

# INVESTIGAÇÃO DA CORROSÃO LOCALIZADA DAS LIGAS DISSIMILARES (2024-T3 E 7475-T651) SOLDADAS POR FSW

C.P. Abreu<sup>a,c</sup>, H.G. de Melo<sup>b</sup>, N. Pebère<sup>d</sup>, V. Vivier<sup>a</sup>, I. Costa<sup>c</sup>,

<sup>a</sup>LISE-CNRS-UMR 8235, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France

<sup>b</sup>Metallurgical and Materials Engineering Department, University of São Paulo, Brazil

<sup>c</sup>Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN/CNEN-SP, Brazil

<sup>d</sup>Université de Toulouse, France

([caioabreu1@hotmail.com](mailto:caioabreu1@hotmail.com))

## RESUMO

*A indústria aeronáutica tem mostrado grande interesse em unir ligas dissimilares de alumínio usadas em diferentes partes da aeronave. O processo de soldagem por FSW (Friction Stir Welding) é considerado como uma substituição eficaz às técnicas convencionais de soldagem de ligas de alumínio. Este processo resulta em diferentes zonas microestruturais, o que afeta a propriedade de corrosão do material. Neste trabalho, a resistência à corrosão das diferentes zonas microestruturais presentes nas ligas 2024-T3 e 7475-T651, após soldagem por FSW, foi investigada por técnicas eletroquímicas. Foi utilizada uma célula eletroquímica com pequena área de exposição ao meio (diâmetro de 1,0 mm) para análise de cada zona, separadamente. Foi utilizada a solução de 0,1M de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> M + 1mM de NaCl. Os resultados eletroquímicos mostraram menor resistência à corrosão nas regiões do nugget. Além disso, a ZTMA de ambas as ligas apresentaram resistência à corrosão inferior às zonas MB e ZTA.*

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

## 1. INTRODUÇÃO

A redução de peso e a durabilidade das peças utilizadas nas aeronaves são de primordial importância para a indústria aeronáutica permitindo maior tempo de vida útil, redução da quantidade de reparos e de consumo de combustível, além da diminuição na quantidade de emissão de gases nocivos à atmosfera<sup>1</sup>. Há duas maneiras principais para se reduzir o peso das aeronaves. A primeira consiste na redução da densidade dos materiais utilizados, por exemplo, a substituição de materiais pesados por ligas de alumínio mais leves. A segunda é pela utilização de novas técnicas de soldagem, que permitam substituir o uso de rebites e a sobreposição de chapas.

O duralumínio foi o precursor das ligas da série 2xxx que são muito utilizadas pela indústria aeronáutica, incluindo a liga 2024. Estas são ligas Al-Cu, com teores de magnésio relativamente altos (aproximadamente 1,5%) que são empregadas em estruturas internas e externas de aeronaves. Outro grupo de ligas muito usadas na indústria aeronáutica são as da série 7xxx (Al-Zn-Mg-Cu), pois possuem excelentes propriedades mecânicas. Estas podem ser utilizadas tanto em estrutura de asas como em partes da fuselagem.

As ligas que não são tratáveis termicamente são monofásicas e o aumento na resistência é obtido através do endurecimento por solução sólida. As ligas das séries 2xxx e 7xxx, todavia, são endurecíveis por precipitação, podendo ser tratadas termicamente<sup>2,3</sup>. Nestas ligas, compostos intermetálicos, tais como o Al-Cu-Mg e o MgZn<sub>2</sub>, com dimensões entre 2 µm e 30 µm, que exibem comportamento eletroquímico diferente da matriz, estão presentes e podem dar origem à corrosão localizada<sup>3</sup>.

As técnicas de soldagem que utilizam processo de fusão não são efetivas para as ligas de alumínio, como as das séries 2xxx e 7xxx. Defeitos causados pela diferença entre os coeficientes de dilatação térmica das regiões solidificadas e o filme da fase líquida são formados resultando em uma série de trincas na fase final da solidificação do cordão de solda. Isto resulta em grande diferença de resistência mecânica entre o metal base e a junta soldada<sup>4</sup>.

O The Welding Institute (TWI), Inglaterra, desenvolveu em 1990, e patenteou em 1991, o processo de soldagem por atrito linear com mistura ou *Friction Stir Welding* (FSW). Nesse processo não ocorre fusão do MB, ou seja, é um processo que ocorre no estado sólido. Esse processo de soldagem resulta em menor distorção, redução das alterações de propriedades mecânicas e metalúrgicas, além de minimizar as tensões residuais. Neste processo, uma ferramenta rotativa e não consumível promove calor devido ao atrito com os materiais a serem soldados. A ferramenta percorre as regiões dos materiais que devem ser soldadas, sob condições apropriadas<sup>5</sup>.

O processo de soldagem por FSW gera quatro zonas com microestruturas distintas, a saber: a zona de mistura (ZM) ou *nugget*, a zona termomecânica-

mente afetada (ZTMA), a zona termicamente afetada (ZTA) e o metal base (MB). Existe correlação reconhecida entre a microestrutura e a corrosão de um material, portanto, a modificação microestrutural afeta a resistência à corrosão deste e pode favorecer a formação de pilhas galvânicas. O efeito de acoplamento galvânico é particularmente pronunciado em solda de ligas dissimilares.

Alguns trabalhos de pesquisa buscaram entender as propriedades mecânicas e a evolução de diferentes zonas microestruturais formadas durante a soldagem por FSW<sup>6</sup>. Outros, predominantemente em ligas de alumínio similares, demonstraram a relação entre microestrutura, dureza, e o comportamentos catódico e anódico de partículas de segunda fase, assim como de parâmetros do processo de soldagem FSW e as respectivas suscetibilidades à corrosão<sup>7</sup>. Outros pesquisadores investigaram a suscetibilidade à corrosão de ligas dissimilares soldadas por FSW, como Sidane<sup>8</sup> *et al.* (2015) e Donatus<sup>9</sup> *et al.* (2015).

A maioria dos estudos sobre a resistência à corrosão de ligas soldadas por FSW se dedicou a investigar o efeito do processo de soldagem de ligas similares. Poucos estudos investigaram ligas dissimilares por meio de utilizadas técnicas eletroquímicas locais. Há necessidade de se aprofundar este estudo com o objetivo de se compreender melhor o efeito do processo de soldagem de ligas dissimilares, além de investigar o efeito da microestrutura na resistência à corrosão de cada uma das zonas afetadas pela solda por FSW.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Materiais**

Chapas das ligas de alumínio 2024-T3 e 7475-T651, com espessuras de 2 mm, foram fornecidas pela EMBRAER, já soldadas pela técnica de soldagem por fricção (FSW). As amostras utilizadas neste trabalho foram cortadas de uma mesma chapa e, portanto, todas são de um mesmo lote de chapas e possuem os mesmos parâmetros de soldagem.

### **2.2 Métodos**

### **2.2.1 Preparação das amostras**

A superfície das amostras para ser ensaiada foram lixadas com lixas de carbeto de silício na seguinte ordem: #400, #600, #1200 e #P4000. Em seguida, foram polidas com solução de alumina e água destilada. Após cada etapa de lixamento e polimento, as amostras eram lavadas com água destilada e secadas em jato de ar.

### **2.2.2 Meio de ensaio**

A solução utilizada como meio de ensaio consistiu em 0,1 M de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  + 1 mM de NaCl. O sulfato é pouco agressivo às ligas de alumínio permitindo que se acompanhe o desenvolvimento da corrosão na superfície exposta das ligas soldadas de forma gradual. A adição de 1 mM de NaCl na composição do meio de ensaio permitiu torná-la levemente mais agressiva, além de favorecer a estabilização mais rápida do potencial, uma vez que se utilizou Ag/AgCl como eletrodo de referência.

### **2.2.2 Caracterização microestrutural por microscopia óptica**

A superfície da liga foi atacada com reagente de Keller (1 mL de ácido fluorídrico 40p%, 1,5 mL ácido clorídrico 35p%, 2,5 mL de ácido nítrico 68 p% e 95 mL de água destilada) para revelar a microestrutura, permitindo a identificação de cada zona individual da solda.

### **2.2.3 Espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS)**

Os espectros de impedância eletroquímica (EIS) foram obtidos no modo potenciostático na faixa de frequência de 63 kHz a 10 mHz, com 9 pontos por década e amplitude de perturbação de 20 mV (rms). Os ensaios foram realizados com eletrodo estático. Foi utilizado um potenciostato modelo *Parstat 2273*, conectado a microcomputador ambos controlados pelo software *PowerSuite*. Os ensaios foram realizados numa célula eletroquímica cuja área de exposição ao meio era controlada por um o-ring de 1,0 mm de diâmetro (ver Figura 1), o que permitiu a avaliação isolada das diferentes zonas formadas nas ligas de alumínio 2024-T3 e 7475-T651 pelo processo de soldagem por FSW.



Figura 1: Fotografias da célula eletroquímica com *o-ring* de 1,0 mm de diâmetro, utilizada nos ensaios das diferentes zonas formadas pela solda por FSW.

Os ensaios foram realizados nas 7 zonas indicadas na Figura 2, quais sejam: MB, ZTA e ZTMA das ligas 2024-T3 e 7475-T651, além da região do *nugget* entre as duas ligas.

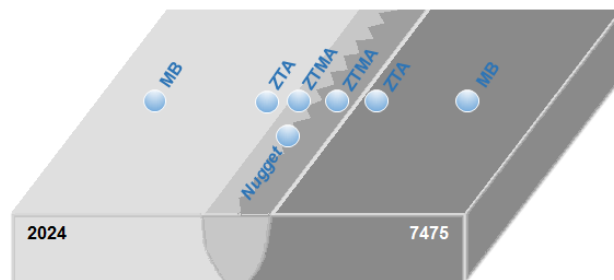


Figura 2: Esquema de posicionamento da microcélula nas distintas zonas formadas após o processo de soldagem por FSW das ligas 2024-T3 e 7475-T651.

#### 2.2.4 Medidas de potencial em circuito aberto (PCA)

Com o intuito de avaliar o tempo de estabilização do potencial das ligas utilizadas, foram realizados ensaios de potencial em circuito aberto nas várias zonas indicadas na Figura 2.

#### 2.2.5 Curvas de polarização

Curvas de polarização anódica foram obtidas potenciodinamicamente com velocidade de varredura de  $0,500 \text{ mV s}^{-1}$ , utilizando potenciostato modelo *Parstat 2273*, conectado a um microcomputador e controlados pelo software *PowerSuite*. As varreduras foram iniciadas a 30 mV abaixo do PCA e terminadas em sobretensões de  $+400 \text{ mV}_{\text{PCA}}/\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{KCl}_{(\text{sat})}$ . Os ensaios foram realizados nas zonas indicadas na Figura 2, segundo posicionamento da microcélula.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização microestrutural das ligas 2024-T3 e 7475-T651 soldadas

A Figura 3 apresenta a macrografia e as micrografias óticas das diferentes regiões formadas após a solda, por FSW, das ligas 2024-T3 e 7475-T651.

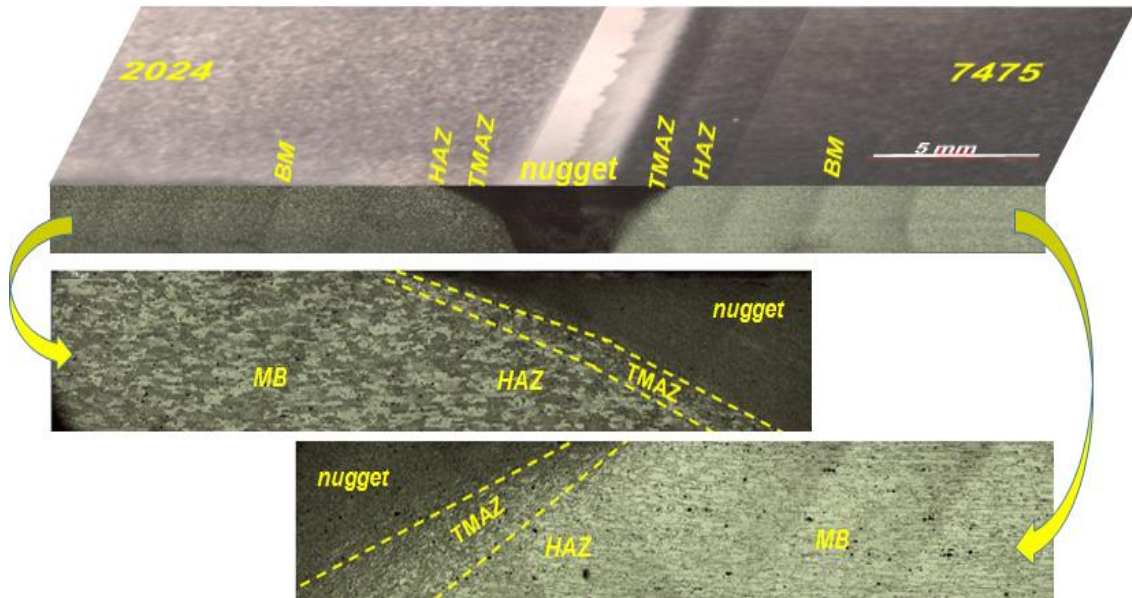


Figura 3: Micrografias óticas das diferentes zonas formadas pela soldagem por FSW.

Os grãos não são identificados nas zonas do *nugget* de ambas as ligas devido às suas pequenas dimensões em consequência do processo de recristalização dinâmica que ocorre nestas regiões. Os grãos na ZTA e no MB são muito similares quando se compara estas zonas de uma mesma liga, seja a 2024-T3 ou a 7475-T651. A deformação termoplástica na ZTMA das duas ligas, por sua vez, resultou em grãos menores em relação aos grãos do MB e ZTA. Esta deformação é imposta pelo movimento do ombro da ferramenta contra a superfície do metal, e pelas altas temperaturas atingidas durante o processo.

#### 3.2. Caracterização eletroquímica da resistência à corrosão das diferentes zonas formadas pela soldagem por FSW das ligas 2024-T3 e 7475-T651

A Figura 4 mostra a variação do potencial em circuito aberto (PCA) em função do tempo de exposição (durante 1 hora) à solução 0,1 M de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  + 1 mM de NaCl.

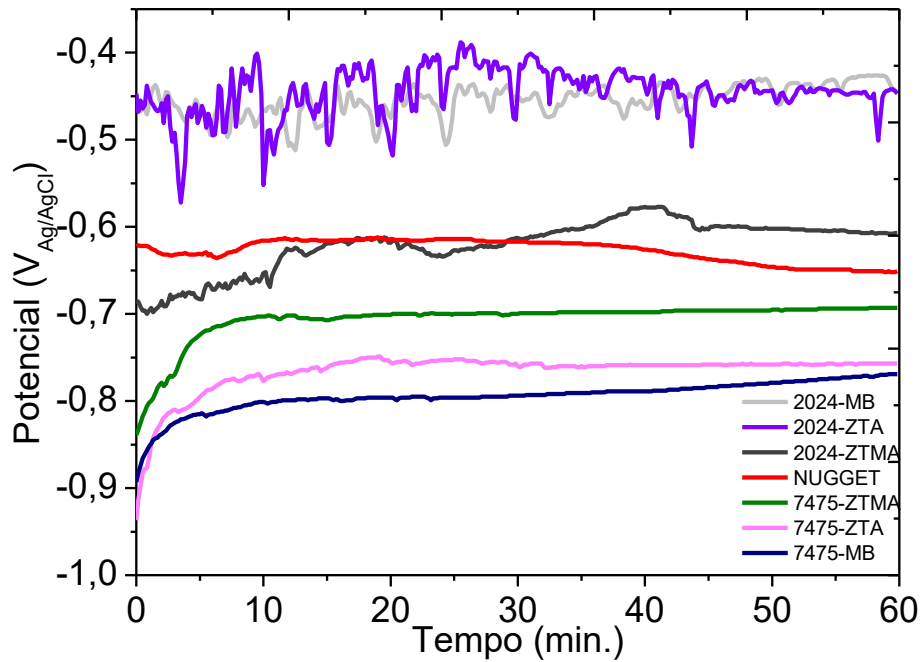


Figura 4: Curvas de potencial em circuito aberto das diferentes zonas formadas pelo processo de soldagem por FSW das ligas 2024-T3 e 7475-T651, obtidas em solução 0,1 M de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  + 1 mM de NaCl.

Os resultados mostram valores de PCA similares, bem como a evolução deste, para as zonas ZTA e MB, para as duas ligas, o que pode ser explicado pelas microestruturas similares destas duas zonas. Os valores de PCA do *nugget* foram intermediários entre os das duas ligas e indicam efeito do acoplamento galvânico entre elas. Valores mais nobres de PCA foram medidos para a ZTMA da 7475-T651 em relação às zonas MB e ZTA. A evolução do PCA da ZTMA das duas ligas mostra deslocamento para potenciais mais nobre, o que pode ser causado pela dissolução preferencial de elementos mais ativos do que o Alumínio da matriz, no caso Mg para a liga 2024-T3 e Zn para a 7475-T651. Após uma hora de imersão em solução os PCAs das diferentes zonas das ligas eram estáveis, e os ensaios de EIS foram realizados após este período de tempo.

Curvas de polarização anódica obtidas após 1,5 hora de imersão em 0,1 M de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  + 1 mM de NaCl para as diferentes zonas na superfície das ligas após soldagem são apresentadas na Figura 5.

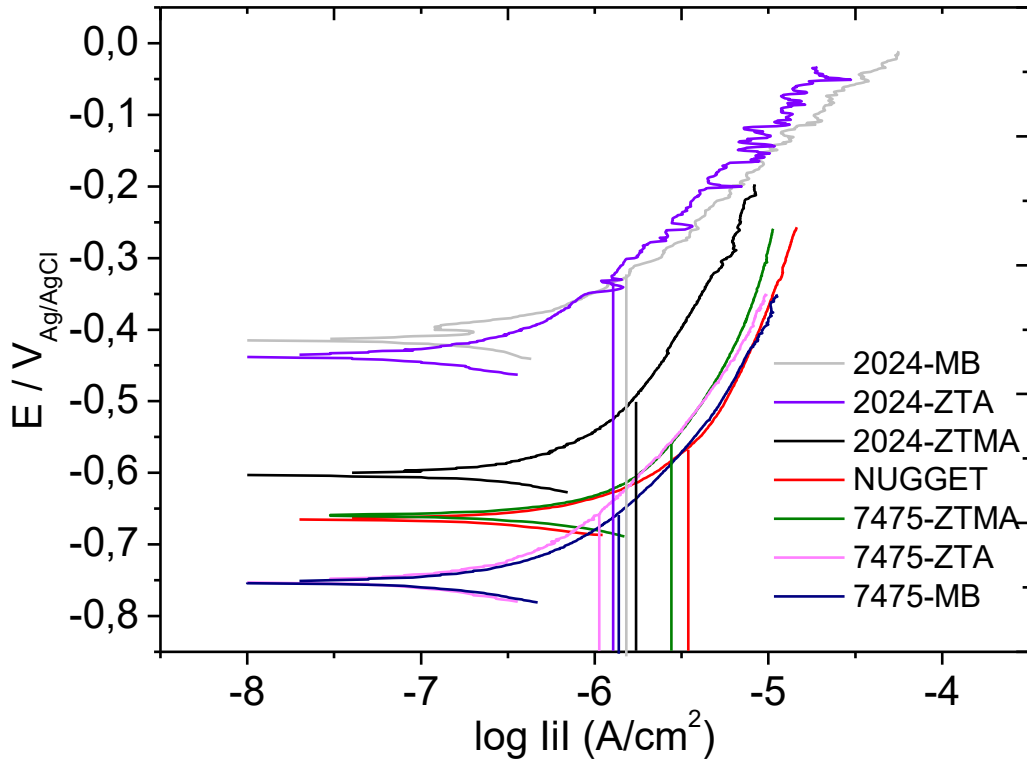


Figura 5: Curvas de polarização anódica das diferentes regiões formadas após o processo de soldagem por FSW das ligas 2024-T3 e 7475-T651, em solução de 0,1 M de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  + 1 mM de NaCl.

Valores de densidade de corrente foram estimados em sobretensão anódica de aproximadamente 100 mV em relação ao potencial de corrosão. Maiores densidade de corrente foram estimadas para a zona do *nugget* e da ZTMA da liga 7475-T761. Estes resultados indicam efeito de acoplamento galvânico entre as ligas (*nugget*). Com relação à liga 2024-T3, as correntes são muito próximas para as zonas, MB e ZTA, conforme indicado nos resultados anteriores, e também comprovado por medidas de microdureza e calorimetria diferencial (DSC) nas várias zonas da liga 2024-T3 (resultados não apresentados aqui). Curvas de polarização muito similares também foram obtidas para as zonas MB e ZTA da 7475-T651. Densidades de corrente maiores quando foram comparadas as três zonas, foram sempre associadas com a ZTMA das ligas.

Espectros de impedância na forma de diagramas de Nyquist para as diferentes zonas ensaiadas em solução de 0,1 M de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  + 1 mM de NaCl são apresentados na Figura 6.



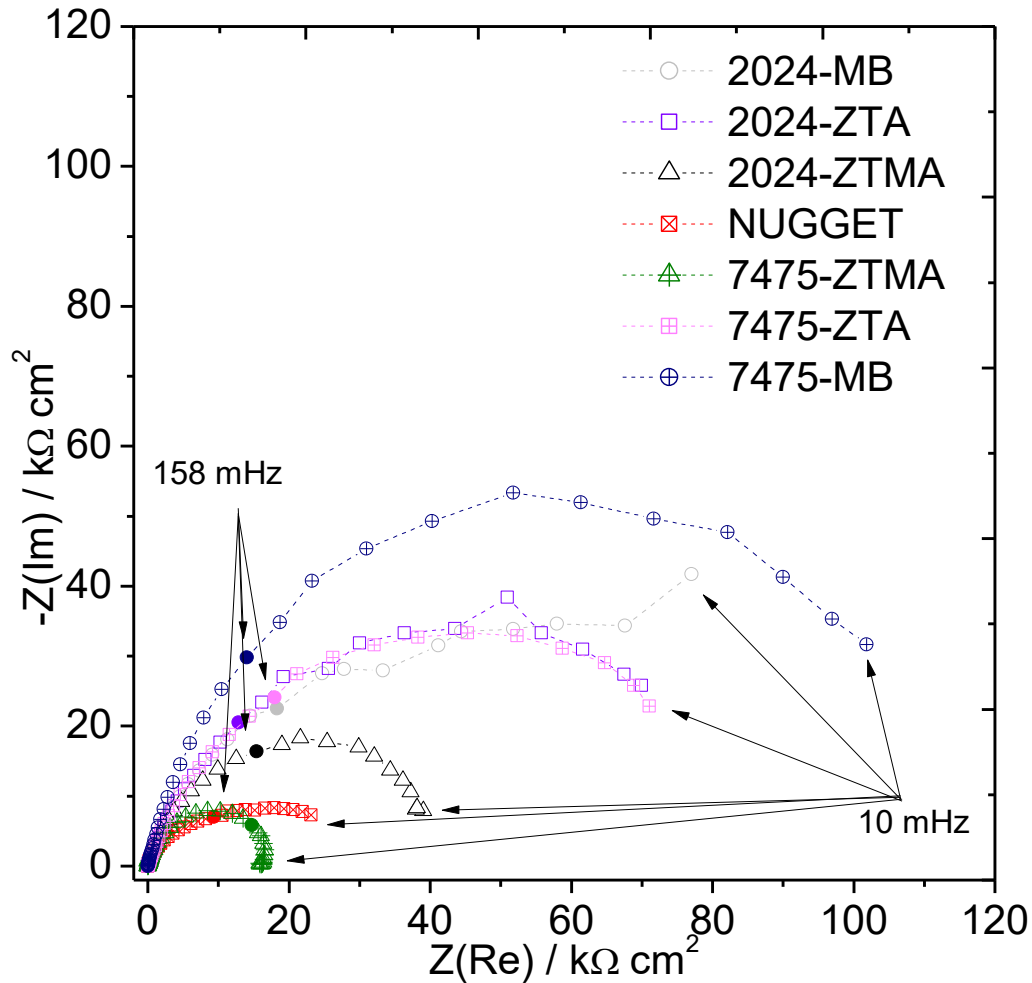


Figura 6: Diagramas de Nyquist para as diferentes zonas formadas pelo processo de soldagem por FSW das ligas 2024-T3 e 7475-T651 obtidos em solução 0,1 M de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  + 1 mM de NaCl.

Os resultados de EIS apresentados na Figura 6 confirmam os resultados eletroquímicos anteriores. Maiores impedâncias foram relacionadas com as zonas MB e ZTA das duas ligas, e as menores com a ZTMA da 7475-T651 e o nugget, apoiando a indicação de efeito do acoplamento galvânico. Estes resultados são explicados pela alta atividade eletroquímica localizada no *nugget* (interface entre as duas ligas). Na ZTMA da liga 2024-T3 foi observada a maior quantidade de precipitados de fase S ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ )<sup>10</sup>, que são anódicos em relação à matriz e que tendem a formar micropilhas com a matriz, promovendo a corrosão localizada. Por sua vez, maiores concentrações de precipitados intergranulares de fase  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ )<sup>11</sup> foram observados na ZTMA da liga 7475-T651. Estes são anódicos em relação à matriz e favorecem o ataque intergranular.

## 4. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho mostraram efeito da soldagem por FSW na microestrutura das ligas soldadas e, conseqüentemente, na resistência à corrosão dessas zonas. Foi observado efeito de acoplamento galvânico no *nugget*, sendo esta a região associada com as maiores taxas de corrosão. As zonas MB e ZTA das duas ligas apresentaram microestruturas, bem como comportamentos eletroquímicos similares. A ZTMA das duas ligas, particularmente da 7475-T651, mostrou resistência à corrosão inferior em relação às zonas MB e ZTA, provavelmente pela grande modificação microestrutural ali localizada em consequência da deformação é imposta pelo movimento da ferramenta contra a superfície do metal, e pelas altas temperaturas atingidas.

## REFERÊNCIAS

- 1 DURSUN, T.; SOUTIS, C. *Materials and Design*, n 56, p 962-871, 2014.
- 2 VARGEL Christian. Elsevier Amsterdam, 626 p, ISBN: 008044954 pg 105, 2004.
- 3 CALLISTER JR., W. D., *Fundamentos da Ciência e Engenharia dos Materiais*, 2ª ed., Rio de Janeiro, LTC, 2006, ISBN: 85-216-1515-9.
- 4 FIORAVANTI, A. S. Soldagem por FSW de ligas de alumínio ALCLAD 2024-T3 e AA7075-T6. 2008. 93 p. Dissertação (Mestrado em Processos de Fabricação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- 5 THE TWI MAGAZINE. A flying success story for friction stir welding, n 122, p 1, 2003.
- 6 COLE, E. G.; FEHRENBACHER, A.; DUFFIE, N. A.; ZINN, M. R.; PFEFFERKORN, F. E.; FERRIER, N. J. *Int J Adv Manuf Technol.*,v. 71, p. 643-652, 2014.
- 7 BOUSQUET, A.; POULON-QUINTIN, A.; PUIGGALLI, M.; DEVOS, O.; TOUZET, M. *Corrosion Science*, n 53, p 3026-3034, 2011.
- 8 SIDANE, D.; BOUSAUET, E.; DEVOS, O.; PUIGGALI, M.; TOUZET, M.; VIVIER, V.; POULON-QUINTIN, A. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, v 737, p 206-211, 2015
- 9 DONATUS, U. ; THOMPSON, G.E. ; ZHOU, X. ; WANG, J. ; CASSELL, A. ; BEAMISH, K. *Materials Characterization*, 107, 85–97, 2015.
- 10 ZHANG, W.; FRANKEL, G. S. *Electrochimica Acta*, v 48, p 1193-1210, 2003.
- 11 AVAL, H.J. *Mater. Des.*, v. 67, p. 413–421, 2015.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP (Proc. 2013/13235-6) e à CAPES (CAPES/COFECUB N.º.806-14) pelo suporte financeiro fornecido.

## INVESTIGATION ON THE LOCALIZED CORROSION OF THE DISSIMILAR ALLOYS (2024-T3 E 7475-T651) JOINED BY FSW

### ABSTRACT

*The aeronautic industry has shown great interest in joining aluminum dissimilar alloys used in different parts of the aircraft. The Friction Stir Welding (FSW) process was developed has been considered as an effective alternative to conventional techniques for welding of aluminum alloys. This technique results in different microstructural areas affecting the corrosion resistance of the material. In this work, the corrosion resistance of the different zones formed in the 2024-T3 and 7475-T761 alloys welded by FSW has been investigated by electrochemical techniques. An electrochemical cell with a small area exposed to the electrolyte (o-ring with 1.0 mm diameter) was used to allow testing the different zones generated, separately. Test solution consisted of 0.1M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 1mM NaCl. The electrochemical results showed lower corrosion resistance associated to the nugget zones. Besides, the TMAZ of the two alloys, mainly of the 7475-T651 presented corrosion resistance inferior to the BM and HAZ zones.*

**Key words:** FSW, aluminium alloys, corrosion, EIS.