

**ESTUDO DA CORROSÃO E FADIGA NA LIGA AA2524-T3 DE GRAU AERONÁUTICO COM E SEM FRICTION STIR WELDING (FSW)**

Murilo O. Ferreira<sup>1\*</sup>, Milena S. dos Santos<sup>2</sup>, Gabriel Sherma de Carvalho<sup>3</sup>, Maryna Taryba<sup>4</sup>, João C. S. Fernandes<sup>5</sup>, Waldek W. Bose Filho<sup>6</sup>, Jéferson A. Moreto<sup>7,8</sup>

1. Estudante da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM)
2. Estudante da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM)
3. Estudante da Universidade de São Paulo (USP)
4. Pesquisadora do Instituto Superior Técnico (IST-Lisboa)
5. Professor do Instituto Superior Técnico (IST-Lisboa)
6. Professor Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP)
7. Professor da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM)
8. Professor visitante do Instituto Superior Técnico (IST-Lisboa)

**Resumo**

A soldagem por fricção (do inglês, *Friction Stir Welding* - FSW) pode ser utilizada para a junção de ligas de Al da série 2xxx de alta resistência mecânica. Todavia, o processo FSW provoca mudanças microestruturais, alterando as propriedades mecânica e corrosiva dos materiais. O objetivo geral do presente trabalho foi estudar o processo de corrosão localizada e a sinergia corrosão-fadiga da liga AA2524-T3 soldada via FSW. As técnicas eletroquímicas SVET, micropotenciometria e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) foram utilizadas para entender o processo de corrosão localizada e global das diferentes regiões soldadas: MB, *nugget*, HAZ e TMAZ. Os testes de corrosão-fadiga foram realizados utilizando uma razão de carga  $\sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0,1$ , frequência de 15 Hz para o ar e 1 Hz em solução salina e onda senoidal. Estudos foram realizados a fim de compreender a influência dos compostos intermetálicos (IMs) e da mudança microestrutural advinda do processo FSW na corrosão global e localizada e nas curvas da/dN vs.  $\Delta K$ . A mudança microestrutural da liga AA2524-T3 afetou as curvas de propagação de trinca por fadiga em ambas as condições. Os processos de dissolução nas regiões soldadas são predominantemente eletroquímicos.

**Palavras-chave:** Sinergia corrosão-fadiga; Combinação SVET-SIET; Indústria aeronáutica.

**Apoio financeiro:** UFTM e CNPq processo: 402142/2016-0.

**Trabalho selecionado para a JNIC:** UFTM.

**Introdução**

A indústria aeronáutica tem buscado constantemente pelo desenvolvimento de materiais que forneçam estruturas leves, duráveis e de baixo custo. As ligas de alumínio (Al) da série 2xxx são amplamente utilizadas pela indústria aeronáutica devido à sua baixa densidade, alta plasticidade, alta condutividade térmica e elétrica, boas propriedades mecânica e corrosiva [1].

A liga AA2524-T3 (produzida pela ALCOA) tem como principais elementos de liga o Cu e Mg e pode ser utilizada como material de fuselagem [2]. As propriedades mecânicas da liga AA2524-T3 são aprimoradas devido ao tratamento térmico de solubilização. Entretanto, o tratamento térmico causa o surgimento de IMs que possuem potenciais eletroquímicos diferentes da matriz metálica e são prejudiciais ao processo de corrosão localizada [3, 4].

O processo FSW aparece como uma alternativa à soldagem convencional e apresenta algumas vantagens para as ligas de Al [5], tais como: menos calor durante o processo [6], ausência de porosidade [7] e limitação de defeitos normalmente encontrados na soldagem em estado líquido [8-10]. No entanto, o FSW é um processo termomecânico que pode causar modificações na microestrutura dos materiais e fornecer um meio contínuo de crescimento de trincas por fadiga. Além disso, as alterações microestruturais podem promover diferentes desempenhos corrosivos nas regiões de soldagem, incluindo, zona de recristalização (chamada de *nugget*), zona termomecanicamente afetada (do inglês, *thermo-mechanically affected zone*, TMAZ) e zona termicamente afetada (do inglês, *heat affected zone*, HAZ).

Há inúmeros trabalhos publicados na literatura sobre o efeito da microestrutura na corrosão e corrosão-fadiga em ligas de Al da série 2xxx, especialmente na liga AA2024-T3. Entretanto, este é o primeiro estudo sobre o efeito da microestrutura da liga AA2524-T3 soldada via FSW no processo de corrosão localizada e na sinergia corrosão-fadiga. O objetivo geral do presente trabalho foi estudar o processo de corrosão e a sinergia corrosão-fadiga da liga AA2524-T3 soldada via FSW em ar e em meio contendo íons cloreto.

**Metodologia**

O material utilizado no desenvolvimento deste trabalho foi a liga de Al da série 2xxx com designação 2524, na condição T3 para o uso em fuselagem. O processo de soldagem FSW foi realizado na liga AA2524-T3

na condição como recebida utilizando uma máquina *Friction Stir Welding and Processing Machine*, modelo RM1, *Manufacturing Technology Inc.* LNNano/CNPEM/CNPq, sendo que o pino utilizado possui diâmetro de 3,8 mm, massa de 1,4 mg (tratado) e o diâmetro do ombro de 10 mm. No processo de soldagem foi utilizada uma penetração de 1,18 mm, velocidade angular e de travessia de 1200 rpm e 150 mm s<sup>-1</sup>, respectivamente.

Amostras da liga AA2524-T3 com e sem soldagem foram polidas com lixas de SiC na sequência de 800, 1200, 2400 e 4000#. O acabamento superficial foi realizado com pasta de diamante de 3, 1 e 0,5 µm. Após, foram lavadas com água destilada e colocadas em ultrassom por um período de 10 min na presença de álcool isopropílico. A fim de estudar a microestrutura das diferentes regiões (TMAZ, HAZ, MB e *nugget*) foi utilizado o reagente Keller. As imagens de microscopia ótica (MO) foram obtidas usando um microscópio Leica M205A.

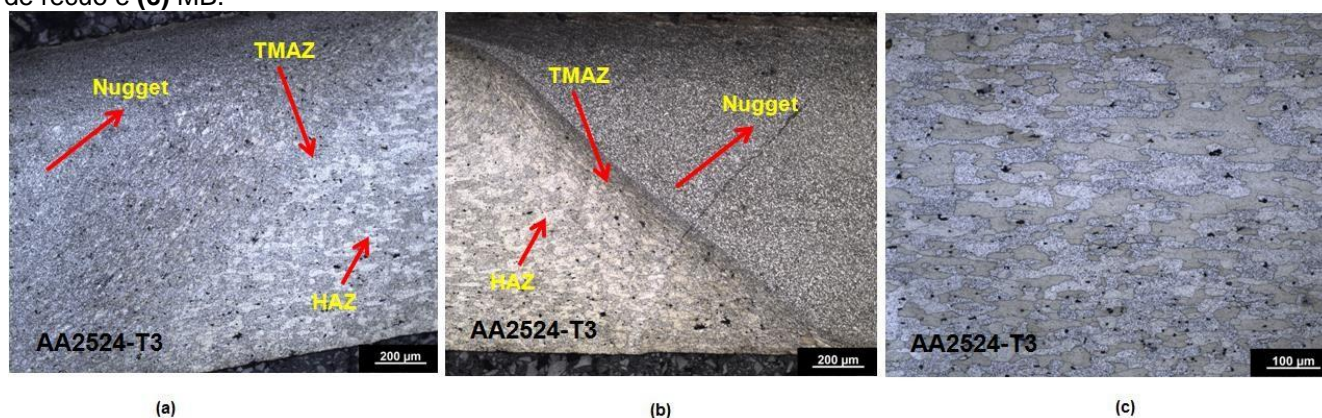
Os ensaios de propagação de trinca por fadiga (do inglês, *Fatigue Crack Growth - FCG*) foram realizados na liga AA2524-T3 com e sem soldagem. Para isso, utilizou-se uma máquina servo-hidráulica MTS com capacidade de 100 kN, seguindo as especificações da norma ASTM 647-15 [11], tanto para o ar quanto para a solução salina. Os ensaios de FCG em ar foram realizados sobre carga controlada, forma de onda senoidal, frequência de 15 Hz e razão de carga de  $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0,1$ . Os ensaios de FCG em solução salina (3,5 w.t% NaCl) foram realizados com uma frequência de 1 Hz e mesma razão de carga.

As diferentes regiões de soldagem foram avaliadas via técnicas eletroquímicas localizadas, a citar: eletrodo vibratório de varrimento e micropotenciometria (pH local) em solução de 0,05 mol L<sup>-1</sup> NaCl. A técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) foi utilizada para estudar o processo de corrosão global das regiões MB e *nugget*. Para tanto, foi utilizada uma célula eletroquímica de três eletrodos: MB e *nugget* como eletrodo de trabalho, contra eletrodo de platina e eletrodo de calomelano saturado como referência. Os diagramas de EIE foram obtidos a um potencial 20 mV inferior ao potencial de circuito aberto, numa faixa de frequência de 66 kHz a 10 mHz e uma amplitude de onda de 10 mV (rms), em uma solução de 0,6 mol L<sup>-1</sup> NaCl à temperatura ambiente, usando um potenciostato/galvanostato Gamry 600+.

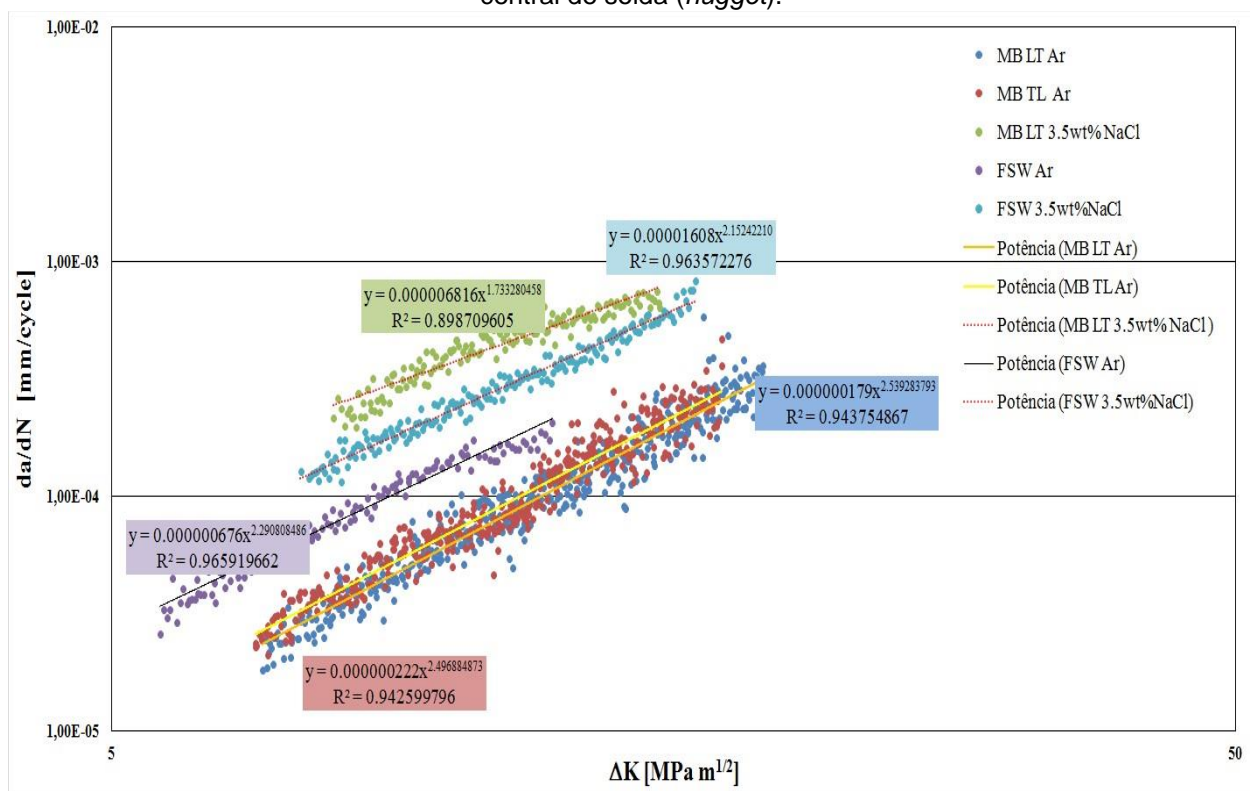
## Resultados e Discussão

A **Figura 1** mostra uma imagem obtida via MO das diferentes zonas de soldagem **(a)** liga AA2524-T3 lado do avanço, **(b)** lado do retrocesso e **(c)** MB. A região HAZ sofre intensa mudança de temperatura, devido ao calor gerado durante a deformação plástica nas regiões *nugget* e TMAZ, induzindo precipitação e reprecipitação. A região TMAZ é caracterizada pela presença de grãos distorcidos, devido à deformação causada pelo movimento da ferramenta de soldagem e por grãos cada vez mais refinados à medida que se aproximam da interface do *nugget*. O *nugget* possui uma estrutura de grãos equiaxiais superfinais que está diretamente relacionada ao processo de recristalização. O MB apresentou grãos alongados na direção de rolamento, uma vez que não foi exposto a efeitos mecânicos e gradientes de temperatura.

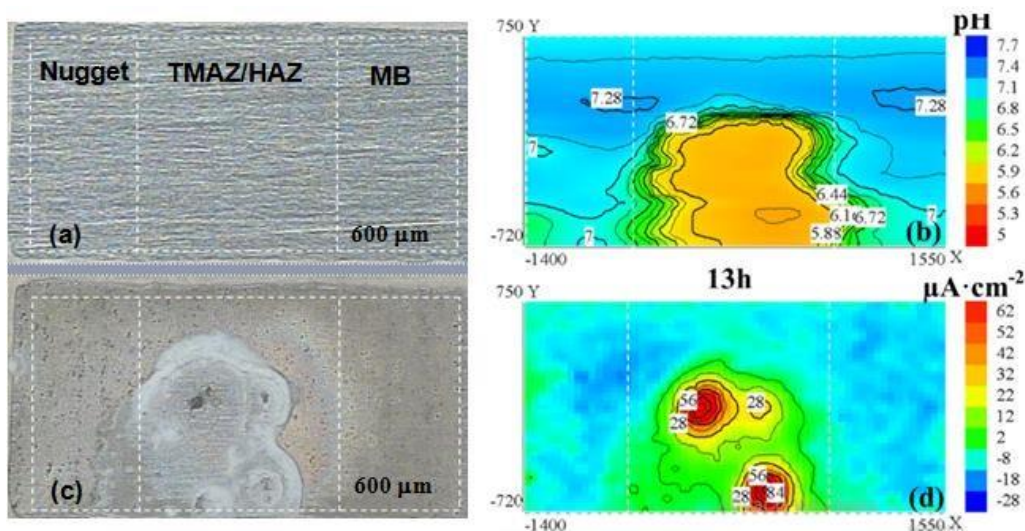
**Figura 1.** Imagem obtida via MO das diferentes zonas de soldagem **(a)** liga AA2524-T3 lado do avanço, **(b)** lado de recuo e **(c)** MB.

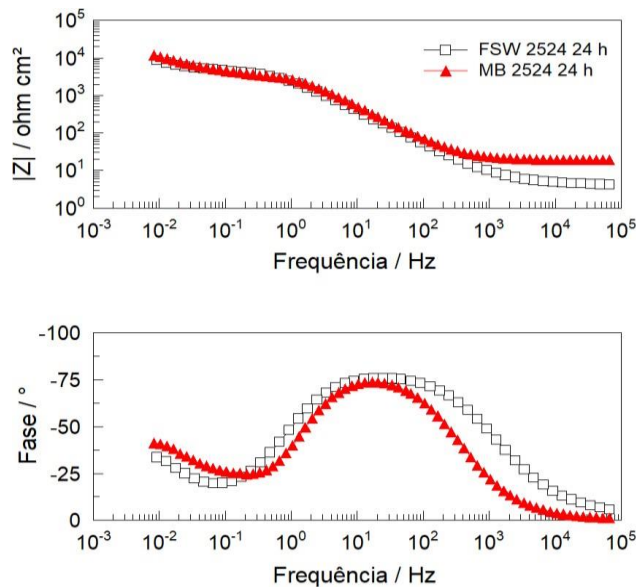


As curvas de propagação de trinca por fadiga,  $da/dN$ , em função da variação do fator de intensidade de tensão,  $\Delta K$ , para a liga AA2524-T3 com e sem FSW em ar e meio de solução de NaCl são apresentadas na **Figura 2**. Comparando as curvas de propagação de trinca por fadiga do material sem solda em ar, para as direções LT e TL, observou-se que os valores de  $m$  permaneceram bastante próximos (2,54 TL e 2,50 LT), enquanto os valores de  $A$  são  $1,79 \times 10^{-7}$  e  $2,22 \times 10^{-7}$  [(mm/ciclo)/(MPa.m<sup>1/2</sup>) m], respectivamente. Com relação aos testes de fadiga da liga AA2524-T3 soldada via FSW em ar, foi possível verificar um aumento nas taxas de propagação de trinca para maiores valores de  $\Delta K$ , onde a microestrutura tem grande influência. Os valores de  $m$  e  $A$  são 2,29 e  $6,76 \times 10^{-7}$  [(mm/ciclo)/(MPa.m<sup>1/2</sup>) m], respectivamente. Os resultados mostraram que o meio corrosivo promoveu taxas mais altas de propagação de trinca por fadiga, causando mudanças nos valores de  $m$  e  $A$  na curva de Paris-Erdogan. Os valores de  $m$  e  $A$  obtidos foram 2,15 e  $1,63 \times 10^{-5}$  [(mm/ciclo)/(MPa.m<sup>1/2</sup>) m], respectivamente.

**Figura 2.** Curvas da/dN vs.  $\Delta K$  da liga AA2524-T3 com e sem FSW, com trincas propagando ao longo da linha central de solda (*nugget*).

As técnicas localizadas mostraram que um processo de corrosão ativo foi observado ao longo de todo o tempo de imersão, registrando elevadas densidades de corrente anódica e catódica depois até o período de 24 h de imersão (**Figura 3**). Os valores de pH registrados estavam de acordo com as distribuições correspondentes de densidade de corrente. As zonas anódicas foram levemente acidificadas e o número de zonas anódicas ativas aumentou durante o tempo de imersão. O MB e o *nugget* mostraram uma atividade catódica, enquanto a fronteira TMAZ/HAZ apresentou uma atividade anódica e mais susceptível ao processo de corrosão em solução contendo íons cloreto. A **Figura 4** apresenta o espectro de Bode da liga AA2524-T3 com e sem soldagem. Os resultados de EIE para o MB e os agora obtidos na região do *nugget* indicaram a presença de um filme de óxido sobre a matriz metálica, responsável por uma constante de tempo em altas frequências. Ademais, uma segunda constante de tempo é evidente em baixas frequências, provavelmente devido a processos de corrosão localizada [4]. O processo FSW não afetou significativamente a resistência ao processo de corrosão da liga AA2524-T3 em meio contendo íons cloreto.

**Figura 3.** (a) Micrografia óptica no início da imersão, (b) distribuições de densidade de corrente, (c) micrografia óptica da superfície da amostra seca após 24 h de imersão e (d) pH em solução  $0,05 \text{ mol L}^{-1}$  NaCl após 13 h de imersão.

**Figura 4.** Espectro de Bode da liga AA2524-T3 com e sem soldagem em meio de solução 0,6 mol L<sup>-1</sup> NaCl.

### Conclusões

A liga AA2524-T3 foi projetada, especificamente, para apresentar melhores propriedades mecânica e corrosiva quando comparada à liga AA2024-T3 amplamente utilizada pela indústria aeronáutica. No presente trabalho de pesquisa, estudamos o efeito da microestrutura da liga AA2524-T3 soldada via FSW nas curvas de propagação de trinca por fadiga ( $da/dN$  vs.  $\Delta K$ ) e no processo de corrosão localizada e global. O processo FSW foi obtido com sucesso na junção de placas da liga AA2524-T3. A partir de estudos morfológicos, foi possível verificar uma redução no tamanho dos grãos na região do *nugget*, que por sua vez afetou as taxas de propagação de trinca por fadiga. Os testes de corrosão localizada mostraram que o MB e o *nugget* mostraram uma atividade catódica, enquanto a fronteira TMAZ/HAZ apresentou uma atividade anódica e mais susceptível ao processo de corrosão em solução contendo íons cloreto. Os espectros de EIE mostraram que o processo FSW não influenciou significativamente na resistência à corrosão da liga AA2524-T3 em meio contendo íons cloreto.

### Referências bibliográficas

- [1] Gopikrishna S, Binu CY, Study of effects of T6 heat treatment on grain refined A319 alloy with magnesium and strontium addition. *International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering*, v.2, p. 59-62, 2013.
- [2] ASM Metals Handbook. Corrosion. Formerly 9<sup>th</sup> edition, 1990.
- [3] Wei, RP., Liao, CM., Gao, M, A transmission electron microscopy study of constituent-particle-induced corrosion in 7075-T6 and 2024-T3 aluminum alloys. *Metall. Mater. Trans. A*, 29A, p. 1153-1160, 1998.
- [4] Moreto JA, Marino CEB, Bose Filho WW, Rocha LA, Fernandes JSC, SVET, SKP and EIS study of the corrosion behaviour of high strength Al and Al-Li alloys used in aircraft fabrication. *Corrosion Science*. 2014;84:30-41.
- [5] Milagre MX, Mogili NV, Donatus U, Giorjão RAR, Terada M, Araujo JVS, Machado CSC, Costa I, On the microstructure characterization of the AA2098-T351 alloy welded by FSW. *Materials Characterization* 140 (2018) 233-246.
- [6] Mingrun Yu, Hongyun Zhao, Zihua Jiang, Zili Zhang, Fei Xu, Li Zhouab, Xiaoguo Song, Influence of welding parameters on interface evolution and mechanical properties of FSW Al/Ti lap joints. *J. Mater. Sci. Technol.* 35(2019) 1543-1554.
- [7] Peng Liu, Siyu Sun, Jiaying Hu, Effect of laser shock peening on the microstructure and corrosion resistance in the surface of weld nugget zone and heat-affected zone of FSW joints of 7050 Al alloy. *Optics and Laser Technology* 112 (2019) 1-7.
- [8] Texiera D, Atmania F, Bocher P, Nadeau F, Chen J, Zedan Y, Vanderesse N, Demers V, Fatigue performances of FSW and GMAW aluminum alloys welded joints: Competition between microstructural and structural-contact-fretting crack initiation. *International Journal of Fatigue* 116 (2018) 220-233.
- [9] Dawes C, Thomas W, Friction stir process welds aluminum alloys. *Welding Journal*. 75, p. 41-45, 1999.
- [10] Mishra RS, Ma ZY, Friction stir welding and processing. *Material Science and Engineering: R: Reports*. 50(1-2), p. 1-78, 2005.
- [11] American Society for Testing and Materials, ASTM E647: Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 2008