

FADIGA POR FRETTING NA LIGA DE AL 7050-T7451¹

Luciana Sgarbi Rossino²

Edgar Ashiuchi³

José Alexander Araújo⁴

Waldek Wladimir Bose Filho⁵

Resumo

Ensaio de fadiga por *fretting* foram realizados para observar o efeito deste fenômeno na vida em fadiga da liga de Al 7050-T7451. As cargas de contato e a tensão alternada de fadiga foram mantidas constantes para todos os ensaios realizados, variando apenas a tensão média aplicada. Tais resultados foram comparados com curvas de fadiga convencional obtidas para o material estudado. Para observar o dano das cargas de contato, realizaram-se ensaios em condições de cargas de fadiga compressivas, em que possíveis formação de trincas paradas ocorrem somente devido ao campo de tensão local produzidas pelas cargas de *fretting* aplicadas. 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*. Existem casos que, mesmo com a diminuição da tensão média, ocorre a iniciação de trincas devido ao carregamento severo de *fretting*, e as cargas de fadiga, muito baixas para iniciar trincas, estas foram capazes de propagá-la, causando ruptura do material. Para carregamento cíclico compressivo, ocorre a iniciação de trincas devido ao campo de tensão de *fretting*, as quais não se propagam, levando o material à vida infinita. O fenômeno do *fretting* aplicado a um carregamento de fadiga reduz a vida de um componente.

Palavras-chave: Fadiga por *fretting*; Tensão média; Alumínio, Trincas paradas.

FRETTING FATIGUE IN 7050-T7451 AL ALLOY

Abstract

Fretting fatigue tests were carried out to evaluate the effect of this phenomenon on the Al alloy 7050-T7451 fatigue life. The contact loads and fatigue alternate stress were kept constant for all tests performed, only mean stress was varied. The results were compared with conventional S-N curves obtained for the studied material. To observe the damage due to the contact loads, *fretting* fatigue tests under compressive loads were performed, since in this condition any crack formation should be attributed to several stress field produced by the applied *fretting* loads. As obtained for the conventional fatigue tests, increasing the mean stress decreases the average life of the material to the case of a *fretting* fatigue. In some cases, even with the decrease in mean stress, the crack initiation occurred due to the severity of *fretting* loading and flow values of fatigue loads unable to initiate cracks, were capable to growth it, causing rupture of the material. For cyclic compressive loading, initiation of cracks occurred due to the *fretting* stress field, which did not propagate, causing the material infinite life. The *fretting* phenomenon applied to fatigue loads reduces the life of a component.

Key words: *fretting* fatigue, mean stress, aluminum, crack arrest.

¹ Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.² Doutora em Engenharia e Ciência dos Materiais, EESC, Universidade de São Paulo, Brasil

² Mestrando em Engenharia Mecânica ENM, Universidade de Brasília, Brasil

³ Prof. Dr. de Engenharia Mecânica ENM, Universidade de Brasília, Brasil

⁴ Prof. Dr. de Engenharia e Ciência dos Materiais, EESC, Universidade de São Paulo, Brasil

1 INTRODUÇÃO

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 a cargas vibratórias ou tensões cíclicas, bem como diferenças na expansão ou contração térmica devida a flutuações de temperatura.⁽¹⁾ Dois importantes fenômenos podem surgir como resultado desta ação: a) desgaste das superfícies, dando origem a um processo denominado desgaste por *fretting*, em que pequenos fragmentos de metal arrancados das superfícies em contato podem formar partículas de óxidos que, para a maioria dos metais usados em engenharia, são mais duros que o metal de origem, causando desgaste abrasivo, e b) trincas de fadiga podem ter início na região danificada levando a grandes reduções da resistência à fadiga de um. Este segundo processo é denominado fadiga por *fretting*.⁽²⁾ Testes experimentais têm mostrado que a ocorrência do *fretting* pode produzir redução de até 90% na resistência à fadiga de um material metálico.⁽³⁾ 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 ao movimento entre as duas superfícies.⁽⁴⁾ A ocorrência de *fretting* acelera o processo de iniciação de trincas: em fadiga convencional o processo de 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⁾ O objetivo deste trabalho é estudar a interação entre os fenômenos de *fretting* e fadiga para a liga de Al 7050-T7451. 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, as quais 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

2.1 Material Utilizado

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

Tabela 1. Composição química, wt%, da liga Al 7050-T7451 ⁽⁷⁾.

	Zn	Ti	Mg	Cu	Zr	Fe	Mn	Cr	Si
Nominal	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

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. Os pontos pretos correspondem a partículas inter-metálicas Al_7Cu_2Fe e Mg_2Si , características da liga Al7050-T7451.

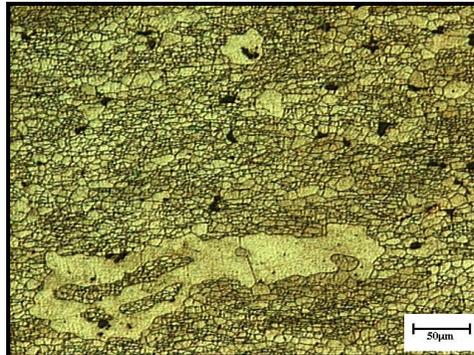


Figura 1. Tamanhos de grãos da liga Al7050-T7451, na direção T, atacada com reagente $(NH_4)_2S_2O_8$.

Na Tabela 2 relata-se as propriedades mecânicas da liga de Al 7050-T7451. Estes dados serviram de base para a determinação do limite elástico do material e foram necessárias para estimar a 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 ⁽⁸⁾

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

2.2 Ensaio de Fadiga Convencional

O limite de fadiga foi determinado para dois níveis de tensão média: 0 MPa e 120 MPa. A Figura 2 ilustra as dimensões do corpo-de-prova para os ensaios de fadiga, e estão de acordo com a norma ASTM E-466.

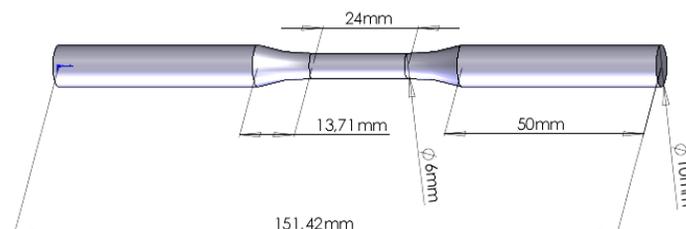


Figura 2. Dimensões do corpo-de-prova para ensaios de fadiga.

O carregamento de fadiga foi aplicado no sentido L de laminação do material, em uma máquina servo-hidráulica MTS modelo 810.23M, com capacidade de 250 KN. A frequência 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 corpo de prova.

2.3 Ensaios de Fadiga por *Fretting*

Para a realização de ensaios de fadiga por *fretting*, foi utilizado um aparato experimental, montado na máquina de ensaios MTS-810, como ilustra a Figura 3.

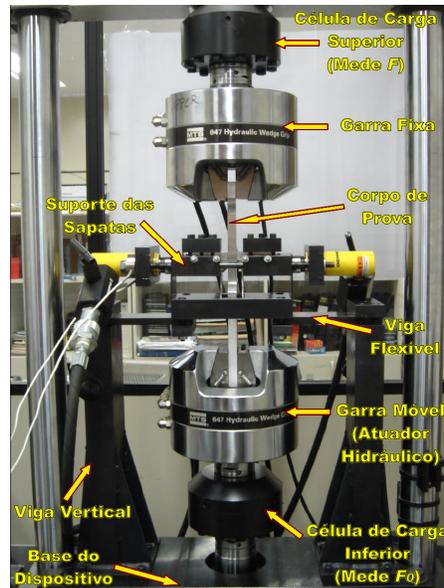


Figura 3. Dispositivo de *fretting* utilizado para a realização dos ensaios de fadiga por *fretting* montado em uma máquina servo-hidráulica MTS-810.

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. As forças envolvidas no fenômeno de fadiga por *fretting* estão apresentadas na Figura 4. 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 4(b).

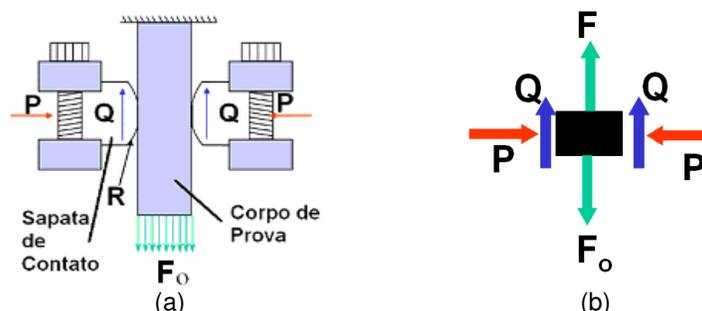


Figura 4. Forças envolvidas (a) no contato (b) diagrama de forças.

A configuração de contato adotada foi cilíndrico-plana. As dimensões do corpo de prova e sapata de contato utilizadas no desenvolvimento dos ensaios estão ilustradas na Figura 5.

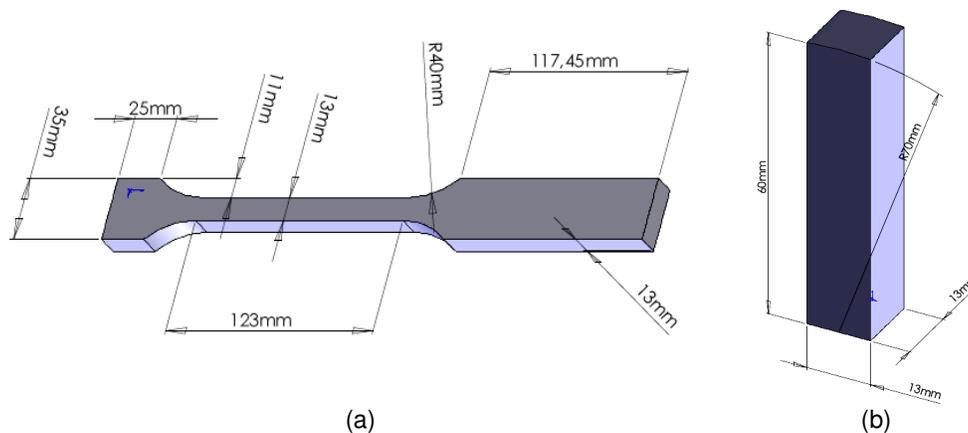


Figura 5. Dimensões (a) corpo-de-prova (b) sapata de contato, para os ensaios de fadiga por *fretting*.

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 3. Um método analítico proposto por Nowell⁽⁹⁾ foi usado para estimar o coeficiente de fricção na zona de escorregamento, cuja média encontrada foi de 0,54. O procedimento realizado está devidamente explicado em Martins et al.⁽¹⁰⁾

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	f	Q [kN]	σ_m [MPa]
92,7	15,7	350	8,5	0,25	0,54	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 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 6, isto é, P e F_m são carga estática e Q e F_0 são funções senoidais do tempo e terão a mesma frequência 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. Os ensaios foram realizados a uma frequência de 10 Hz.

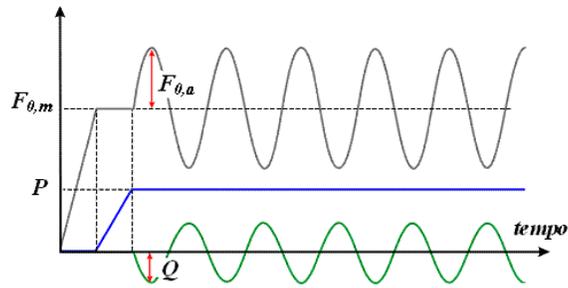


Figura 6. Modo de aplicação das cargas do teste de *fretting*.

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, o que corresponde a dizer 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, as quais 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 devido ao carregamento de fadiga.

2.4 Análise das Trincas Paradas

Para a configuração de ensaio adotada neste trabalho observa-se, na Figura 7(a), que existem um par de sapatas pressionadas contra o corpo de prova, em que cada qual é responsável pela produção de uma zona de desgaste na região de contato (Figura 7b).

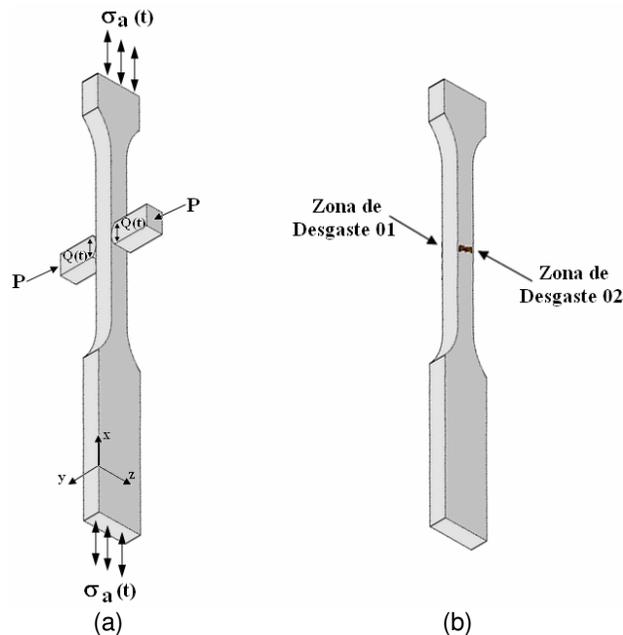


Figura 7. Superfícies em contato (a) regiões de contato entre a sapata e o corpo de prova (b) zonas de desgaste formadas devido ao desgaste por fadiga por *fretting*.

Esta região foi, então, analisada tanto superficialmente como sub-superficialmente (em sua espessura) para a determinação dos mecanismos de desgaste que regem o processo de dano e observação de possíveis trincas paradas

formadas em toda a região de contato. Estas análises foram realizadas nos corpos de prova submetidos a uma condição de ensaio a qual resultou em vida infinita do corpo de prova testado. A região do contato foi separada do corpo de prova, e as marcas de contato produzidas no ensaio foram analisadas, onde os eixos e posição das trincas analisadas com relação às cargas aplicadas estão identificados na Figura 8. Para análise das trincas e desgaste sub-superficial produzido, a região a ser analisada foi lixada e polida, obtendo-se acabamento espelhado, posteriormente atacada com reagente $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ e analisada em microscópio óptico.

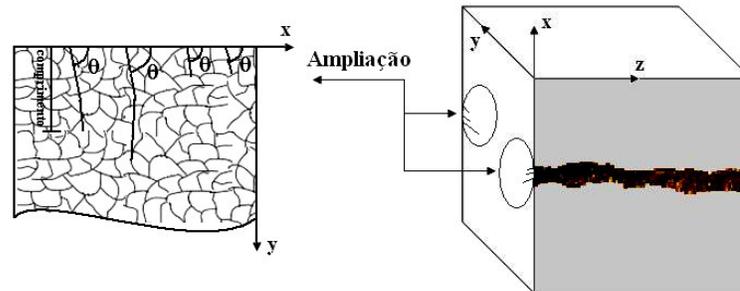


Figura 8. Esquema ilustrativo da análise das trincas e desgaste produzidos na região de contato.

3 RESULTADOS

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

Através da equação de Basquin (1910), e fazendo-se o ajuste linear (através do método dos mínimos quadrados) dos pontos obtidos nos ensaios de fadiga convencional, obteve-se o limite de fadiga do material para as duas condições estudadas, Figura 9. Para uma tensão média de 0 MPa, o limite de fadiga do material, considerada para uma vida de 10^7 ciclos, é obtido para uma tensão alternada de 146,4 MPa, sendo que para a tensão média de 120 MPa, o limite é obtido para uma tensão alternada de 102,2 MPa.

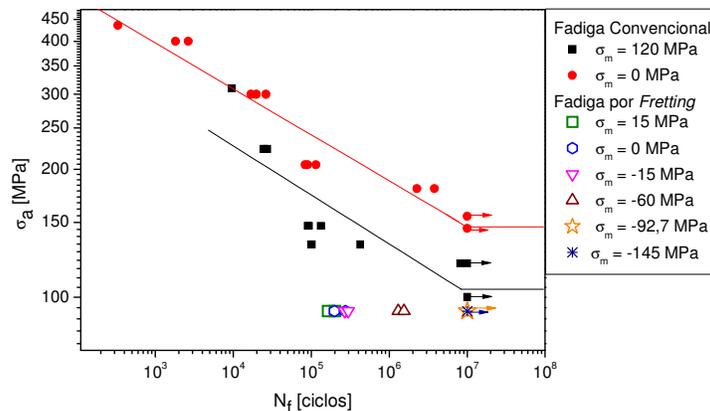


Figura 9. Curva S – N para os ensaios de fadiga convencional e fadiga por *fretting*.

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. A Figura 10 ilustra o efeito do *fretting* na resistência à fadiga da liga de alumínio estudada. Para a condição em que a tensão média é nula, para a mesma vida obtida de $2,37 \cdot 10^5$

ciclos, a amplitude de tensão alcançada para a condição de fadiga convencional é de aproximadamente 219,5 MPa, enquanto que este valor cai para 92,7 MPa para o caso de fadiga por *fretting*. Esta redução na amplitude de tensão obtida, para o mesmo número de ciclos alcançados, demonstra 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 *fretting* reduz substancialmente a resistência à fadiga do material estudado.

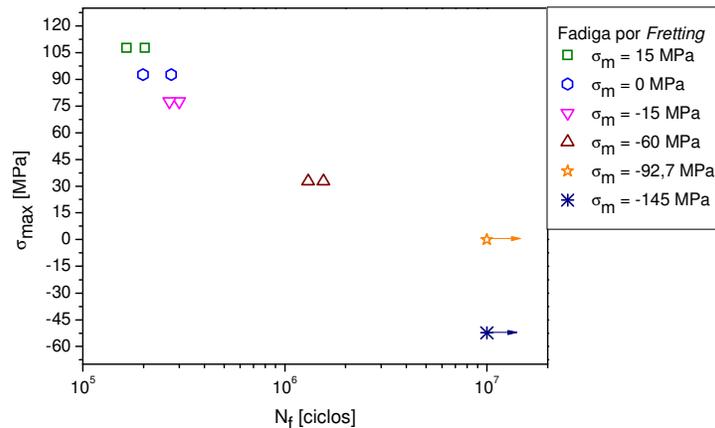


Figura 10. Efeito da tensão média na vida em fadiga por *fretting*.

3.2 Análise da Região de Contato

A Figura 11 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. As trincas iniciadas, após alcançarem alguns micra, formaram uma única frente que se propagou perpendicular à superfície de carregamento principal, determinada pela região B. Com o aumento progressivo da tensão, o processo ficou quase que monotônico e a fratura por colapso plástico aconteceu, determinado pela região C. Observa-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 causado pela frente de propagação do lado A.

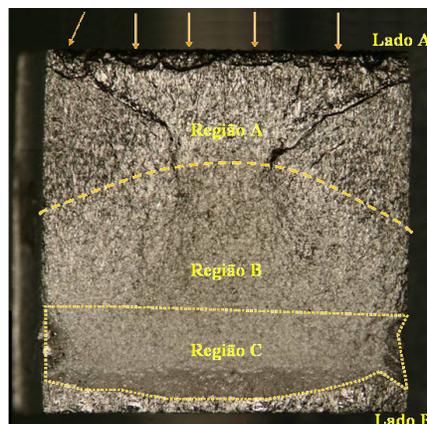


Figura 11. Superfície de fratura de um corpo de prova ensaiado em fadiga por *fretting* sem aplicação de tensão média, observada em microscópio estereoscópico.

Múltiplos sítios de iniciação de trincas podem ser observados analisando-se a superfície de contato para ensaios que alcançaram vida infinita (Figura 12a), indicados pelas setas. Estas trincas são geradas devido às condições de carregamento e desgaste severos produzidos pelo fenômeno de fadiga por *fretting*.

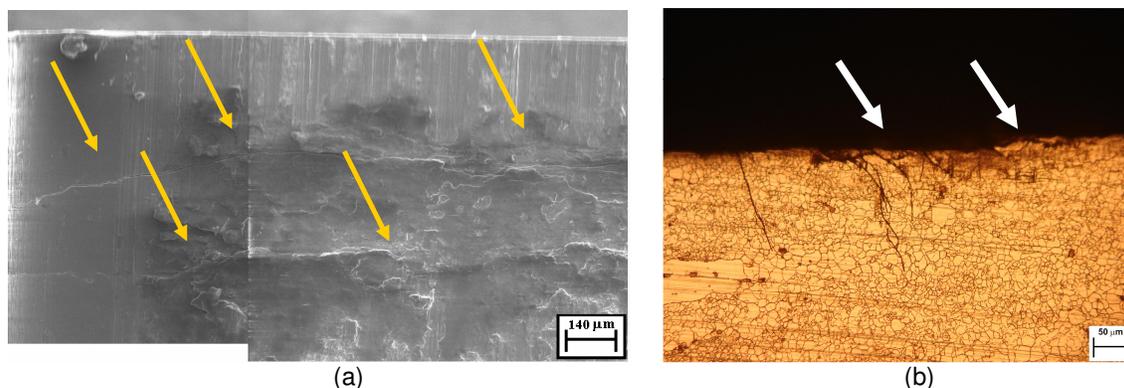


Figura 12. (a) Trincas superficiais (b) trincas paradas observadas na zona de escorregamento da região de contato, geradas no ensaio realizado para uma tensão média de -92,7 Mpa.

A análise de trincas paradas foi realizada em corpos de prova ensaiados a uma tensão média de -92,7 MPa. A Figura 12(b) confirma a presença de múltiplas trincas paradas, geradas na região de escorregamento, confirmando as condições severas à qual o material foi submetido próximo a superfície de contato. As setas ilustram o mecanismo de desgaste responsável pela formação de detritos de desgaste, denominado de delaminação. Os detritos de desgaste formados ficaram aprisionados na zona de escorregamento e, devido à ductilidade do alumínio e sua alta resistência à oxidação, estes detritos formaram uma camada aderida entre as superfícies em contato. As trincas paradas não evoluíram para fratura, pois a carga cíclica de fadiga remota ao contato não foi suficiente para propagá-la. As trincas crescem tanto inter como intra-granularmente.

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, 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.

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 10, 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 paradas para esta condição de ensaio, como ilustra a Figura 12(b).

Calculou-se o campo de tensão gerado nos ensaios de fadiga por *fretting*, de acordo com a metodologia utilizada em Rossino et. Al.⁽¹³⁾ A Figura 13 mostra a variação do valor máximo de $\sigma_{xx,max}$ com relação a y/a , para $x/a = -1$ (*hot spot*).

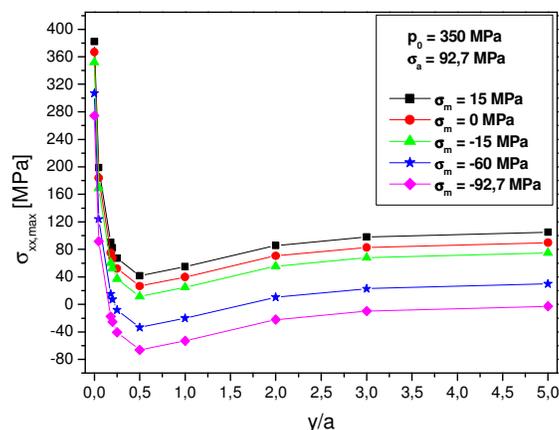


Figura 13. Variação de $\sigma_{xx,max}$ com a profundidade y/a , a partir de $x/a = -1$

Observa-se que, na superfície do contato ($y/a = 0$), $\sigma_{xx,max}$ é positiva e de grande magnitude para todas as tensões médias aplicadas. Isto demonstra a severidade do campo de tensão para estas condições de ensaio, o que pode estar associado à iniciação das trincas, mesmo na presença de cargas médias remotas compressivas. Para o caso em que a tensão média é de -92,7 MPa, a componente $\sigma_{xx,max}$ torna-se negativa para valores de aproximadamente $y/a = 0,15$. Nestes casos, o alto valor de $\sigma_{xx,max}$ na proximidade da superfície de contato favorece a iniciação de trincas, as quais não se propagaram até à ruptura do componente devido as significantes tensões compressivas que surgem ainda bem próximas a superfície.

O fenômeno do *fretting* gera uma concentração de tensão, que decresce a partir da superfície.⁽¹⁴⁾ 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*.⁽¹⁵⁾ Hutson et al.⁽¹⁶⁾ 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 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, 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 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 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.

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 do material estudado. 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, e a EMBRAER, pelo suprimento de materiais.

REFERÊNCIAS

- 1 HUTCHINGS, I.M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Cambridge: Butterworth-Heinemann, 1992. 280p.
- 2 FOUVRY, S.; KAPSA, P.; VINCENT, L. *Fretting* wear and *fretting* fatigue: relation through a mapping concept. In: HOEPPNER, D. W.; CHANDRASEKARAN, V.; ELLIOTT, C. B. *Fretting* fatigue: current technology and practices. ASTM STP 1367. West Conshohocken: ASTM, 2000, p. 49–64.
- 3 MCDOWELL, J. R. *Fretting* corrosion tendencies of several combinations of materials. In: SYMPOSIUM ON *FRETTING* CORROSION, 1953, Philadelphia. Proceedings... Philadelphia: ASTM STP 144, 1953, p. 24-9.
- 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 WARMUZEK, M. Metallographic Techniques for Aluminum and Its Alloys. Metallography and Microstructures, v. 9, ASM Handbook, ASM International, 2004. p. 711-751.
- 8 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/SP, 2008.
- 9 NOWELL, D. An Analysis of *Fretting* Fatigue, Oxford. 1988. Thesis (Doctor Phil.) - University of Oxford.
- 10 MARTINS, L. H. L.; ROSSINO, L. S.; BOSE FILHO, W. W.; ARAUJO, J. A. Detailed design of a *fretting* apparatus and test n a 7050-T7451 Al alloy. Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces, v. 2, p. 39-49, 2008.
- 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 ROSSINO, L. S., MANFRINATO, M. D., MARTINS, L. H. L., ARAUJO, J. A., BOSE FILHO, W. W. Estudo do Gradiente de Tensão gerado em Fadiga por *Fretting* In: Congresso Annual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007, Vitória/ES. 62 Congresso Anual da ABM. , 2007. v.1. p.4462 – 4472.
- 14 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.
- 15 NICHOLAS, T. High Cycle Fatigue: A Mechanics of Materials Perspective. Oxford : Elsevier Science, 2006. 656p.
- 16 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.