

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A CORROSÃO INTERGRANULAR DA LIGA AA 2198-T851 SOLDADA PELO PROCESSO FSW

C. S. C. Machado¹; M. X. Milagre¹; J. V. Araújo¹; M. Terada¹; I. Costa¹
carulinemachado@yahoo.com.br

¹ Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP)
Avenida Prof. Lineu Prestes, 2242 São Paulo- SP, CEP 05508-000

RESUMO

Neste trabalho, a resistência à corrosão intergranular da liga Al-Cu-Li AA2198-T851, soldada por atrito com pino não consumível (FSW), foi avaliada pelo procedimento da norma ASTM G110-97. Não foi observada suscetibilidade à corrosão intergranular desta liga na condição ensaiada.

Palavras-chave: liga AA2198-T851, processo FSW, corrosão intergranular.

INTRODUÇÃO

No processo de soldagem por atrito com pino não consumível, conhecido como *Friction Stir Welding* (FSW), a união é efetuada pela combinação do aquecimento (gerado pelo atrito) e deformação plástica (devido à rotação da ferramenta com pino não consumível), não ocorrendo a fusão do material. Neste processo são geradas quatro diferentes regiões com características peculiares: zona termomecanicamente afetada (ZTMA), zona termicamente afetada (ZTA), metal base e zona misturada. O FSW não produz uma deformação simétrica em relação à linha central de avanço da ferramenta, sendo possível separar a junta em lado de avanço e retrocesso, esta última recebendo a maior quantidade de material deformado⁽¹⁾. O emprego do processo FSW tem muitas vantagens se comparado aos processos que envolvem fusão, dentre as quais destacam-se: eliminação de trincas na zona de fusão e termicamente afetadas, ausência de porosidade na junta soldada e extinção do uso de metal de preenchimento, este último colaborando para que não haja aumento do peso final do componente⁽²⁾.

Uma das formas de diminuir os custos na operação de aeronaves é através do material empregado na confecção das mesmas, uma vez que a redução no peso causa diminuição no consumo do combustível. A redução na densidade dos materiais é a maneira mais efetiva de redução do peso das aeronaves. Devido a sua baixa densidade ($0,54 \text{ g/cm}^3$) e alta solubilidade no alumínio, o Li vem sendo introduzido em ligas de alumínio, obtendo-se ligas Al-Li que são atrativas para aplicações aeroespaciais. Para cada 1% em peso de Li adicionado, há uma redução de cerca de 3% na densidade e aumento de aproximadamente 6% no módulo de elasticidade da liga ^{(3),(4),(5)}. Entretanto, devido à natureza reativa do Li, o comportamento em corrosão de tais ligas deve ser cuidadosamente examinado.

Nos materiais metálicos, a corrosão pode se propagar de duas maneiras diferentes: de forma uniforme na estrutura do material (corrosão uniforme) ou seguir caminhos preferenciais (corrosão localizada). Um dos casos de direção preferencial da propagação da corrosão é a corrosão intergranular ou intercrystalina que se propaga via contornos de grão. Essa forma de corrosão consome somente pequena quantidade de metal, o que explica porque a perda de massa não é um parâmetro significativo para a avaliação deste tipo de corrosão. Quando penetra no interior do metal, a corrosão intercrystalina pode causar a redução das propriedades mecânicas, especialmente do alongamento, e até mesmo levar a ruptura dos componentes⁽⁶⁾.

Uma vez que este é um parâmetro de interesse na caracterização frente à corrosão de ligas de aplicação industrial e pelo fato de a literatura sobre a avaliação deste tipo de corrosão em ligas Al-Cu-Li ser limitada e, mais ainda quando se trata destas ligas soldadas por FSW, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a resistência à corrosão intergranular da liga AA 2198-T851 soldada por FSW.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado para análise foi fornecido pelo Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano). Os parâmetros utilizados na soldagem foram: velocidade transversal = 300 mm/min, velocidade de rotação = 800 rpm, ângulo de inclinação = 3°, penetração = 1,55 mm, força axial = 4KN.

A análise da composição química foi realizada por Espectrometria de emissão óptica com plasma de argônio (ICP-OES) e fluorescência. A Tabela 1 apresenta os resultados.

Tabela 1 - Composição química (% em massa) da liga AA 2198-T851.

Elementos	Teor (%)	Elementos	Teor (%)
Cu	3,80	Sn	0,02
Li	1,07	Ti	0,03
Si	0,20	Zr	0,12
Ni	0,06	Zn	0,03
Mg	1,90	Al	Bal.

A fim de caracterizar a liga na condição soldada, amostras desta foram embutida e preparadas metalograficamente. Para revelar a microestrutura, foi utilizado um ataque com solução de composição: 2 mL HF + 25 mL HNO₃ + 100 mL de água destilada durante sete segundos.

O ensaio de corrosão intergranular seguiu a norma ASTM G110-97. Antes do ensaio a amostra foi submetida a uma etapa de limpeza em solução com 945 mL de H₂O destilada, 50 mL de HNO₃ (70%) e 4 mL de HF (48%) por 1 minuto a 93 °C. Após este período, permaneceu por mais 1 minuto em HNO₃ (70%) à temperatura ambiente. Em seguida, a amostra foi lavada e seca ao ar e submetida ao ensaio em solução com 57 g de NaCl, 10 mL de H₂O₂ (30%) em 1L de H₂O deionizada, por um período de 12 horas à temperatura ambiente. Após o ensaio a amostra foi lavada e seca ao ar.

A superfície da liga foi observada por microscopia óptica após a retirada dos produtos de corrosão por imersão em solução de HNO₃ a 30%v/v (*desmutting*). A secção transversal da amostra (transversal ao cordão de solda) foi embutida em resina e preparada por lixamento mecânico utilizando lixas de carbetto de silício (# 320 a # 4000) seguido por polimento com pasta de diamante de 3 µm. Para revelar a microestrutura foi utilizado o mesmo ataque usado para caracterização. Imagens de microscopia ótica foram obtidas com microscópio Leica DMLM do Laboratório de Eletroquímica e Revestimentos Protetores do Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais (CCTM) do IPEN. Análises de maior resolução foram realizadas em microscópio eletrônico de varredura (*Table top TM3000*).

RESULTADOS

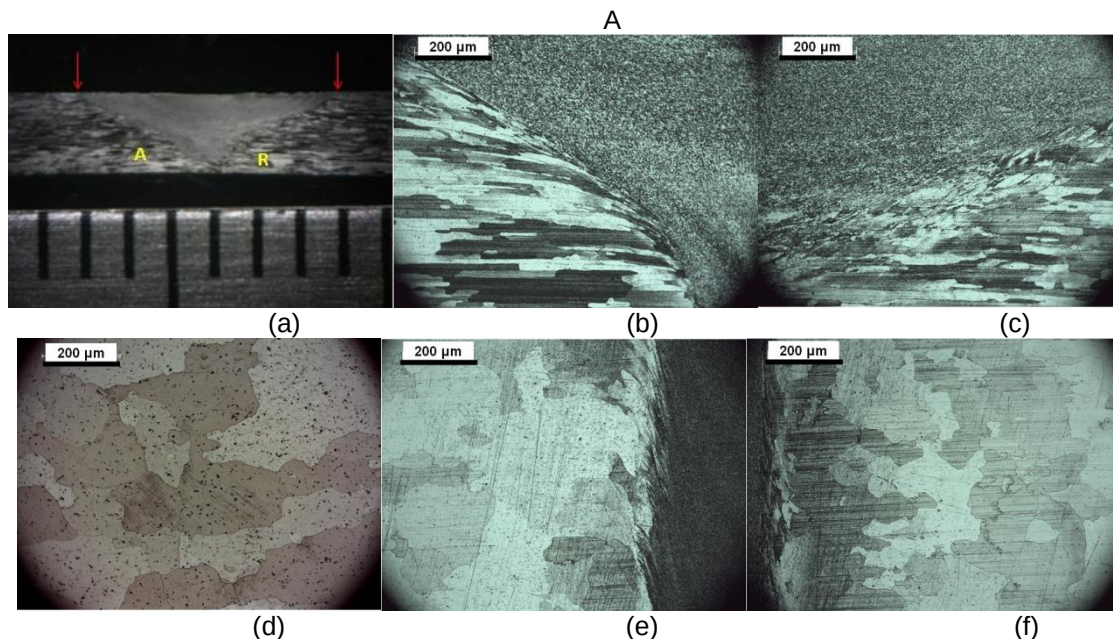


Figura 1 apresenta micrografia (secção transversal e superfície) da amostra soldada, destacando a região da zona misturada (*nugget*), a qual sofre recristalização. Nesta região, os grãos são equiaxiais, diferentemente da região do material não afetada pelo processo FSW (grãos alongados na direção de laminação). Além da alteração na morfologia dos grãos, a literatura afirma que cada região responde de maneira diferenciada à corrosão⁽⁷⁾.

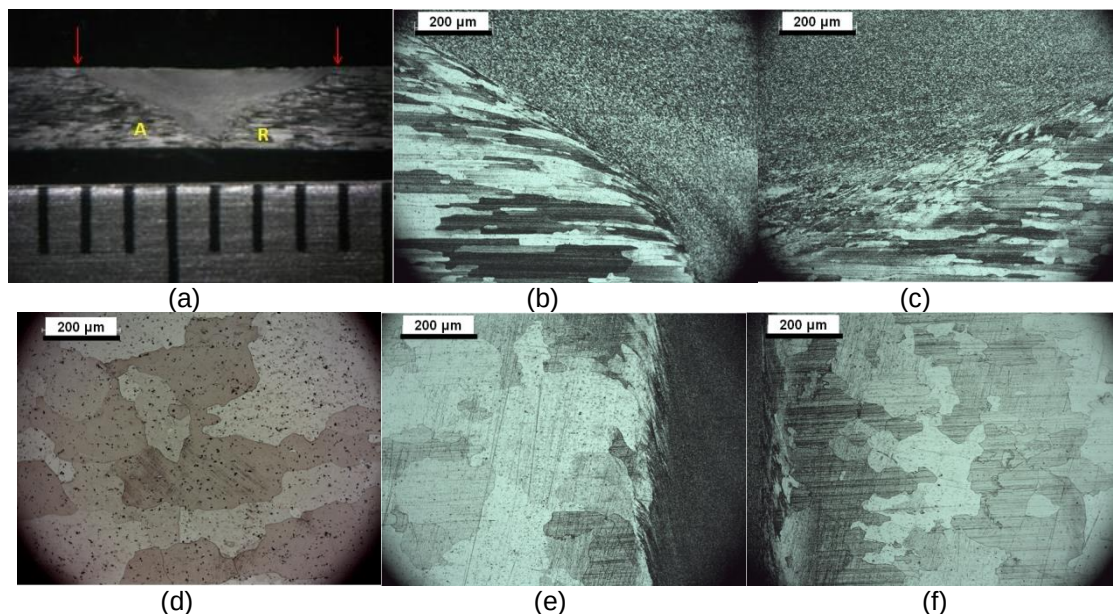


Figura 1 - Microestrutura da liga AA 2198-T851 soldada pelo processo FSW. Vista transversal: (a) geral, (b) ZTMA/ZTA lado de avanço, (c) ZTMA/ZTA lado de retrocesso. Superfície: (d) MB; (e) ZTMA/ZTA lado de avanço, (f) ZTMA/ZTA lado de retrocesso.

A Figura 2 compara a amostra antes e após 12 horas de exposição à solução de corrosão intergranular. Após o ensaio, foi observado que as regiões limítrofes da ZTMA apresentaram produtos de corrosão (Figura 3).

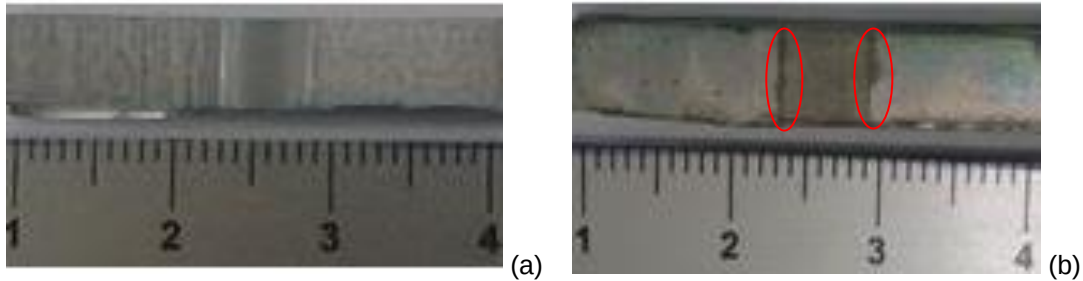


Figura 2 - Liga Al-Cu-Li AA 2198-T851 soldada pelo processo FSW, vista da superfície: (a) antes do ensaio de corrosão intergranular; (b) após 12 horas de imersão na solução de ensaio.

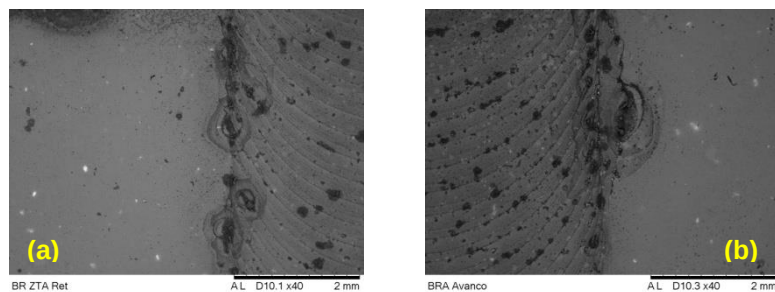


Figura 3 - Micrografia da superfície (a) lado de retrocesso, e (b) lado de avanço.

Nessas regiões também foi observada intensa liberação de bolhas (Figura 4) (indicadas por setas na figura). Embora a corrosão tenha sido mais pronunciada nesses locais, após a retirada dos produtos de corrosão foi observado que o ataque foi superficial, não se aprofundando no material.

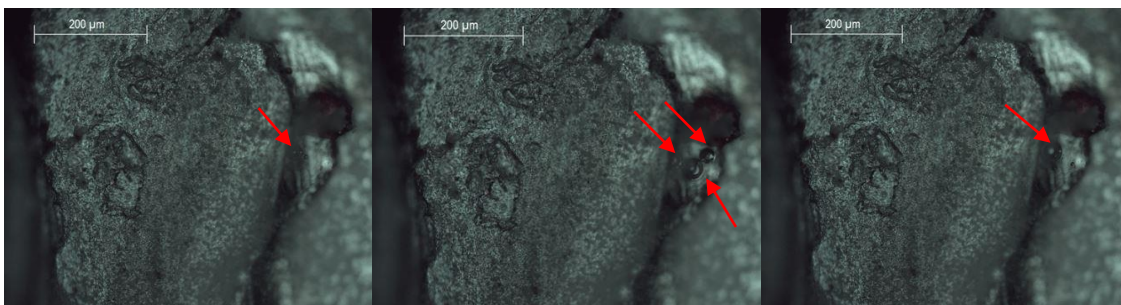


Figura 4 - Evolução de bolhas na interface ZTMA x ZTA - lado de avanço.

Micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura da secção transversal da amostra ensaiada é mostrada na Figura 5. Observa-se nesta figura que não foi também identificada corrosão intergranular nesta secção. Os resultados, portanto, indicam alta resistência da liga à corrosão intergranular.

Nota-se ausência de ataque intergranular e indicação de ataque preferencial dentro de alguns grãos (seta aponta ataque) o que apoia as observações anteriores que indicaram baixa suscetibilidade ao ataque intergranular da liga testada.

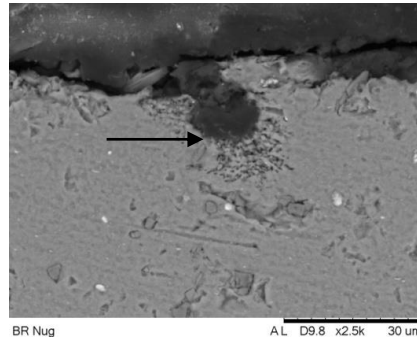


Figura 5 - Corrosão localizada observada na seção transversal da liga AA 2198-T851.

DISCUSSÃO

O mecanismo de corrosão intergranular das ligas Al-Cu-Li tem sido associado à precipitação de fase T_1 (Al_2CuLi) e θ' na liga. Estas formam pares galvânicos com a matriz e com a zona livre de precipitados, conforme observado por Xu *et al.*⁽⁸⁾ para a liga Al-Li 2195. Li *et al.*⁽⁹⁾ propuseram o seguinte mecanismo de corrosão associado com precipitados da fase T_1 . No início esta fase é anódica em relação à liga (matriz), ocorrendo a corrosão seletiva de lítio no precipitado e, conseqüentemente, o enriquecimento em cobre do mesmo. Este enriquecimento causaria o deslocamento do potencial em direção a valores mais positivos com o tempo de ensaio. Como resultado, o precipitado T_1 torna-se catódico em relação à matriz, causando a dissolução anódica da matriz e periferia adjacente.

Proton *et al.*⁽¹⁰⁾ avaliaram o comportamento frente à corrosão de regiões da liga AA 2050 soldada por FSW, seja com ou sem tratamento térmico pós-soldagem, em solução 1M NaCl. Foi observado que a amostra sem tratamento térmico pós-soldagem apresentava extensa corrosão na zona termicamente afetada (ZTA), além de corrosão intergranular. Já a amostra submetida a pós-tratamento (T8) não apresentou corrosão intergranular. Além disso, de forma geral foi observada melhora da resistência à corrosão da amostra com tratamento pós-soldagem.

Embora a presença de Li na composição seja aparentemente favorável à ocorrência de corrosão intergranular⁽¹¹⁾, ao se comparar a resistência à

corrosão intergranular das duas ligas, a liga AA2198 e a AA 2024⁽¹²⁾, esta última apresente maior suscetibilidade que a primeira.

Neste trabalho e no de Araújo⁽¹³⁾ foi observada a liberação de bolhas de gás oriundas do processo corrosivo na liga AA2198-T851. Este fenômeno tem sido atribuído a ataque severo na liga associado à dissolução da fase T₁ presente nesta liga. Ataque localizado severo com penetração da corrosão favorece a acidificação da solução nestas regiões, resultando na liberação de H₂ em locais de corrosão localizada severa ⁽¹⁴⁾. Embora neste trabalho tenha sido observada a liberação de bolhas em regiões de ataque localizado, após remoção dos produtos de corrosão, foi observado um ataque superficial o que não permite se referir a ataque localizado severo.

Luo *et al.* ⁽¹⁵⁾ descreveram dois tipos de corrosão localizada: contínua e descontínua, no qual apenas a primeira resultou em formação de bolhas de hidrogênio durante imersão, especificamente nas regiões de ataque severo. Associado à corrosão localizada severa foi observada a propagação da corrosão ao longo dos grãos e associada a partículas nanométricas⁽¹⁴⁾.

Avaliando a junta soldada, é possível que a corrosão observada esteja relacionada com a diferença de reatividade das regiões, uma vez que a ZTMA sofre diversas transformações que influenciam na forma e distribuição dos precipitados, o que possibilitaria o acoplamento galvânico entre algumas destas zonas, particularmente entre as ZTA e ZTMA, seja do lado de avanço ou do lado de retrocesso, onde foram observadas bolhas de gás.

CONCLUSÕES

A liga AA2198-T851 usada neste estudo não apresentou suscetibilidade à corrosão intergranular. O ataque corrosivo foi localizado na região de interface entre a zona termomecanicamente afetada (ZTMA) e a zona termicamente afetada (ZTA), observando-se intensa formação de bolhas nestas regiões. A corrosão observada deve-se provavelmente ao acoplamento galvânico entre estas regiões de microestrutura diferentes.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP (Proc. 2013/13235-6) e CAPES (Capes/Cofecub N°. 806-14) pelo auxílio financeiro e bolsas concedidas.

REFERÊNCIAS

1. THREADGILL, P.L. et al. Friction stir welding of aluminium alloys. **Int. Mater. Rev.**, 54 (2) (2009), pp. 49–93.
2. CAMPBELL, FC. **Manufacturing technology for aerospace structural materials**. Elsevier. 2006.
3. NISKANEN, P. Corrosion of aluminum alloys containing Lithium. **Corrosion Science**, Vol. 22, No. 4, pp. 283-304, 1982.
4. POLMEAR, I.J. Aluminium alloys – a century of age hardening. **Mater Forum** 2004; 28:1–14.
5. DURSUN, T.; SOUTIS, C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. **Materials and Design**. v.56, p. 862-871, 2014.
6. VARGEL, C. **Corrosion of Aluminium**. 1. ed. San Diego: Ed Elsevier, 2004.
7. JARIYABOON, M. The effect of welding parameters on the corrosion behaviour of friction stir welded AA2024–T351. **Corrosion Science**. 49, 877–909. 2007.
8. XU, Y. et al. Corrosion Properties of Light-weight and High-strength 2195 Al-Li Alloy. **Chinese Journal of Aeronautics**. 24 (2011) 681-686.
9. LI, J-F. Simulation on function mechanism of T1 (Al₂CuLi) precipitate in localized corrosion of Al-Cu-Li alloys. **Trans. Nonferrous Met. SOC. China** 16(2006) 1268-1273.
10. PROTON, V. et al. Influence of Post-Welding Heat Treatment on the Corrosion Behavior of a 2050-T3 Aluminum-Copper-Lithium Alloy Friction Stir Welding Joint. (2011). **Journal of The Electrochemical Society**, v. 158 (n° 5). pp. C139-C147.
11. REBOUL, M.; MEYER, P. Intergranular and exfoliation corrosion study of Al-Li-Cu-Mg-Zr alloys. **Journal de Physique Colloques**, 1987, 48 (C3), pp.C3-881-C3-889.
12. BUSQUIM, T.P.; KURI, S.E. Caracterização microestrutural e resistência à corrosão de juntas soldadas de ligas de alumínio. **In: 17º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Foz do Iguaçu, 2006.
13. ARAUJO, J.V.S. **Influência dos tratamentos termomecânicos T851 e T3 na resistência a corrosão localizada da liga AA 2198**. Trabalho de conclusão de curso. São Paulo. 2016.

14. MA, Y. *et al.* Localized corrosion in AA2099-T83 aluminum e lithium alloy: The role of intermetallic particles. **Materials Chemistry and Physics**. 161 (2015) 201-210.

15. LUO, C. *et al.* Continuous and discontinuous localized corrosion of a 2xxx aluminium - copper - lithium alloy in sodium chloride solution. **Journal of Alloys and Compounds** 658 (2016) 61e70.

EVALUATION OF INTERGRANULAR CORROSION RESISTANCE OF AA 2198-T851 ALLOY WELDED BY FSW PROCESS

ABSTRACT

In this work, the intergranular corrosion resistance of the Al-Cu-Li AA2198- 851 alloy, welded by friction stir welding (FSW) has been evaluated by ASTM G110-97 procedure. There was no susceptibility to intergranular corrosion of this alloy in the tested conditions.

Key-words: AA2198-T851 alloy, FSW process, intergranular corrosion.