

Investigação da resistência à corrosão das ligas de alumínio 2024-T3 e 7475-T651 soldadas por fricção e mistura (FSW)

Aline F. S. Bugarin^a, Maysa Terada^b, Fernanda M. Queiroz^c, Hercílio G.de Melo^d, Rubens N. F. Júnior^e e Isolda Costa^f

Resumo

A resistência à corrosão de ligas AA2024-T3 e AA7475-T761 unidas pelo processo de soldagem por fricção e mistura (FSW) foi investigada em solução 0,01 M de NaCl. Os ensaios realizados foram medidas de potencial de circuito aberto (OCP) em função do tempo e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE). Os resultados de OCP mostraram menores potenciais para as regiões afetadas pela soldagem do que o das duas ligas base e os de EIE indicaram ataque localizado para longos tempos de ensaio na zona de mistura (ZM) e na zona termomecanicamente afetada (ZTMA) da liga AA7475-T761.

Palavras-chave: Soldagem por fricção e mistura (FSW), Ligas AA2024 e AA7475, Resistência à Corrosão.

Introdução

Em 1991, o The Welding Institute (TWI) desenvolveu o processo de soldagem por fricção e mistura (FSW) que é realizado em temperaturas abaixo do ponto de fusão dos materiais (1,2,3,4). Uma vez que este ocorre no estado sólido, envolve menor transferência de calor, além de não ser necessário o uso de metal de adição ou proteção gasosa, evitando problemas como trincas, distorções, porosidades e tensões residuais (5,6,7). Apesar das vantagens do processo FSW, este provoca mudanças microestruturais significativas nas regiões afetadas pelo processo, gerando zonas com diferentes microestruturas em contato direto, o que pode afetar a resistência à corrosão dos materiais soldados.

Na soldagem por FSW, as zonas com microestruturas diversas são denominadas como metal base (MB), ou região que não sofre influência do processo de soldagem; a zona de mistura (SZ ou ZM), ou zona em que há contato entre o pino da ferramenta em rotação e o material soldado; a zona termomecanicamente (ZTMA) afetada, ou zona em que há efeito de deformação no material devido ao contato entre o ombro da ferramenta de soldagem em rotação e o material soldado; e a zona termicamente afetada (ZTA), ou zona em que há apenas efeito da temperatura sobre a microestrutura, não ocorrendo deformação no material (1,6,8,11).

^a Mestre, Tecnóloga em materiais - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

^b PHD, Engenheira de materiais - Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais

^c PHD, Engenheira química - Escola Politécnica de São Paulo

^d PHD, Engenheiro químico - Escola Politécnica de São Paulo

^e PHD, Engenheiro Elétrico - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

^f PHD, Engenheira química - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

O efeito da soldagem FSW na resistência mecânica das ligas de alumínio, particularmente as usadas em aeronaves, é de grande importância e, como tal, vem sendo estudado, seja no caso de ligas similares (9,10), ou de ligas dissimilares (6,11,12). Por outro lado, a caracterização da resistência à corrosão destas ligas, particularmente por métodos eletroquímicos, é ainda relativamente escassa (8,13,14). Em relação às juntas dissimilares entre ligas da série 2XXX e 7XXX, trabalhos recentes com técnicas eletroquímicas locais em meios de sulfato evidenciaram o efeito do acoplamento galvânico na região da junta soldada (7,15,16). No presente estudo, a resistência à corrosão das ligas de alumínio 2024-T3 e 7475-T761, unidas por FSW foi investigada em solução 0,01 M de NaCl utilizando técnicas microscópicas associadas a técnicas eletroquímicas com o objetivo de identificar o efeito da soldagem na microestrutura e a correlação entre esta e a corrosão destas ligas.

Metodologia

O material utilizado neste trabalho foi produzido pela ALCOA e fornecido pela *Embraer* na forma de chapa, com 2 mm de espessura, das ligas de alumínio 2024-T3 (Al-4,80Cu-1,60Mg-0,64Mn-0,22Fe-0,19Si-Zn0,08Zn-0,04Cr-0,05Ti) e 7475-T761 (Al-6,20Zn-1,90Mg-1,70Cu-0,22Cr-0,12Fe-0,15Si-0,04Ti-0,02Mn), já soldadas por FSW. A rotação do pino da ferramenta de soldagem foi no sentido anti-horário, com a liga 2024 no lado do avanço (LA), e a 7475 no lado do retrocesso (LR). As superfícies das amostras foram preparadas por lixamento e polimento com suspensão de diamante até 1 μm . As análises de microscopia foram realizadas com auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) e microscópio óptico. Os ensaios eletroquímicos foram realizados em solução 0,01 M de NaCl, naturalmente aerada e a (22 ± 1) °C. Nestes ensaios foi utilizado um arranjo experimental de três eletrodos, com referência (ER) de Ag/AgCl KCl_{sat}, um fio de platina como contra eletrodo (CE) e eletrodo de trabalho (ET) com área igual a 0,035 cm². Os ensaios de EIE foram realizados em triplicata no PCA, em um intervalo de frequência de 10 kHz a 10 mHz, com frequência de aquisição de dados de 10 pontos/década e amplitude de perturbação de 20 mV (rms).

Resultados e discussão

A Figura 1 (a-c) mostra micrografia obtida por MEV das regiões afetadas pelo processo de soldagem. Na ZM, Figura 1 (b), tem a junção dos dois materiais, com formação de “dentes” em que as áreas mais escuras (lado esquerdo) são referentes à liga 2024, enquanto as áreas mais claras (lado direito), à liga 7475. Na ZM e ZTMA pode ser notado que os precipitados seguem um fluxo preferencial no sentido de rotação do pino de soldagem. Ao afastar-se das zonas ZM e ZTMA, a microestrutura torna-se similar à do MB, como mostram a Figura 1 (a) para a liga 2024 e Figura 1 (c) para a liga 7475. Análises microscópicas da superfície não permitiram identificar a extensão da ZTA. Com isso, nos ensaios eletroquímicos serão consideradas as zonas ZM, ZTMA e MB.

A Figura 2 (a) mostra os resultados de PCA em função do tempo para as zonas ensaiadas. O potencial das zonas afetadas pelo processo de soldagem das duas ligas foram inferiores aos das zonas não afetadas das duas ligas (MB). Valores intermediários de potencial em relação às ZTMAs das duas ligas foram medidos para a ZM, indicando efeito de acoplamento galvânico nesta região. Os maiores valores de potencial foram obtidos para o MB da liga 2024, e grandes oscilações de potencial foram associadas a esta zona, indicando sua alta instabilidade eletroquímica. Os menores valores de potencial, por sua vez foram associados à liga 7475, provavelmente pela presença de zinco como elemento de liga. Com o tempo de ensaio, os

valores de PCA da ZM tenderam a se aproximar aos da ZTMA da liga 7475, observando-se que no acoplamento galvânico, esta última atua como ânodo. Os resultados de PCA evidenciaram o efeito do processo FSW na microestrutura das ligas, resultando em modificações significativas nos potenciais em relação aos potenciais dos MBs, portanto, afetam o comportamento eletroquímico do material soldado.

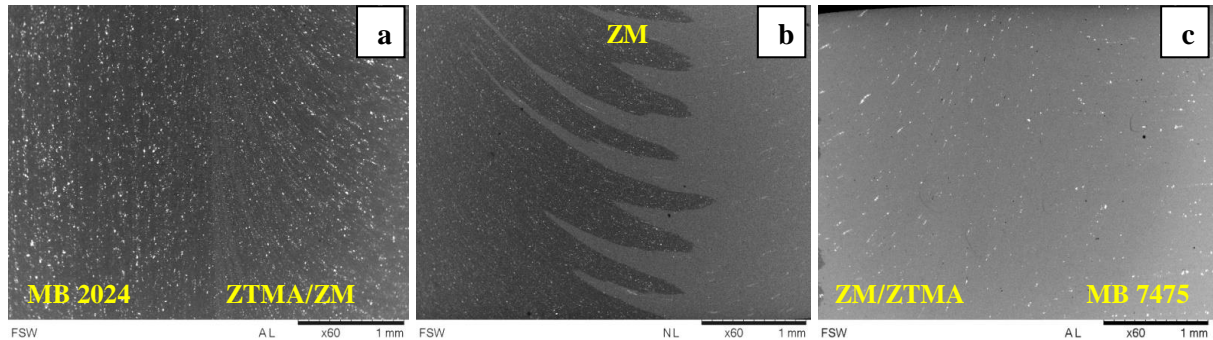


Figura 1 - Micrografias obtidas por MEV após polimento da superfície da (a) interface entre ZTMA/ZM da liga 2024; (b) ZM; (c) interface entre ZM/ZTMA da liga 7475.

A Figura 2 (b) compara os módulos de impedância estimados a 0,63 Hz para as zonas ZM, ZTMA 2024 e ZTMA 7474, regiões em que o OCP evidenciou o acoplamento galvânico. Os resultados mostram que as menores impedâncias nas médias frequências são relacionadas à ZM e que esta oscila ao longo do período de ensaio.

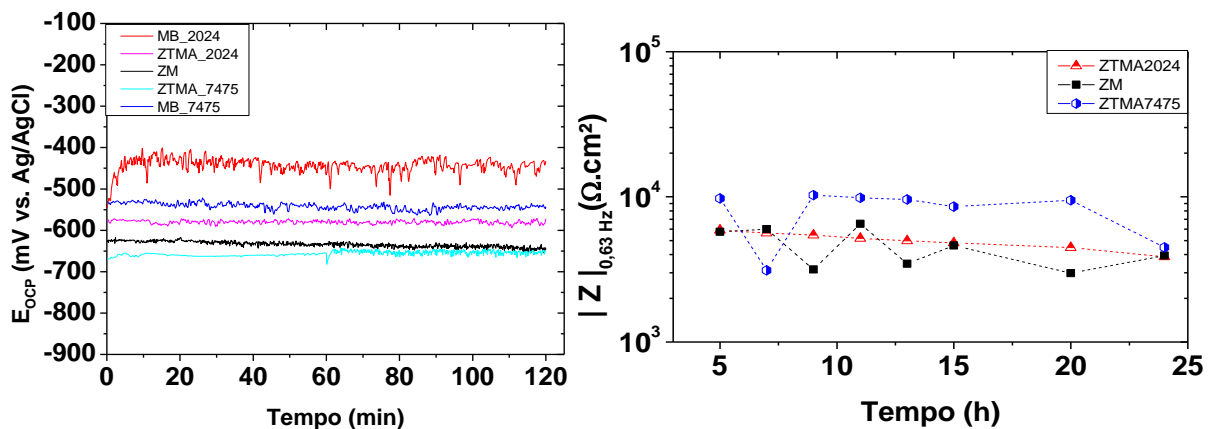


Figura 2 – (a) variação do potencial de circuito aberto (PCA) em função do tempo de exposição das diferentes zonas das ligas 2024 e 7475 soldadas pelo processo FSW, (b) Diagrama $|Z|_{0,63\text{Hz}}$ em função do tempo para ZM e para a ZTMA das ligas 2024 e 7475. Solução 0,01 M de NaCl,

A Figura 3 (a) mostra a superfície da ZM após o ensaio, sendo observado intenso ataque localizado entre os “dentes” das ligas 2024 e 7475, isto é, na região de maior interface entre os dois materiais. Mesmo com maior número de pontos localizados de ataque corrosivo observado na liga 2024, foi na liga 7475 que se observou ataques maiores e profundos, Figura 3 (b), promovidos pelo acoplamento galvânico com a liga 2024.

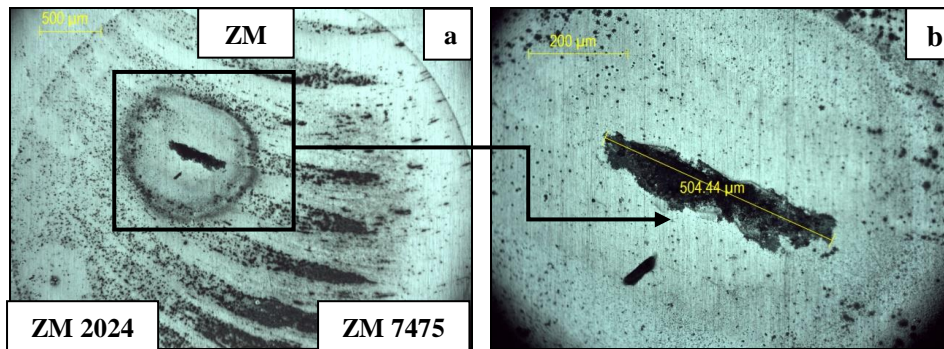


Figura 3 - Micrografias ópticas da (a) ZM e (b) ampliação da região com ataque corrosivo mostrando o final de um dos “dentes” da ZM com intenso ataque na liga 7475 após 24 horas de exposição à solução 0,01 M de NaCl.

Conclusões

Os resultados mostraram efeito significativo da soldagem por FSW na microestrutura e na atividade eletroquímica das ligas de alumínio, 2024 e 7475. Foi observado acoplamento galvânico entre as ligas 2024 e liga 7475 na zona de mistura (ZM) a qual resultou em maiores atividades eletroquímicas nesta zona. A liga 7475 atuou como anodo em relação à 2024 e na primeira foi observada corrosão intergranular que se desenvolveu a partir de pites.

Referências bibliográficas

- (1) THREADGRILL, P. L.; LEONARD, A. J.; SCERCLIFF, H. R.; WITHERS, P. J. Friction stir welding of aluminium alloys. **International Materials Reviews**, v. 54, p. 49-93, mar 2009.
- (2) ÇAM, G.; MISTIKOGLU, S. Recent Developments in Friction Stir Welding of Al-alloys. **Journal of Materials Engineering & Performance**, v. 23, n. 6, p.1936-1953. Abr. 2014.
- (3) SHEN, C.; ZHANG, J.; GE, J.; Microstructures and electrochemical behaviors of the friction stir welding dissimilar weld. **Journal Of Environmental Sciences**. p. 32-35, out. 2011.
- (4) MENDEZ, P. F.; EDGAR, A. Welding T. W. Processes for aeronautics. **Advanced Materials & Processes, Cambridge**, v. 2, n. 1, p.39-43, maio. 2001.
- (5) OLIVIECKI, N. J.; BESKOW, A. B. Análise dos parâmetros do processo de solda por fricção em uma liga de alumínio. **Perspectiva**, Erechim, v. 37, n. 138, p.15-29, jun. 2013.
- (6) POTOMATI, F. **Avaliação da qualidade final e juntas dissimilares de ligas de alumínio 2024-6056 e 7075-6056 soldadas por FSW – Friction Stir Welding**. 2006. 93 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.
- (7) SIDANE, D.; BOUSQUET, E.; DEVOS O.; PUIGGALI M.; TOUZET M.; VIVIER V.; POULON-QUINTIN, A. Local electrochemical study of friction stir welded aluminum alloy assembly. **Journal Of Electroanalytical Chemistry**, França, v. 737, p.206-211, jun. 2014.
- (8) BUSQUIM, T. P. **Avaliação da resistência à corrosão da liga 2024-T351 soldada por FSW - Friction Stir Welding**. 2007. 80 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

-
-
- (9) MARCONATO, E. A. **Influência de defeitos nas propriedades mecânicas de juntas soldadas por FSW da liga AA6013-T6**. 2009. 86p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.
 - (10) CAPELARI, T. V. **Avaliação da geometria da ferramenta e parâmetros do processo FSW na soldagem da liga de alumínio AA5052**. 2006. 79 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
 - (11) FIORAVANTI, A. S. **Soldagem por FSW de ligas de alumínio alclad AA2024-T3 e AA7075-T6**. 2008. 78 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
 - (12) ALVES, E. P. **Junções de materiais dissimilares utilizando o processo de soldagem por fricção rotativa**. 2010. 126 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.
 - (13) WADESON, D.A.; ZHOU H., THOMPSON G. E.; SKELDON P.; OOSTERKAMP L. D.; SCAMANS G. Corrosion behaviour of friction stir welded AA7108 T79 aluminium alloy. **Corrosion Science**, v. 48, n. 4, p. 887-897, abr. 2006.
 - (14) BOUSQUET, A.; POULON-QUINTIN, A.; PUIGGALLI, M.; DEVOS, O.; TOUZET, M. Relationship between microstructure, microhardness and corrosion sensitivity of an 2024-T3 friction stir welded joint, **Corrosion Science**, n. 53, p. 3026-3034, set. 2011.
 - (15) JARIYABOON, M.; DAVENPORT A. J.; AMBAT, R.; CONNOLLY, B. J.; WILLIAMS, S. W.; PRICE D. A. Corrosion of a dissimilar friction stir weld joining aluminium alloys AA2024 and AA7010. **Corrosion Engineering, Science And Technology**, v. 41, n. 2, p.135-142, jun. 2006.
 - (16) ABREU, C. P. **Caracterização da reatividade das ligas alumínio AA2024-T3 e AA7475-T651 soldadas por fricção (FSW)**. 2016. 100 p. Tese (Doutorado), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2016.