
Copyright 2018, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2018, em São Paulo, no mês de maio de 2018.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Efeitos da soldagem por fricção e mistura com relação à resistência a corrosão nas ligas de alumínio 2050-T84 e 7050-T7451

B. V. Gonçalves de Viveiros^a, M. Alencar^b, U. Donatus^c, I. Costa^d

Abstract

The 2050-T84 and 7050-T7451 alloys are used in aerospace industries because of their good mechanical resistance and low density. One way of joining these alloys is by friction stir welding (FSW) process. FSW has many advantages over welding conventional methods, but it also leads to changes in the alloys microstructure and, consequently, affects their corrosion resistance. Besides, as the joint alloys are dissimilar, galvanic coupling effects might occur at their interface. In this study, the corrosion susceptibility of the 2050-T84 and 7050-T7451 alloys joined by FSW has been investigated by evaluation of the surface and the cross section of samples exposed to NaCl solutions. Agar gel visualization technique in a solution with 3.5 wt.% NaCl was used to investigate the anodic and cathodic areas on the joined alloys surface. Also, scanning vibrating electrode technique (SVET) tests in a solution with 0.005 mol/L NaCl were carried out for 24 h. EIS measurements of the two alloys were also obtained. Results showed that a difference in the corrosion behavior depending on the zone analyzed and the aggressiveness of the electrolytes used.

Keywords: corrosion, aluminum alloys, FSW.

Resumo

As ligas 2050-T84 e 7050-T7451 são utilizadas em indústrias aeronáuticas pela sua boa resistência mecânica e baixa densidade. Uma forma para juntar esses dois materiais é através do processo de soldagem por fricção e mistura (*friction stir welding* - FSW). O FSW possui várias vantagens com relação aos métodos de soldagem convencional, porém também lida com as mudanças de microestruturas nas ligas, e consequentemente, afeta a resistência a corrosão. Além disso, como as ligas são dissimilares, é possível ocorrer o acoplamento galvânico em sua interface. Nesse estudo, a susceptibilidade de corrosão nas ligas 2050 e 7050 soldadas por FSW foram investigadas em sua superfície e a transversal da solda, expostas a soluções de NaCl. A técnica de visualização em gel contendo 3,5% (massa) de NaCl foi usada para avaliar as áreas anódicas e catódicas nas ligas soldadas. Também foi utilizada a técnica do eletrodo vibratório de varredura (SVET) em solução 0,005 mol/L de NaCl foi realizado durante 24 h. Medidas de espectroscopia de impedância (EIS) das duas ligas foram também obtidas. Os resultados mostraram diferenças no comportamento da corrosão dependendo da zona analisada e da agressividade da solução utilizada.

Palavras-chave: corrosão, ligas de alumínio, FSW.

^a Graduada-Mestranda – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

^b Graduado-Mestrando – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

^c Doutor-Pesquisador – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

^d Doutora-Pesquisadora – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

Introdução

A soldagem FSW foi criada nos anos 90 a fim de juntar materiais que possuíam baixa soldabilidade. A partir dessa invenção foi possível soldar ligas de alumínio em temperaturas abaixo do ponto de fusão^{1 2}. A soldagem destas ligas resulta em diminuição da massa total de aeronaves, ao substituir os rebites necessários para a montagem das partes durante fabricação³. A soldagem FSW é realizada por meio da fricção e mistura que causam aumento de temperatura dos materiais a serem soldados, utilizando uma ferramenta cilíndrica rotatória não consumível. Com a deformação ocorre aumento de temperatura e mudanças microestruturais, como modificação de tamanho de grãos, formação de precipitados e, modificação das propriedades mecânicas e de resistência à corrosão do material⁵. No caso de ligas de alumínio dissimilares soldadas por FSW, além da mudança microestrutural tem-se também o efeito de acoplamento galvânico entre materiais de composição química distinta, o que aumenta as complicações com relação à resistência à corrosão.

Estudos de corrosão podem ser realizados por meio de técnicas eletroquímicas globais ou locais. Entre as técnicas globais tem-se os ensaios de imersão, o ensaio de visualização em gel e ensaios eletroquímicos em que as áreas expostas são significativamente maiores que as de ânodos e cátodos individuais. O ensaio de visualização em gel permite identificar áreas anódicas e catódicas de um modo geral, e indicar de forma clara o efeito de acoplamento galvânico. Porém, para os ensaios eletroquímicos locais em que pequenas áreas são investigadas, como a técnica de varredura do eletrodo vibratório (SVET), gradientes de potencial entre áreas anódicas e catódicas do material, de acordo com a corrente gerada, podem ser identificados [5].

Este trabalho tem como objetivo caracterizar a resistência à corrosão de duas ligas de alumínio dissimilares, AA2050 e AA7050, soldadas por FSW. O estudo foi realizado por investigação tanto da área transversal como da superfície de topo, a fim de comparar essas áreas.

Metodologia

Os materiais utilizados neste trabalho foram as ligas de alumínio 2050-T84 e 7050-T7451 soldadas através da técnica por fricção e mistura (FSW). As espessuras utilizadas no processo FSW são mostradas na Tabela 1. Os parâmetros utilizados da velocidade de avanço da ferramenta no material foi de 100 mm/min e sua velocidade de rotação foi de 800 rpm.

Tabela 1. Principais parâmetros geométricos da ferramenta de soldagem FSW⁶

Região da ferramenta	Espessura (mm)
Diâmetro do ombro	18,0
Diâmetro do pino	6,0
Altura do pino	6,7

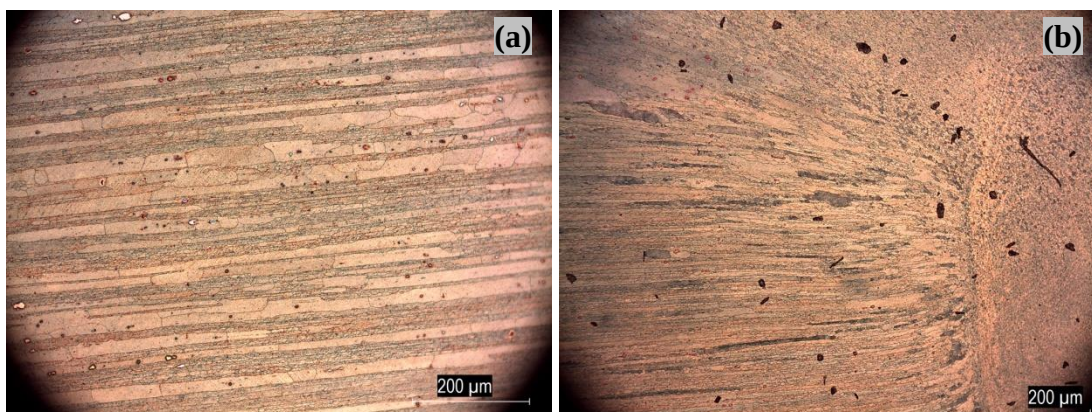
Os métodos de preparação da superfície do material estudado consistiram no lixamento seguido por polimento das amostras soldadas com pasta de diamante até acabamento com 3 µm, em álcool, e, finalmente, secagem com jato de ar quente. Para observação da microestrutura (forma e tamanho de grãos) foi realizado ataque químico com reagente Weck,

composto por 100 mL de água destilada, 4 g KMnO_4 e 1 g NaOH , em temperatura ambiente. O ataque químico consistiu na imersão no reagente de Weck por 20 s para mudança de coloração, o que determina o ataque. Amostras com a superfície polida com pasta de diamante até acabamento 3 milim foram submetidas a ensaio de visualização em gel agar-agar, por exposição a solução com 3,5% (massa) de NaCl , em gel agar-agar com adição de indicador de fenolftaleína, durante 1 hora. A suscetibilidade à corrosão localizada das ligas soldadas foi investigada pela técnica de varredura por eletrodo vibratório (SVET) em solução com 5 mmol/L de NaCl , por 24 h. As superfícies ensaiadas foram observadas por Microscopia Ótica (Leica) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Para o potencial de circuito aberto (OCP) e a espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) foram realizadas no GAMRY, utilizando solução de 5 mmol/L de NaCl para comparação com os ensaios de SVET. Com duração de 24 h, para sua estabilização, e 4 h de ensaio de impedância em todas as regiões afetadas e não afetadas pela solda.

Resultados e discussão

Secção transversal das ligas soldadas

A observação da secção transversal da amostra pós-soldagem FSW e ataque químico em solução Weck, Figura 1, permitiu classificar as zonas em zona termicamente (ZTA) e zona termomecanicamente (ZTMA) afetada, e zona de recristalização dos grãos, comumente chamada de zona de mistura (ZM). É possível observar que o tamanho de grãos varia com a distância entre a região não afetada pela solda e o centro da ZM. Os grãos da ZTA são alongados e similares aos da zona não afetada pela solda, ou metal base (MB), mostrando que esta zona é delimitada pela região onde não ocorreu efeito mecânico, Figura 1 (a) e (d). Com a aproximação da área soldada, os grãos diminuem de tamanho. Na ZM grãos muito pequenos devido à recristalização são mostrados nas Figuras 1 (b) e (c).



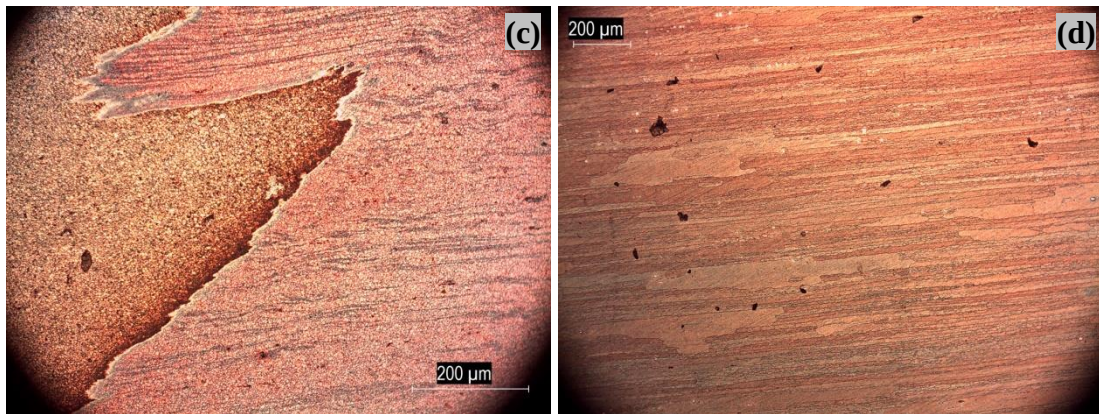


Figura 1 – Superfície das ligas AA2050-T84 e AA7050-T7451 soldadas por fricção e mistura (FSW) após ataque químico com reagente Weck para classificação das diferentes zonas do material. (a) ZTA da liga AA2050-T84, (b) ZTMA da liga AA2050-T84 e zona de transição entre as duas ligas, (c) ZM e ZTMA da liga AA7050-T7451 e (d) ZTA da liga AA7050-T7451.

A Figura 2 apresenta a amostra soldada, antes (a) e após 30 min (b) e 1 h (c) e (d) de exposição ao gel agar-agar com 3,5% de NaCl. É possível observar que desde 30 min de ensaio, as áreas anódicas (transparente e com produtos de corrosão brancos), estão localizadas preferencialmente na região de interface entre as ligas 7050 e 2050, podendo também ser chamada de zona de transição entre as duas ligas da ZTMA.

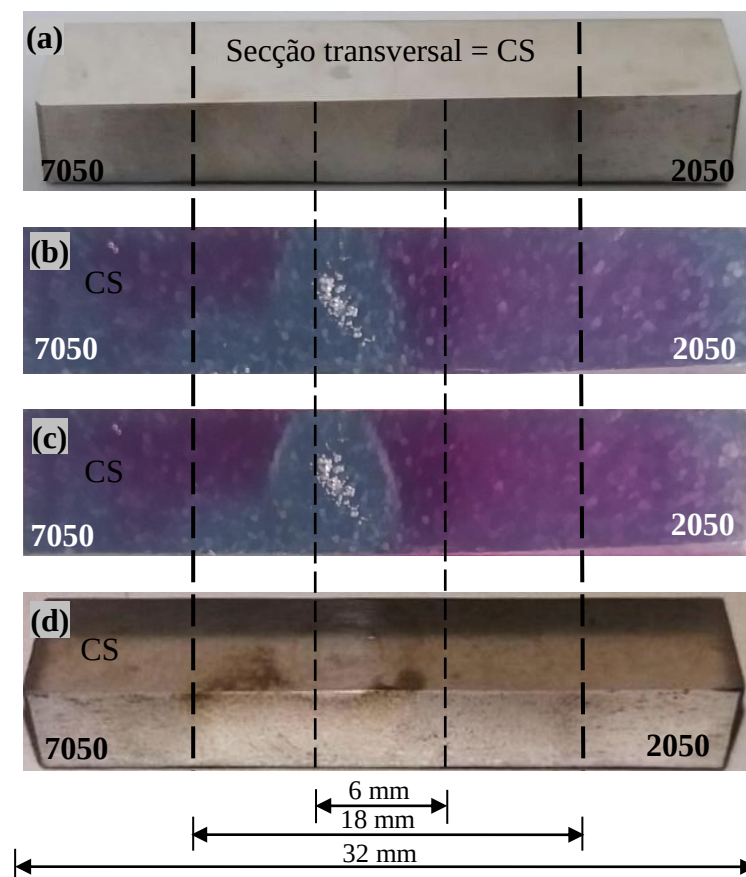
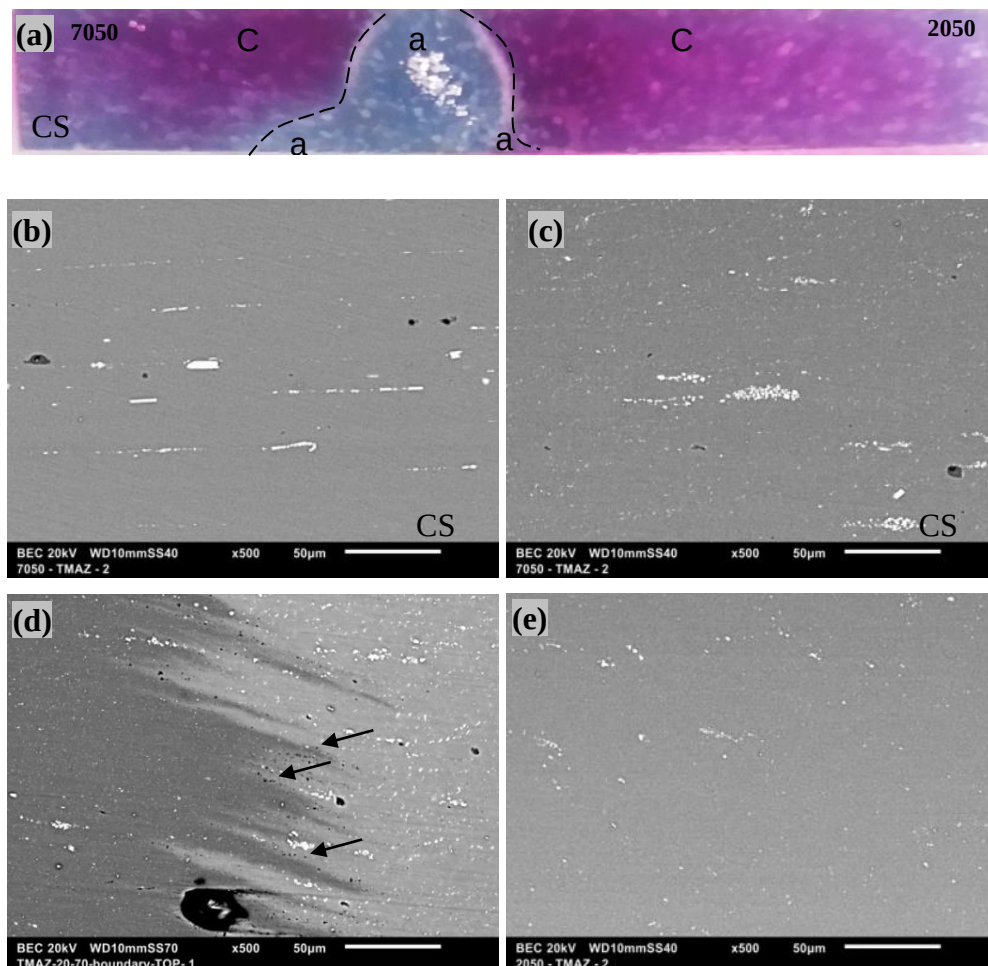


Figura 2 - (a) Amostra polida antes do ensaio; após (b) 30 min e (c) e (d) 1 h de ensaio de exposição em gel agar-agar com 3,5% (m/m) de NaCl e fenolftaleína.

Os resultados mostraram que após 30 minutos de exposição ao meio de ensaio, produtos de corrosão brancos, típicos de ligas de alumínio, eram observados na região de transição entre as duas ligas. As regiões catódicas (coloração rosa) correspondem às regiões vizinhas à de transição, e estão localizadas principalmente na ZTMA da liga AA2050, embora regiões catódicas fossem também observadas em partes da ZTMA da AA7050. Este resultado é explicado por efeito de acoplamento galvânico entre a zona de transição (acoplamento entre as duas ligas resultando em áreas anódicas) e suas vizinhanças. Enquanto as reações catódicas predominaram na liga AA2050, na ZTMA da liga AA7050 foram observadas áreas anódicas numa mesma linha. As áreas anódicas foram claramente indicadas na amostra após remoção do agar-agar pelas manchas escuras observadas na superfície exposta da amostra (d). Estes resultados mostram acoplamento galvânico entre a zona de transição e a ZTMA das duas ligas, com a zona de transição atuando anodicamente em relação à vizinhança.

A Figura 3 mostra o efeito da solda FSW nas características microestruturais, especificamente com relação às partículas micrométricas na ZTA ou ZTMA e, as áreas catódicas (c) e anódicas (a) foram identificadas na Figura 3 (a). O efeito do acoplamento galvânico é comprovado pela observação da interface entre as duas ligas onde são observados ataques localizados preferencialmente na zona de interface entre as duas ligas, Figura 3 (d).



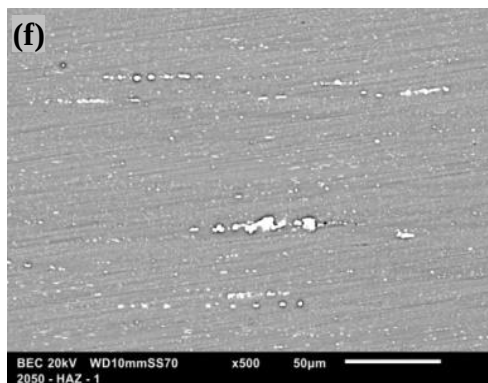


Figura 3 – Secção transversal da amostra soldada mostrando diferentes zonas em consequência do processo de solda. Zonas afetadas térmica e termomecanicamente (a) mostrando a distribuição de partículas micrométricas na liga. b) ZTA da liga AA7050-T7451; (c) ZTMA da liga AA7050-T7451; (d) ZTMA de transição entre as ligas AA2050-T84 e AA7050-T7451; (e) ZTMA da liga AA2050-T84 e (f) ZTA da liga AA2050-T84.

Na ZTA da liga AA2050, as partículas micrométricas e com tamanhos variados estão alinhadas seguindo a direção de laminação da chapa, Figura 3 (f). A análise química dessas partículas mostrou que estas são enriquecidas em cobre e ferro, portanto, catódicas em relação à matriz da liga AA2050. Na ZTMA de transição entre as ligas 2050 e 7050, Figura 3 (d), as partículas micrométricas apresentam tamanhos e distribuição variados devido à fragmentação e arraste pela ferramenta de soldagem mudar a estrutura do material, através da fricção e a alta temperatura gerada. A análise química de algumas partículas na zona ZTMA de transição, Figura 3 (d), mostrou que estas são enriquecidas em magnésio, Figura 4, e, portanto, muito ativas eletroquimicamente.

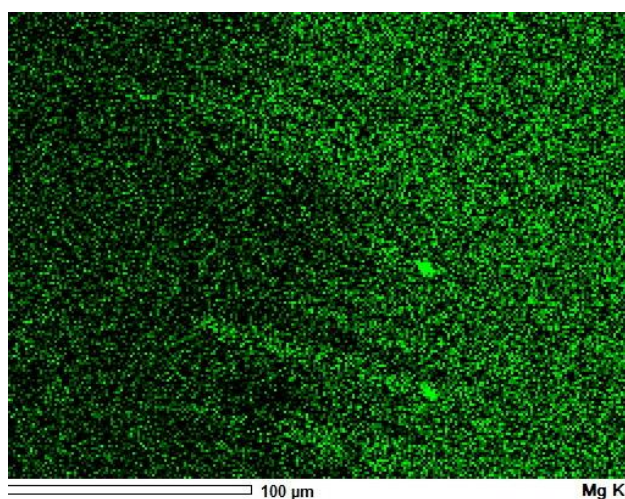


Figura 4 - Superfície da ZTMA e zona de transição entre as ligas AA2050-T84 e AA7050-T7451 mostrando composição de magnésio.

Na ZTA da liga AA7050, Figura 5 (a), as partículas encontram-se alinhadas na direção de laminação e apresentam tamanhos variados. A composição de cobre, magnésio e ferro na região da Figura 5 (a) é mostrada nas Figuras 5 (b), (c) e (d), respectivamente. Nota-se que a

maioria das partículas é rica em cobre e ferro, e as enriquecidas em magnésio são rapidamente atacadas, algumas sendo consumidas durante o polimento da superfície, Figura 5(a) e (c).

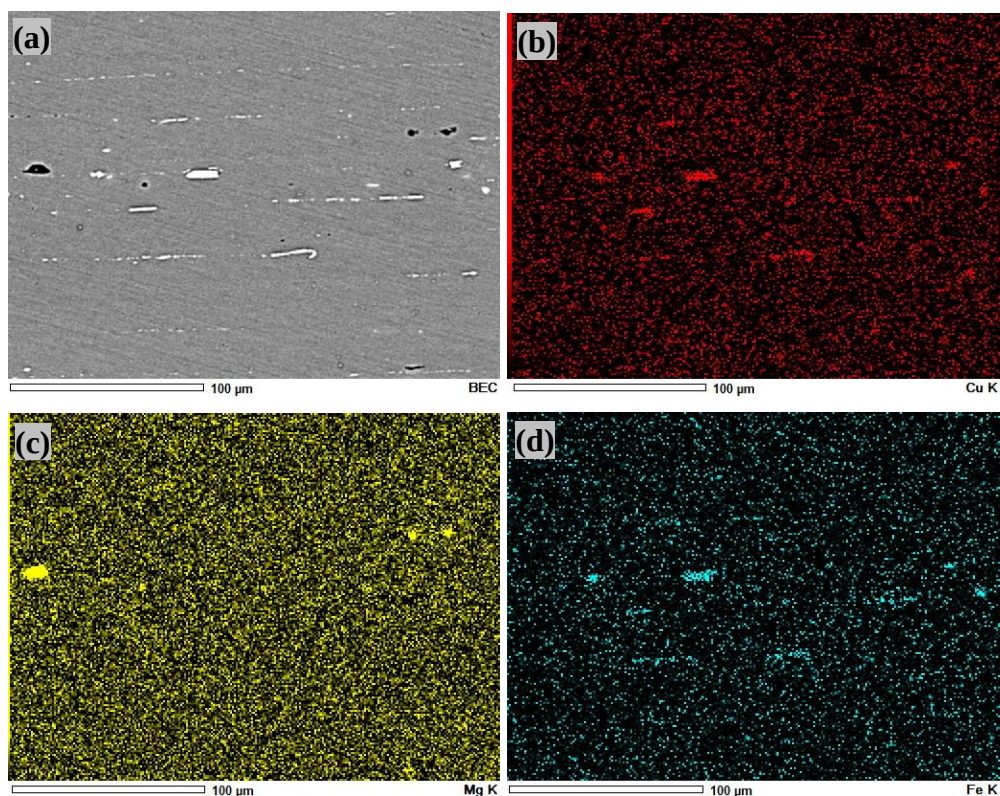


Figura 5. (a) Superfície da secção transversal correspondente à ZTA da liga 7050-T7451 contendo partículas com composição química de (b) cobre; (c) magnésio; e (d) ferro.

SVET

Ensaio de SVET foram realizados para investigar a localização das áreas anódicas e catódicas na superfície das ligas dissimilares soldadas. Ensaio de SVET foram realizados tanto na secção transversal das amostras como na superfície de topo. A Figura 6 mostra resultados obtidos em função do tempo para a secção transversal. Estes mostram que as áreas predominantemente anódicas correspondem à zona de transição entre as ligas (ZTMA de transição). Nesta área, para 2 h de ensaio foram observados vários pontos de ataque corrosivo (anódicos) e, em sua vizinhança, foi observado comportamento predominantemente catódico (áreas azuladas), devido a efeito de acoplamento galvânico. Com o tempo de ensaio, este efeito torna-se menos evidente, Figuras 6 (b) a (d), enquanto na ZTMA da A7050, novos pontos de ataque de corrosão são iniciados. Abreu *et al* [5] estudaram o comportamento eletroquímico das ligas AA2024 e AA7475 soldadas por FSW e observaram efeito de acoplamento galvânico entre as ligas nas primeiras 2 h de ensaio mas para tempos maiores, após 6 h e 8 h de exposição à solução, o efeito do acoplamento foi se tornando crescentemente menos significativo. Este efeito de diminuição do efeito de acoplamento foi explicado pela dissolução preferencial de Zn da liga AA7475 e subsequente deposição destes íons nos intermetálicos ricos em Cu da liga AA2024, diminuindo o acoplamento entre as ligas e deslocando a atividade eletroquímica para a ZTMA da liga AA7475.

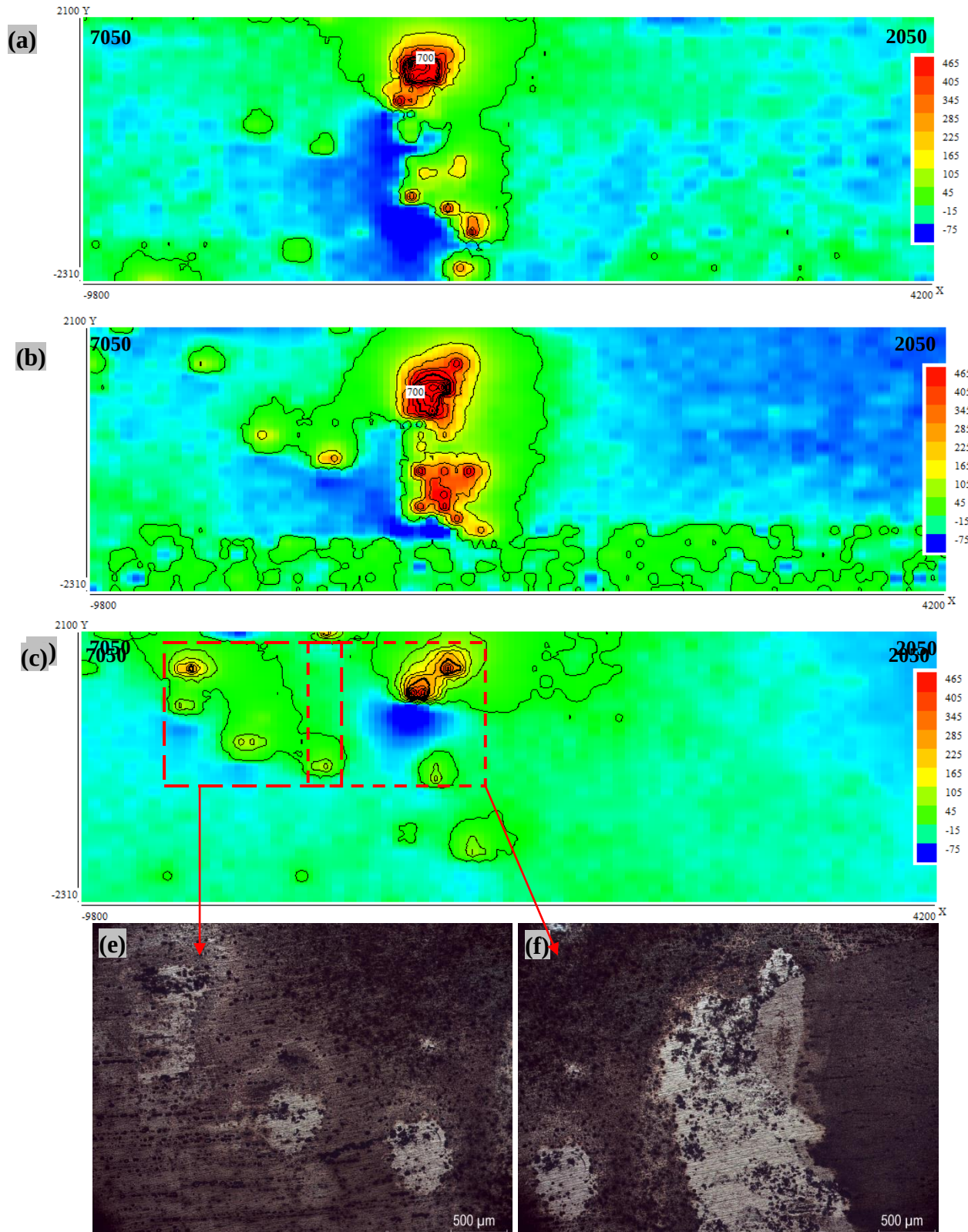


Figura 6. Mapas de SVET das ligas AA7050-T7451 e AA2050-T84 soldadas por FSW após vários tempos de ensaio em solução de 5 mmol/L de NaCl (a) 2 h; (b) 6 h; (c) 12 h; (d), (e) 24 h e (f) áreas da superfície ensaiada por SVE com corrosão localizada após 24 h de imersão.

Topo da superfície soldada

Ataque químico com reagente Weck para revelação da microestrutura do material mostrou que na superfície do topo do material solda não há grãos recristalizados, Figura 7, e as zonas no topo da superfície da área soldada são classificadas como ZTA e ZTMA, não havendo ZM.

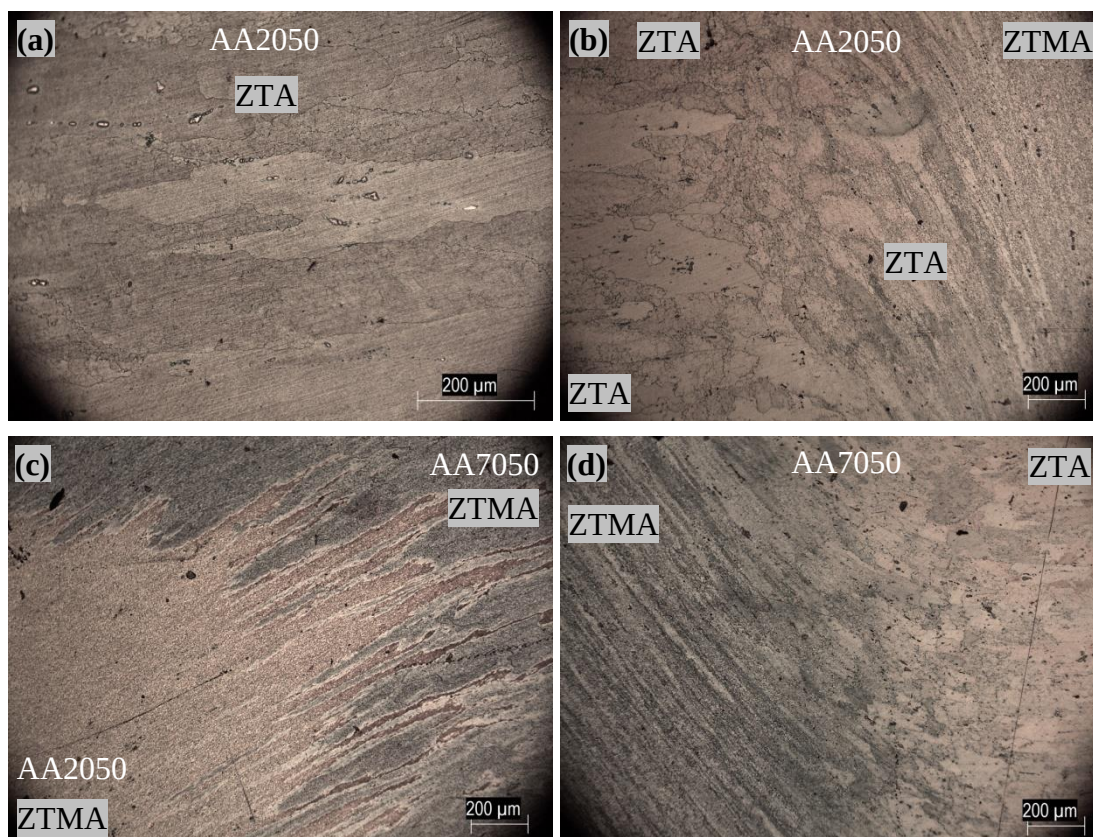


Figura 7. Ataque químico com reagente Weck para classificação das zonas na superfície de topo da solda. (a) ZTA da liga AA2050-T84; (b) transição entre as zonas ZTA e ZTMA da liga AA2050-T84; (c) zona de transição ZTMA das ligas AA2050-T84 e 7050-T7451; e (d) a transição entre ZTMA e ZTA da liga AA7050-T7451.

Após caracterização e classificação das diferentes zonas da solda foram realizados ensaios de visualização em gel contendo 3,5% (m/m) de NaCl e fenolftaleína. A mudança de coloração do gel indicativa da mudança de pH começou a ficar definida após 30 min de ensaio. Nos primeiros minutos de ensaio as áreas anódicas são concentradas na zona de transição entre a ZTMA das ligas AA2050 e AA7050, porém com o tempo do ensaio, esse comportamento anódico fica menos evidente, tendendo a diminuir, e as zonas de comportamento anódico ficam localizadas preferencialmente na ZTA da liga AA7050. As áreas catódicas se situam entre essas zonas, a ZTMA da liga AA7050, enquanto toda as zonas da liga AA2050 apresentaram comportamento catódico.

Exposição a solução 3,5 % (massa) de NaCl por 1h.

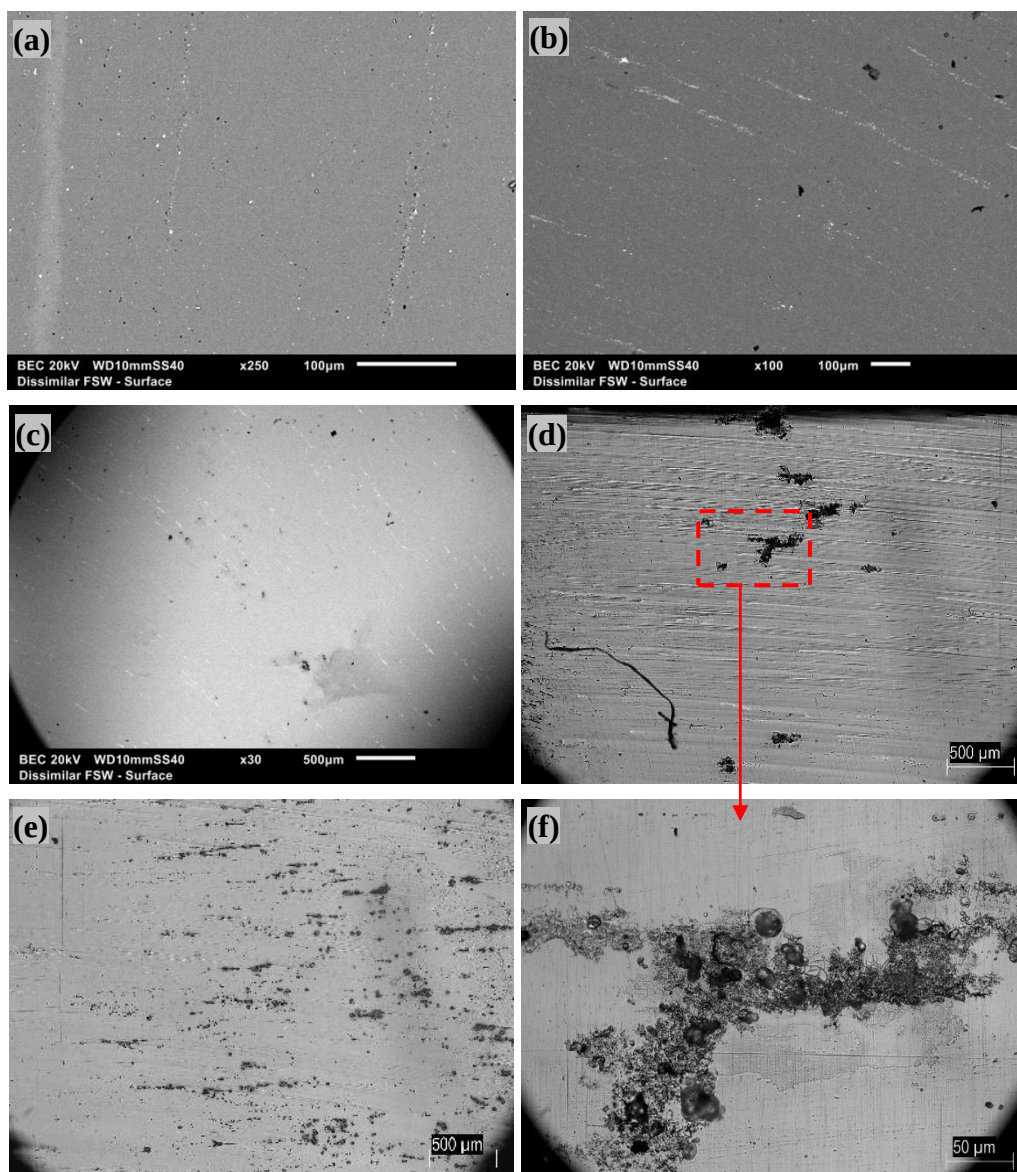


Figura 8. Observação da distribuição de partículas micrométricas na superfície de topo das ligas AA2050-T84 e AA7050-T7451 soldadas por FSW após 1 h de ensaio de exposição em gel agar-agar com 3,5% (m/m) de NaCl e fenolftaleína. (a) ZTA da liga AA2050-T84; (b) ZTMA da liga 2050-T84; (c) ZTMA de transição entre as duas ligas 2050-T84 e 7050-T7451; (d) ZTMA da liga 7050-T7451; (e) ZTA da liga 7050-T7451; e (f) zoom da corrosão que consta na imagem (d).

Os resultados do ensaio de SVET na superfície de topo da solda também foram realizados em solução 5 mmol/L de NaCl, Figura 12, mostram que o comportamento de corrosão foi diverso do observado no ensaio de visualização em gel. Os primeiros pontos indicativos de reações anódicas foram observados na ZTMA da liga AA2050 (a), enquanto as áreas catódicas (azulada), nas primeiras horas de ensaio, se concentraram na ZTMA de transição (b) entre as ligas. Todavia, com o tempo de ensaio, as áreas catódicas corresponderam à ZTMA de transição entre as ligas e também a ZTMA da liga AA7050 (b) a (d). A liga mais susceptível à

corrosão localizada nesse meio foi a liga AA2050, o que se deve provavelmente à microestrutura desta liga, com a presença de fases nanométricas e endurecedoras que aumentam a suscetibilidade da liga ao ataque localizado. Isto é possível ao se preservar o filme de óxido apassivador na superfície da liga pelo uso de um meio de baixa concentração e, portanto, baixa corrosividade que permite separar as regiões anódicas das catódicas.

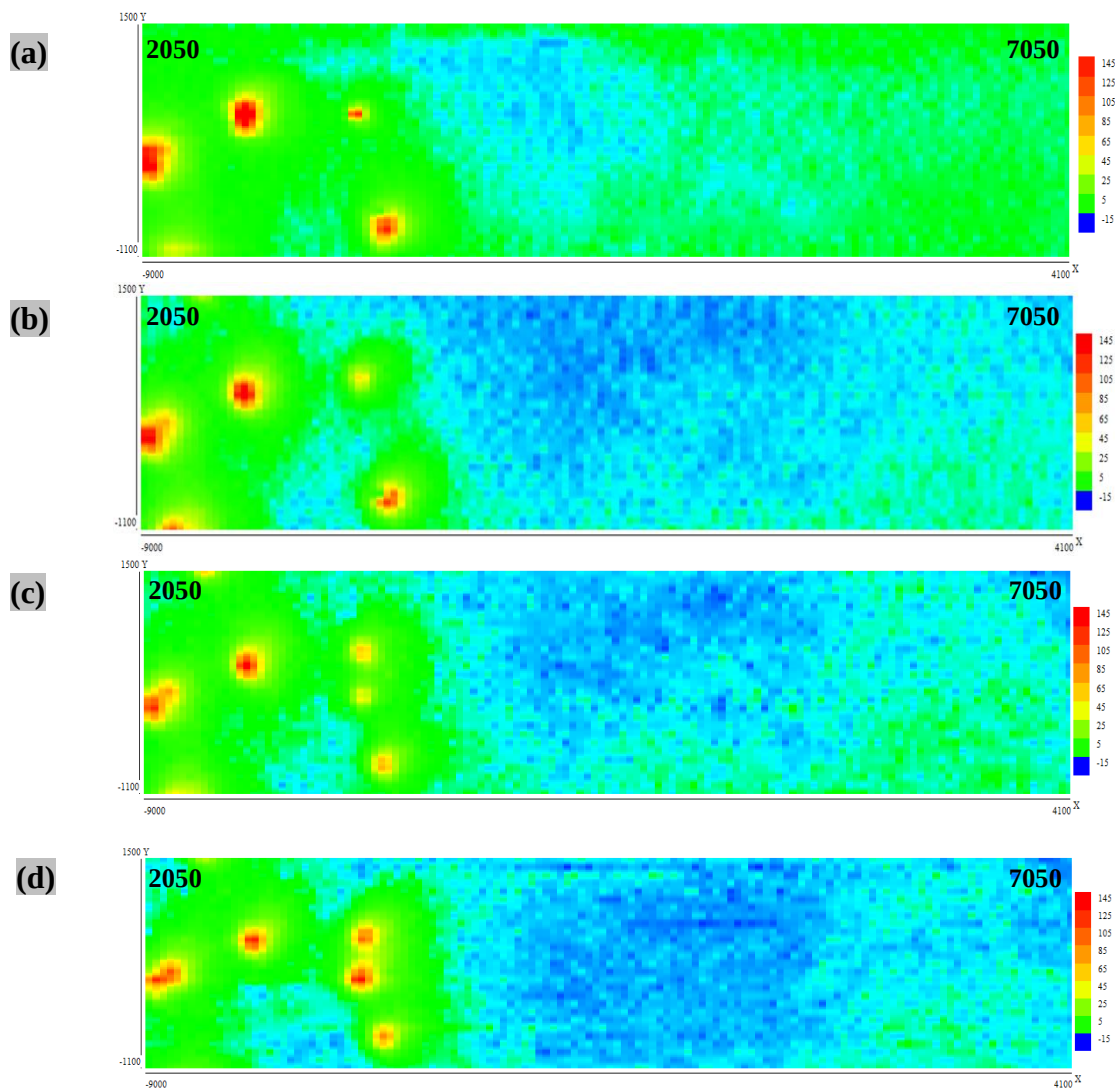


Figura 12 – Mapas de SVET em função do tempo de exposição da superfície de topo das ligas AA2050-T84 e AA7050-T7451 soldadas por FSW à solução 5 mM de NaCl. (a) 2 h; (b) 6 h; (c) 12 h; e (d) 24 h de ensaio.

Ensaio de impedância eletroquímica (EIS)

Os resultados dos ensaios de impedância eletroquímica, Figura 13, mostraram duas constantes de tempo, uma constante a frequências mais altas indicada por um arco capacitivo achatado e associada com o filme passivo na superfície da liga. A segunda de tempo em frequências menores é relacionada com processos de transferência de carga e carregamento da dupla camada elétrica. O menor diâmetro do arco capacitivo foi obtido para a área de mistura das duas ligas indicando que houve efeito

de acoplamento galvânico entre estas, AA7050 e AA2050. A liga AA7050, por sua vez, foi associada com o maior diâmetro do arco capacitivo o que sugere um filme passivo mais resistente sobre esta liga em comparação com a liga AA2050. Isto pode ser explicado pela presença de lítio como elemento de liga na AA2050 enquanto que na AA7050 o principal elemento de liga é o zinco. No caso da liga AA2050 e da área de mistura, observa-se processo de corrosão sob controle difusional, enquanto que para a liga AA7050 este controle não é evidente.

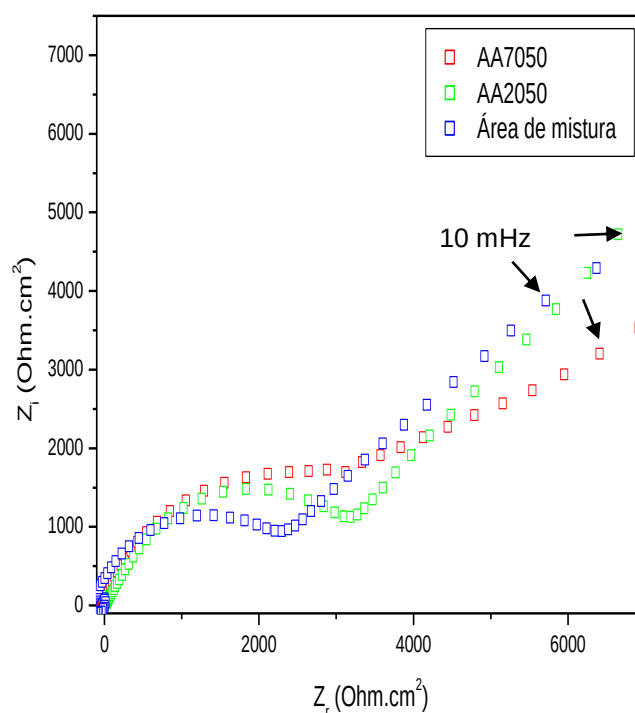


Figura 13. Medidas de EIS das ligas AA7050, AA2050 e área de mistura com frequência de 50 Hertz

Conclusões

Os resultados mostraram dependência entre as concentrações das soluções de NaCl utilizadas e a características de corrosão entre as diferentes regiões das ligas e da solda. Em meios com baixa concentração de cloreto (0,005 mol/L), utilizadas nos ensaios de SVET e EIS, a liga mais suscetível ao ataque localizado de corrosão foi a liga AA2050, porém em solução de elevada concentração (3,5% em massa), utilizada nos ensaios de visualização em gel, a liga que apresentou menor resistência à corrosão foi a AA7050, particularmente, próximo à área da solda. Foi também observado por ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica, efeito de acoplamento galvânico entre as duas ligas, AA7050 e AA2050, na área soldada, resultando em menores impedâncias do filme passivo nesta região.

Referências bibliográficas

- (1) ALVES E., **Junções de Materiais Dissimilares Utilizando o Processo de Soldagem por Fricção Rotativa**. Dissertação Mestrado - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. 2010.
- (2) MISHRA R, MA Z. Friction stir welding and processing. **Materials Science and Engineering**. v. 50. 1-78. 2005.
- (3) BUGARIN A. **Estudo da resistência à corrosão das ligas de alumínio 2024-T3 e 7475-T651 soldadas por fricção e mistura (FSW)**. Dissertação Mestrado – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo. 2017.
- (4) GHETIYA N, PATEL K, KAVAR A. Multi-objective Optimization of FSW Process Parameters of Aluminium Alloy Using Taguchi-Based Grey Relational Analysis. **Trans Indian Inst Met**. v. 69(4). 917-923. 2016.
- (5) ABREU C. **Caracterização da reatividade das ligas alumínio AA2024-T3 e AA7475-T651 soldadas por fricção (FSW)**. Tese Doutorado - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo. 2016.
- (6) COSTA I, *et al.* **Estudo da corrosão localizada e caracterização da resistência à corrosão associada à fadiga de ligas de alumínio de elevada resistência mecânica soldadas por fricção (FSW)**. Relatório de atividades – FAPESP. São Paulo. 2017.