetros utilizados na realização dos ensaios de fadiga por fretting.

σ_a [MPa]	F_0 [kN]	P_0 [MPa]	P [kN]	Q/P	Q [kN]	σ_m [MPa]
92,7	15,7	350	8,5	0,25	2,13	15, 0, -15, -60, -92,7, -145

Para a realização dos ensaios de fadiga por *fretting*, mantidos em regime de escorregamento parcial, o corpo de prova foi fixado na máquina servo-hidráulica de ensaios MTS. A carga média, F_m , de fadiga foi aplicada ao corpo de prova antes de serem produzidas as tensões de contato, de modo que esta não alterasse a tensão no componente causada pelas cargas de contato. Dessa forma, foi 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 foram pressionadas contra o corpo de prova por uma carga normal estática P . Assim, foi aplicada a carga alternada de fadiga, F_0 . Com a deformação do corpo de prova, sob a ação de uma carga remota oscilatória, o ponto de contato era deslocado e as vigas flexíveis aplicavam uma carga tangencial, Q , ao corpo de prova por meio das sapatas. Os carregamentos foram aplicados conforme o modo de aplicação apresentado na Figura 5. Os ensaios foram realizados a uma frequência de 10 Hz. Sabe-se que, em ensaios ao ar ou atmosferas inertes, o efeito da frequência de carregamento na taxa de propagação de trincas de fadiga é desprezível.⁽⁹⁾ Assim, escolheu-se uma frequência mais baixa como parâmetro de ensaio de fadiga por *fretting* para evitar vibrações excessivas no dispositivo desenvolvido, e que poderiam danificá-las.

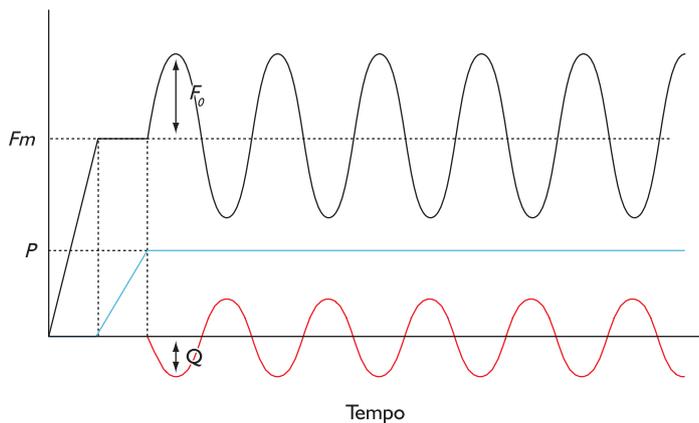


Figura 5. Modo de aplicação das cargas aplicadas nos ensaios de fadiga por *fretting*.

A influência das cargas de contato no dano provocado no material estudado foi observada realizando-se ensaios a tensão alternada de 92,7 MPa e tensão média de -92,7 MPa, em que o campo de tensão gerado devido à carga de fadiga é compressivo ($\sigma_{\max} = 0$ MPa e $\sigma_{\min} = -185,4$ MPa). Nestas condições, espera-se obter possíveis trincas paradas, que são geradas devido ao campo de tensão local, produzidas pelas cargas de *fretting* aplicadas, sem causar a ruptura do corpo de prova, devido ao campo de tensão compressivo gerado em função do carregamento de fadiga. Para análise das trincas paradas, a região do contato foi separada do corpo de prova e foram analisadas as marcas de contato produzidas no ensaio.

3 RESULTADOS

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

Pela equação de Basquin (1910), e fazendo-se o ajuste linear empregando o método dos mínimos quadrados dos pontos obtidos nos ensaios de fadiga convencional, determinou-se que o limite de fadiga do material, para tensão média de 0 MPa, é obtido para uma tensão alternada de 146,4 MPa. Para a tensão média de 120 MPa, o limite corresponde a uma tensão alternada de 102,2 MPa, conforme ilustra a Figura 6. Para a condição em que a tensão média é nula, para a mesma vida obtida de $2,37 \times 10^5$ ciclos, a amplitude de tensão alcançada para a condição de fadiga convencional é de aproximadamente 219,5 MPa. Este valor cai para 92,7 MPa no caso de fadiga por *fretting*. Esta redução na amplitude de tensão obtida, de aproximadamente 42%, para o mesmo número de ciclo alcançado, evidencia que as condições tornam-se muito mais severas quando o carregamento de *fretting* é aplicado simultaneamente ao carregamento de fadiga. Desta maneira fica evidente que o efeito do *fretting* reduz substancialmente a resistência à fadiga do material estudado. Pela Figura 7, 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.

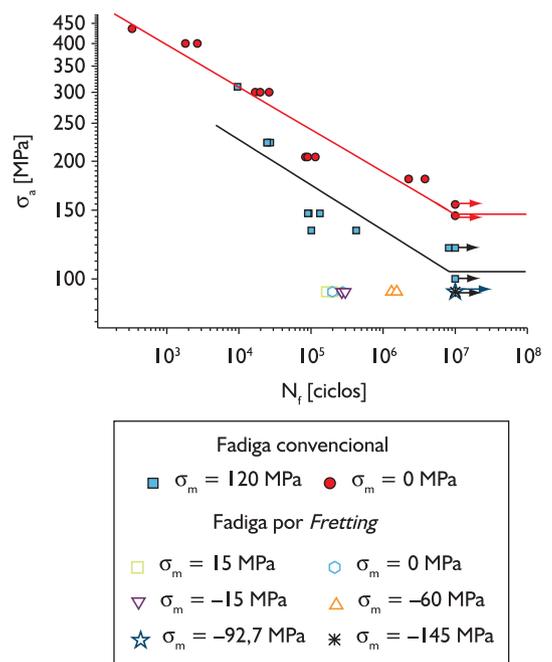


Figura 6. Curva S – N para os ensaios de fadiga convencional e fadiga por *fretting*.

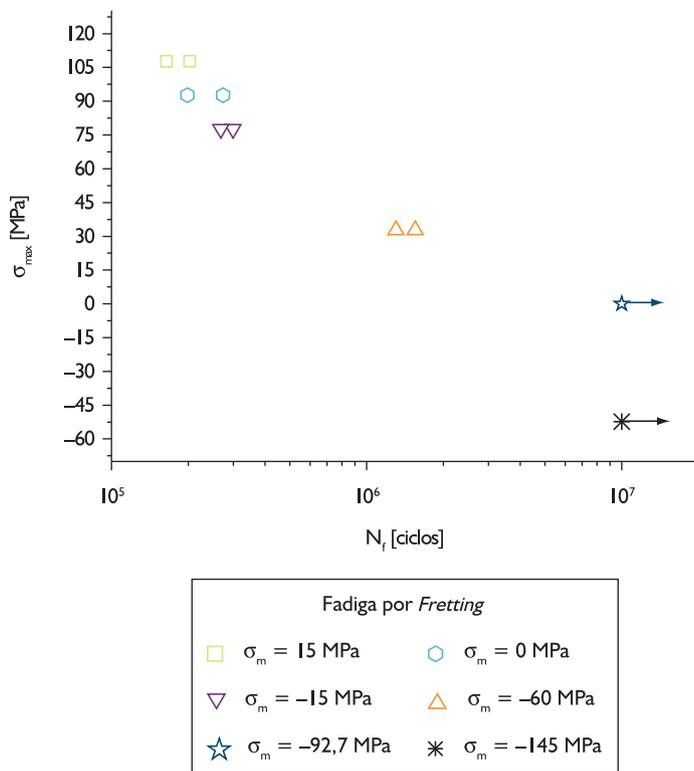


Figura 7. Efeito da tensão média na vida em fadiga por *fretting*.

3.2 Análise da Região de Contato

A Figura 8a 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 (setas), que se formaram a partir do contato entre a sapata e o corpo de prova. Essas trincas formaram uma única frente que se propagou perpendicular à superfície de carregamento principal, determinada pela região B. Observa-se na linha final da região C o encontro das frentes de propagação de trinca por fadiga iniciada no lado B, com a ruptura decorrente da propagação da trinca formada no lado A, correspondendo ao estágio III de propagação da trinca (fratura final). A diferença fundamental entre a fractografia obtida em corpos de prova ensaiados em fadiga por *fretting* e aqueles ensaiados em fadiga convencional corresponde ao ponto de início da trinca. Para os casos de fadiga por *fretting* as trincas iniciam-se na zona de escorregamento da região de contato entre a sapata e o corpo de prova, geradas principalmente devido ao alto campo de tensão e desgaste severo causados pelo carregamento de fadiga por *fretting* nessa região. Para os casos de fadiga convencional as trincas iniciam-se em algum ponto na superfície do material, causadas principalmente pelo fenômeno de intrusões e extrusões, que são geradas pelo carregamento cíclico.

Os múltiplos sítios de iniciação de trincas encontrados na Figura 8a estão de acordo com as observações encontradas analisando-se a profundidade da região do contato com relação à superfície de escorregamento, conforme ilustra a Figura 8b. Estas trincas são geradas devido às condições de carregamento e desgaste severos produzidos pelo fenômeno de fadiga por *fretting*.

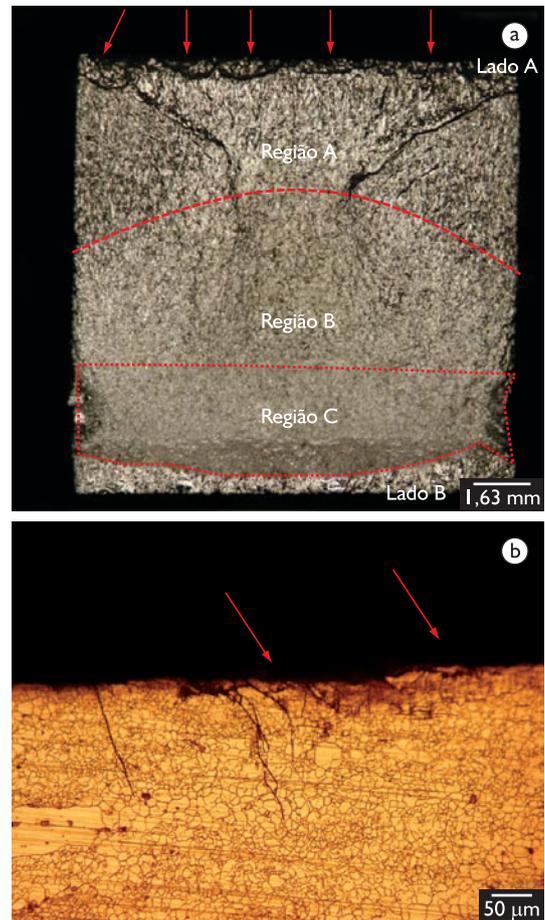


Figura 8. a) Fractografia do corpo de prova ensaiado a fadiga por *fretting* a $\sigma_m = 0 \text{ MPa}$, b) trincas paradas na zona de escorregamento, para $\sigma_m = -92,7 \text{ MPa}$.

Observa-se a presença de múltiplas trincas paradas, geradas na zona de escorregamento da região de contato, confirmando as condições severas à qual o material foi submetido. As setas ilustram o mecanismo responsável pela formação de detritos de desgaste, denominado de delaminação. Neste caso, as trincas paradas não evoluíram para fratura, pois a carga cíclica de fadiga remota ao contato não foi suficiente para propagá-la.

4 DISCUSSÃO

Da literatura, verifica-se que, em geral, as tensões médias de compressão são benéficas enquanto que as de tração são maléficas para a vida em fadiga convencional, para 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 efeito contrário.⁽¹⁰⁾ Esse efeito é bem conhecido

para os casos de fadiga convencional, observando-se que 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, apresentando assim condições menos severas de carregamento, como ilustra a Figura 6.

Pela Figura 7, 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 à 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-las, 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 compressivo, observadas 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 estas não se propagam, 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 revelam a existência de trincas paradas para esta condição de ensaio, como ilustra a Figura 8b.

O fenômeno do *fretting* gera uma concentração de tensão, que decresce a partir da superfície.⁽¹¹⁾ A iniciação de trincas em materiais submetidos à fadiga por *fretting* é influenciada por este campo de tensão. Sua consequente propagação é determinada pela tensão local presente na ponta da trinca, governada pela tensão alternada aplicada remotamente.⁽¹²⁾ Hutson et al.⁽¹³⁾ 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 às 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 seu crescimento. 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. Essa 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 determina o comportamento da resposta do material frente a esse tipo de sollicitação.

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, independentemente das cargas de fadiga aplicadas. Deve-se ressaltar, neste ponto, que a magnitude do campo de tensão devido às cargas de fadiga foi variada pela carga média aplicada. A trinca irá se propagar como consequência 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 seu crescimento. 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, essas trincas só se propagam sobre a influência do carregamento de fadiga aplicado, onde cargas compressivas tendem a impedir o crescimento das trincas iniciadas. Assim, comprova-se que o *fretting* aumenta a severidade do dano causado no material, reduzindo consideravelmente a vida em fadiga da liga AA7050-T7451, sendo capaz de iniciar trincas, mesmo para condições de tensões tratativas de menores magnitudes aplicadas, que se propagam ou permanecem paradas, devido à influência do carregamento de fadiga aplicado.

5 CONCLUSÃO

O fenômeno do *fretting* reduziu consideravelmente a vida em fadiga do material estudado. Este fenômeno foi responsável pela nucleação de trincas de fadiga em toda a região de contato, independentemente das cargas de fadiga aplicadas.

Tensões médias altas aumentaram a severidade das cargas de fadiga, diminuindo a vida em fadiga do material estudado. Este efeito foi também verificado para as 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 tratativos foram capazes de propagar as trincas iniciadas, que não se propagaram apenas sob condição de tensões compressivas.

Análises fractográficas ilustram o dano severo ao qual o material foi submetido devido às cargas de *fretting*, e que foi capaz de iniciar trincas na região de contato independente das cargas de fadiga aplicadas. Observam-se múltiplos sítios de nucleação de trincas localizadas em toda a região de contato, que formaram uma única frente de propagação, causando a ruptura do material.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo suporte financeiro, e à Empresa Brasileira de Aeronáutica - EMBRAER pelo fornecimento do material.

REFERÊNCIAS

- 1 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. 129-52.
- 2 WATERHOUSE, R. B. *Fretting* fatigue. *International Materials Reviews*, v. 37, n. 1, p. 77-98, 1992.
- 3 WARMUZEK, M. Metallographic techniques for aluminum and its alloys. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS. *Metallography and microstructures*. Metals Park, 2004. p. 711-751. (Metals handbook, 9).
- 4 ROSSINO, L. S. *Estudo do comportamento em fadiga por fretting da liga de Al 7050-T7451*. 2008. 232p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- 5 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Designation ASTM E 1382-1397: Standard test methods for determining average grain size using semiautomatic and automatic image analysis. Ohio, 1994.
- 6 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 466: Standard practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials. Pennsylvania, 1996.
- 7 MARTINS, L. H. L., et al. Detailed design of a *fretting* apparatus and test on a 7050-T7451 Al alloy. *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, v. 2, n. 1, p. 39-49, Mar. 2008.
- 8 NOWELL, D. *An analysis of fretting fatigue*. Oxford. 1988. Thesis (Doctor Phil.) - University of Oxford, 1988.
- 9 SOUZA, S.A. *Ensaio mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos*, 5. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1982.
- 10 SHARP, M. L.; NORDMARK, G. E.; MENZEMER, C. C. *Fatigue design of aluminum components & structures*. New York: Mc Graw-Hill, 1996.
- 11 ARAÚJO, J. A.; NOWELL, D. The effect of rapidly varying contact stress fields on *fretting* fatigue. *International Journal of Fatigue*, v. 24, n. 7, p. 763-75, July 2002.
- 12 NICHOLAS, T. *High cycle fatigue: a mechanics of materials perspective*. Oxford: Elsevier Science, 2006.
- 13 HUTSON, A. L., et al. Effect of sample thickness on local contact behavior in a flat-on-flat *fretting* fatigue apparatus. *International Journal of Fatigue*, v. 23, suppl. 1, p. 445-53, 2001.

Recebido em: 13/04/2009

Aceito em: 5/04/2010