

Copyright 2014, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2014, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2014.

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

Estudo da corrosão em ligas de Al-2,0%Fe tratadas por refusão a laser em meio de ácido sulfúrico

Micene T. Katieli^a, Pariona M. Meza^b, Zara J. Alfredo^c, Guimarães Amanda^d, Domingues, Rodrigo^e

Abstract

The remelting superficial laser (RSL) is a technique of growing interest in the recent years, because by its ability of to improve the performance of corrosion of aluminum alloys, as result of the formation of a thin layer and with metastable intermetallic phases. In the present work a laser type Yb: YAG laser with 600W of power and with the sweep speed of 40 mm/minute was used, without protection of gas on the surface of the Al-2.0 wt.% Fe alloy. The study of corrosion was carried out in a solution of 0.1 mol/L H₂SO₄, aerated at 25 °C, and the reference electrode was a saturated calomel (ESC). Corrosion rates based on standards of ASTM G59-97 were determined by measures of potential corrosion (E_{corr}), the resistance of polarization (R_p) and Tafel's constant anodic (β_a), and cathodic (β_c). The results showed a potential corrosion of -0.629V for the untreated Al-2.0 wt.% Fe alloy sample and -0.577V for the laser-treated alloy. The resistances of polarization of 1.78 K Ω for the untreated samples and 12.1 K Ω for the laser-treated sample were obtained. The corrosion rate of the untreated samples showed the value of 1.261 mm/y; while, the value of the corrosion rate for the laser-treated Al-2.0 wt.%Fe alloy was 0.077 mm/y. The laser-treated showed an increase in resistance to corrosion around 16 times in relation to untreated material. These results indicate that the remelting superficial laser treated is an efficient technique to improve the surface quality that requires high level of performance. These results were complemented with the technical electrochemistry of cyclic voltammetry, as well as, the analyzes of macro and microstructure for both alloys samples by optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM) were performed.

Keywords: Remelting superficial laser, resistance to corrosion, aluminium alloys, sulphuric acid.

^a Professora, Departamento de Matemática e Estatística-UEPG, Mestranda Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências de Materiais – UEPG.

^b Professor Doutor, Departamento de Matemática e Estatística-UEPG/ Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências de Materiais – UEPG.

^c Professor Doutor, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências de Materiais – UEPG.

^d Aluna de Graduação, Engenharia de Materiais - UEPG

^e Aluno de Graduação, Licenciatura em Matemática - UEPG

Resumo

A refusão superficial a laser (RFL) é uma técnica de crescente interesse nos últimos anos por sua capacidade de melhorar o desempenho à corrosão das ligas de alumínio, como resultado da formação de uma camada fina refundida e com microestruturas metaestáveis. No presente trabalho foi utilizado um laser do tipo Yb: YAG com 600 W de potência e com velocidade de deslocamento de 40 mm/minuto, sem proteção a gás, sobre a superfície da liga Al-2,0% Fe. O estudo da corrosão foi realizado em solução de 0,1 mol/L de H₂SO₄, aerada a 25 °C, sendo o eletrodo de referência foi de calomelano saturado (ECS). As taxas de corrosão baseado nas normas da ASTM: G59-97 foram determinadas segundo medidas do potencial de corrosão (E_{corr}), da resistência de polarização (R_p) e das constantes de Tafel anódicas (β_a), e catódicas (β_c). Os resultados apresentaram um potencial de corrosão de -0,629V para a amostra não tratada de Al-2,0% Fe e de -0,577 V para a liga tratada a laser. As resistências de polarização obtidas foram de 1,78 KΩ para a amostra sem tratamento e de 12,1 KΩ para a amostra tratada. A taxa de corrosão da amostra sem tratamento apresentou o valor de 1,261 mm/a; enquanto que, o valor da taxa de corrosão para a liga Al-2,0% Fe tratada a laser foi de 0,077 mm/a. O material tratado apresentou um aumento na resistência à corrosão da liga de Al-1,8% Fe em torno de 16 vezes em relação ao material não tratado. Estes resultados indicam que o tratamento de refusão superficial a laser é uma eficiente técnica para aprimorar a qualidade superficial de peças que exigem alto nível de desempenho. Estes resultados foram complementados com a técnica eletroquímica de voltametria cíclica, assim como, com as análises de macro e microestrutura, tanto da liga, como da superfície tratada pela microscopia ótica e por microscopia de varredura eletrônica (MEV).

Palavras-chave: refusão a laser, resistência à corrosão, ligas de alumínio, ácido sulfúrico.

Introdução

O alumínio e suas ligas são usados extensivamente na indústria, especialmente na indústria aeroespacial e automobilística, devido a seu baixo peso específico e boa resistência mecânica. Apesar destas qualidades, no entanto, ligas de alumínio carecem de alta resistência mecânica e de características superficiais, tal como, resistência satisfatória ao desgaste, o que limita sua aplicabilidade.

No entanto, muitas das ligas de alumínio podem ser suscetíveis à corrosão localizada e a esfoliação, particularmente em ambientes contendo meios agressivos. Nesse sentido, têm sido feitos grandes esforços para produzir camadas de superfície que são livres de precipitados intermetálicos a fim de eliminá-los, ou pelo menos reduzir, os seus efeitos nocivos. Um exemplo desse fato é a técnica de refusão superficial a laser (RFL), a qual é utilizada para melhorar a resistência à corrosão das ligas de alumínio, como resultado da formação de camadas fundidas finas com microestruturas refinadas que são praticamente isentos de precipitados intermetálicos e inclusões.

O tratamento superficial a laser se desenvolve de forma bastante localizada e está ligado diretamente à dimensão do feixe incidente sobre a superfície do material, ou seja, uma região em torno de poucos milímetros é afetada. O líquido solidifica de forma epitaxial sobre seu próprio substrato sólido, conseqüentemente, em condições extremas de afinidade físico-

química, o que implica em nucleação sem barreiras energéticas significativas. A microestrutura tem orientação paralela ao fluxo de calor e depende das condições térmicas locais.

Recentemente, novas técnicas emergiram para melhorar as propriedades de ligas de alumínio. A técnica por refusão superficial a laser (RLS) foi estudada extensivamente nos últimos anos, especialmente enfocando a melhora da microdureza superficial e a resistência à corrosão. Segundo Yue (1), a técnica LSR produz modificações microestruturais resultantes do aquecimento de uma região localizada e produz altas taxas de resfriamento. Um estudo realizado por Campestrini (2) mostra que a microestrutura de ligas de alumínio influencia, intensamente, a velocidade de corrosão. As partículas de intermetálicos geradas pela técnica LSR desempenha um papel importante na resistência de corrosão de ligas de alumínio, visto que os mesmos podem dar origem à corrosão localizada, tal como, o pite, esfoliação e a corrosão devido à formação de micro-células galvânicas. A forma, o tamanho e a composição química das partículas dos intermetálicos são determinados pela rota de processamento (tratamento de calor e conformação) aplicada às ligas de alumínio.

De acordo com Campestrini (2) a tensão residual desenvolvido na região aquecida pelo laser desempenha um papel importante na qualidade da propriedade mecânica da chapa tratada. Neste caso, a chapa de metal é aquecida acima da temperatura de fusão na região do feixe do laser. Consequentemente, altos gradientes de temperatura são formados nas proximidades da região fundida, onde são formados altos campos de temperaturas nesta região durante a solidificação, propiciando deste modo tensão térmica (3), (4).

Na presente investigação utilizou-se o RFL sem proteção a gás com 2 kW Yb-fibra laser (IPG YLR-2000S) um laser do tipo Yb: YAG com 600 W de potência e velocidade de deslocamento de 40 mm/minuto, aplicado na liga Al-2,0% Fe a fim de investigar as áreas da camada tratada e não-tratada em meio a ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0,1 mol/L, em solução aerada e a temperatura ambiente (25 °C). Para a caracterização das taxas de corrosão realizou-se das técnicas de medidas do potencial de circuito aberto (PCA), e ensaios de polarizações lineares e de curvas de polarização, assim como, da voltametria cíclica, a fim de verificar o comportamento da corrosão na zona fundida e na zona afetada termicamente pelo tratamento a laser.

Metodologia

Neste trabalho foi utilizada liga de Al-2,0%Fe. Esta liga foi preparada com matérias-primas comercialmente puras, sendo que o alumínio utilizado possui 99,76% de pureza e o ferro 99,97%. A composição química dos materiais utilizados para a fabricação da liga é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química das matérias-primas utilizadas para fabricação da liga Al-2,0%Fe.

Material	Impurezas			
	Fe	Si	Cu	Ni
Al 99,76%	0,09%	0,06%	0,06%	0,03%
Fe 99,97%	-	0,01%	0,01%	0,01%

Fonte: BERTELLI et al. (7)

As amostras foram produzidas no laboratório de Engenharia de Materiais da Unicamp, utilizando-se de um forno tipo mufla. O metal líquido foi vazado em lingoteira de formato cilíndrico e resfriado de forma ascendente. Depois, o lingote resultante foi seccionado em peças com as dimensões de aproximadamente 65x55x8mm. Cada amostra foi submetida a acabamento por jateamento em areia.

O tratamento de refusão superficial a laser foi realizado no laboratório do Instituto de Estudos Avançados do Centro Tecnológico da Aeronáutica CTA-ITA, em São José dos Campos – SP, utilizando um laser de fibra Yb: YAG de alta potência IPG Model YLR2000S. No presente investigação o RFL sem proteção a gás com 2 kW Yb-fibra laser (IPG YLR-2000S) foi aplicado na liga Al-2% Fe, com velocidade de deslocamento de 40 mm/minuto, a fim de investigar as taxas de corrosão, nas áreas da camada tratada e não tratada, em meio de ácido sulfúrico 0,1 mol/L. Os parâmetros do laser são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros do laser utilizados na preparação das amostras

Distância focal da lente	159 mm
Distância da superfície da mesa a lente	160,5 mm
Inclinação da lente em relação à normal da superfície da base	6°
Posição da amostra	3 mm acima do foco (desfocada)
Comprimento de onda do laser	$\lambda=1,06 \mu\text{m}$
Intensidade do laser no instante inicial	$I(0) = 1,81 \times 10^9 \text{ W}/(\text{m}^2)$
Refletividade	63%
Absortividade	37%
Diâmetro do feixe do laser com comportamento gaussiano	entre 0,1 mm e 0,18 mm

Fonte: TELEGINSKI (5)

A largura da trilha de fusão ou de alteração estrutural pode ser mais larga ou estreita do que este valor, em função da temperatura mínima na borda do feixe que causa a alteração. Assumindo que a temperatura radial segue o perfil do feixe gaussiano, onde a condução de calor é o mecanismo mais importante na definição da temperatura. A Figura 1 mostra o equipamento utilizado e as principais partes que o compõem. A seguir, a Figura 2 mostra, esquematicamente, como são produzidas as trilhas de refusão.

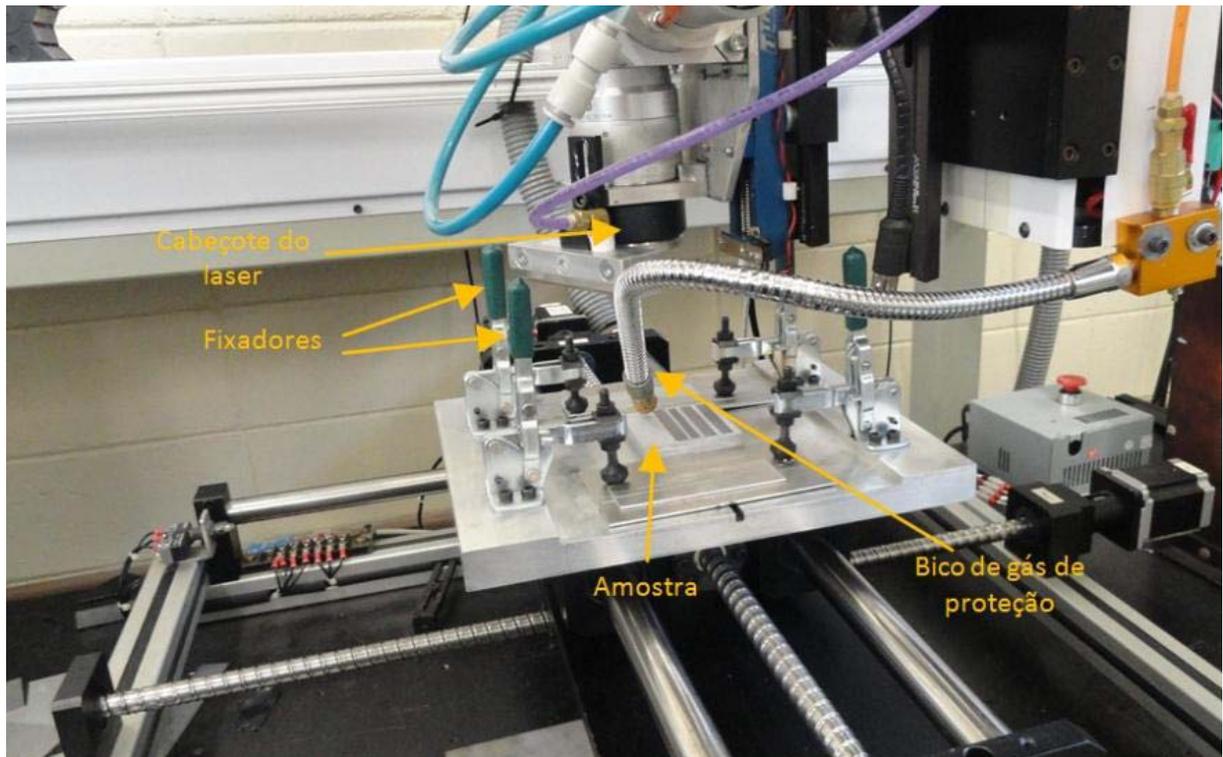


Figura 1: Equipamento a laser utilizado e os seus principais componentes em destaques (5)

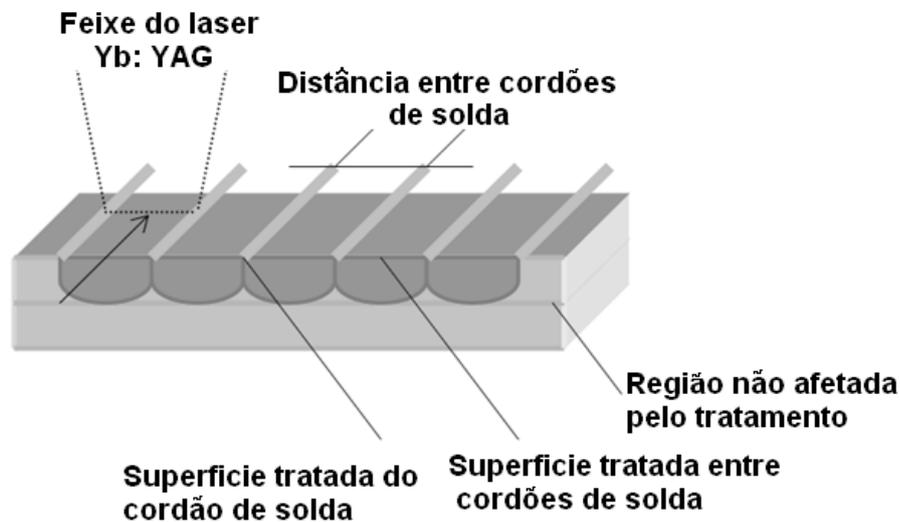


Figura 2: Principais características das trilhas produzidas pela ação do laser sobre a superfície da liga de Al-2,0% Fe.

Foram realizadas caracterizações do material base (substrato) e do material tratado por refusão a laser. A microestrutura resultante foi observada em microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca Shimadzu SSX-550 e microscópio óptico (MO), marca Olympus BX-51 com câmera digital QColor 3 para a captura de imagens. Para tanto as amostras foram cortadas com disco diamantado, preparadas na secção transversal através de lixamento (600 e 1200#), polimento

com pasta de diamante (1 μm) e sílica coloidal. Após estes procedimentos foi realizado o ataque químico com ácido fluorídrico 0,5% v/v por tempos entre 10 e 30 segundos. As Figuras 3 e 4 mostram as imagens da secção transversal e superior, respectivamente, da peça tratada por refusão a laser, obtida por MO.

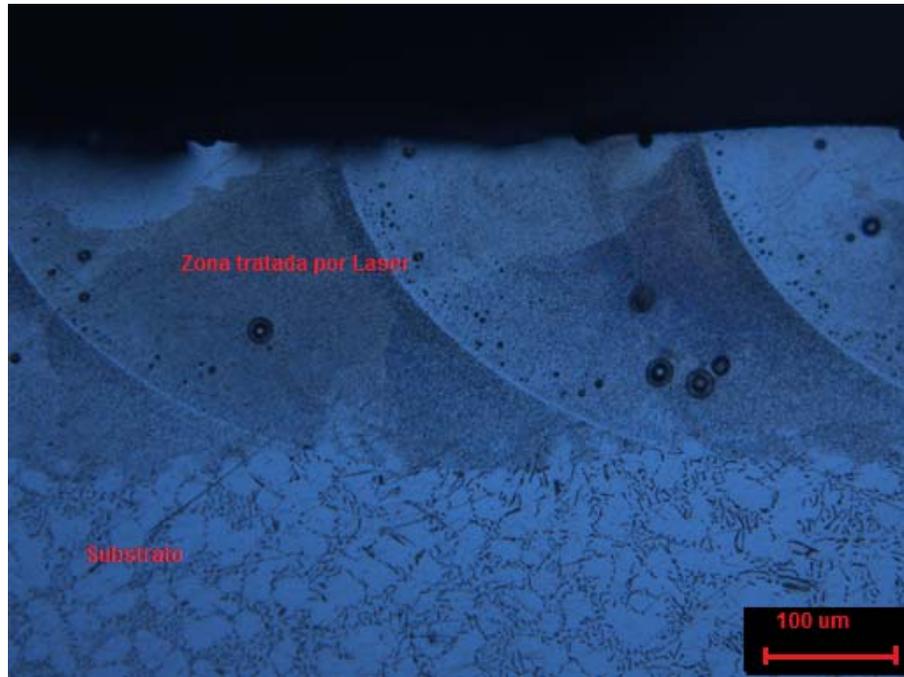


Figura 3: Secção transversal da peça Al-2,0% Fe, tratado por refusão a laser.

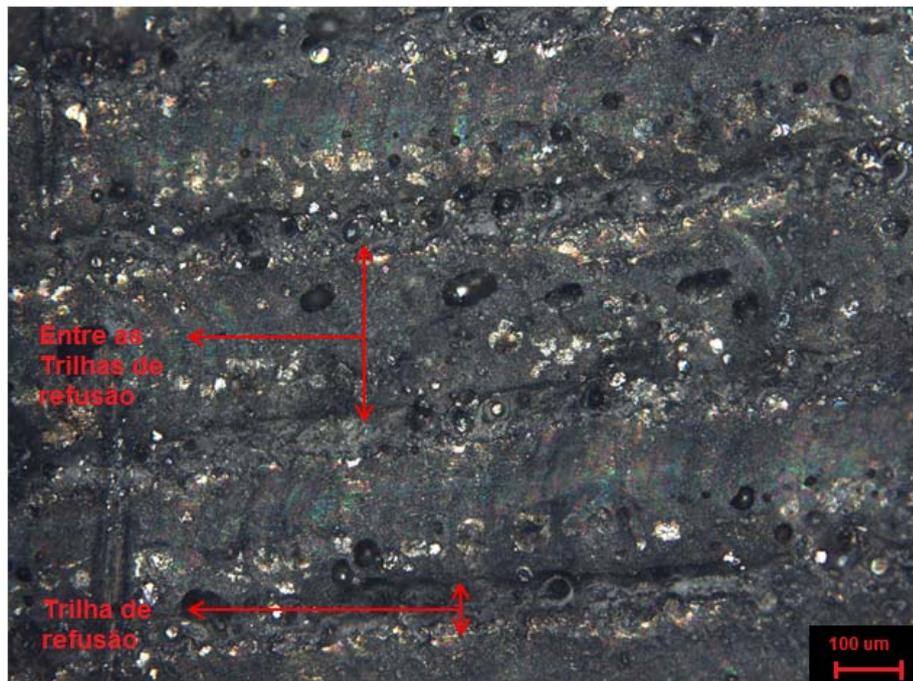


Figura 4: Secção superior da peça Al-2,0% Fe, tratado por refusão a laser.

Utilizando a técnica de MEV, foi analisada a secção transversal da amostra tratada por RSL, a qual é apresentada na Figura 5, onde estão indicadas as regiões do substrato, a zona termicamente afetada (ZTA) e a zona refundida. A ZTA foi ampliada na Figura 5(a), delimita a região entre as trilhas, onde se observa um abaulamento. Segundo Pariona et. al. (6), e Bertelli et al. (7), isso ocorre devido à baixa velocidade de varredura do feixe de laser que conduz ao aumento do tempo de interação do calor com o substrato. A região inferior da interface entre o substrato e a estrutura homogênea formada pela aplicação do laser é ampliada nas Figuras 5(b) e 5(e), onde é claramente perceptível a diferença microestrutural entre elas. A Figura 5(c) apresenta o substrato não afetado pelo tratamento superficial a laser, com uma ampliação dessa região apresentada pela Figura 5(f). Nesta região observa-se a presença de uma fase intermetálica dispersa em uma matriz. Teleginski (5) relata que esta fase intermetálica apresenta uma composição química correspondente a fase de Al_3Fe ou ainda $Al_{13}Fe_4$, o qual é prevista no diagrama de equilíbrio de fases. A figura 5 (d) mostra com maior precisão a microestrutura da ZTA, observa-se que nessa região é quase imperceptível indícios de transições celulares/dendríticas. Ao se comparar as Figuras 5 (d) e 5(f), nota-se a diferença microestrutural entre a área afetada pelo tratamento de RSL e área sem tratamento, onde a ZTA exibe maior homogeneidade que se estende por toda a zona refundida. Segundo Pariona et. al. (8) e Teleginski (5) a região tratada pelo laser apresenta comportamento homogêneo semelhante a uma fase amorfa, e conseqüentemente nessa área ocorre aumento da dureza, redução da rugosidade superficial e aumento da resistência à corrosão.

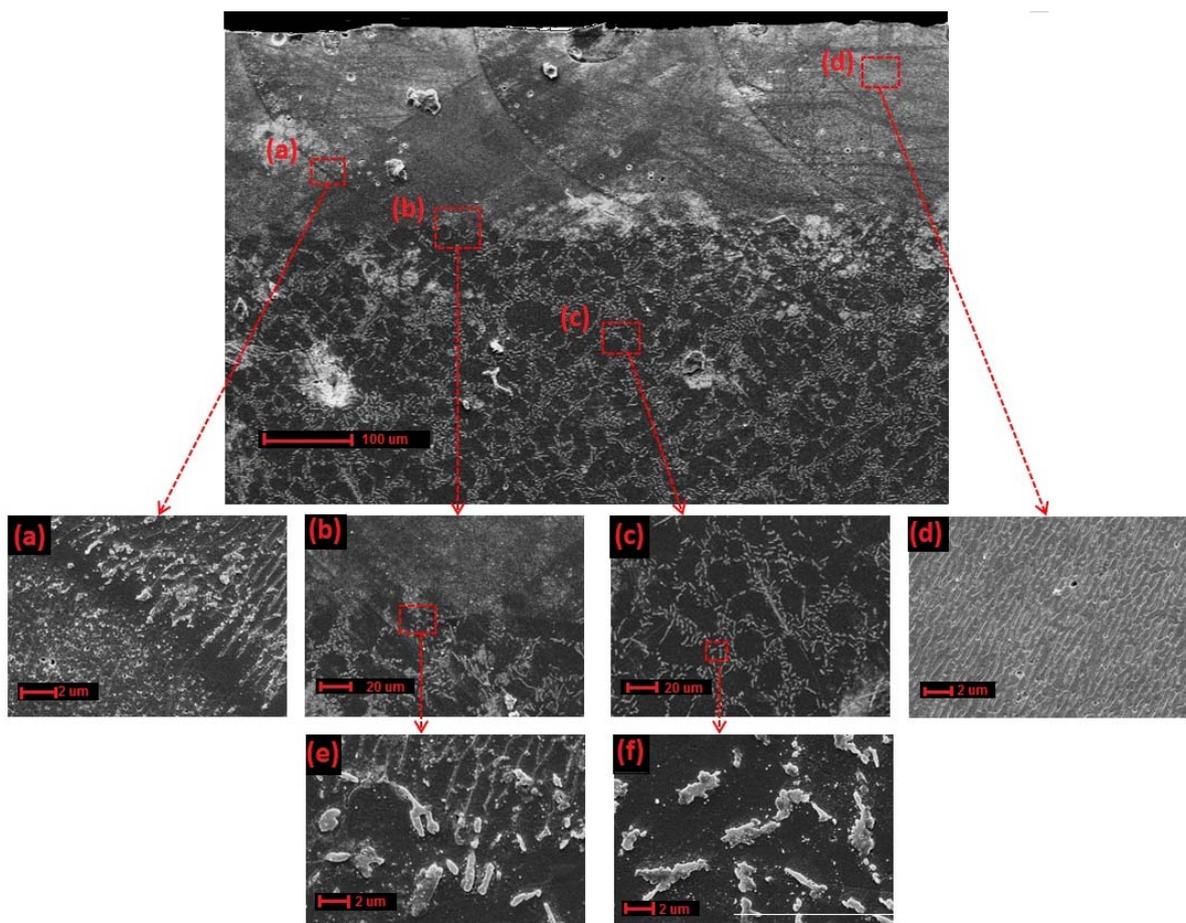


Figura 5 – Imagem da secção transversal obtida por MEV da liga Al-2,0%Fe tratada por RSL

Resultados e discussão

O material tratado a laser foi testado em solução aerada de H_2SO_4 com concentração de 0,1 mol/L, para avaliar a efetividade do tratamento a laser quanto à corrosão. Para isso, foram realizadas medidas de potencial de circuito aberto ou potencial de corrosão, polarizações lineares, curvas de polarizações e a utilização da técnica de voltametria cíclica. Para efeitos de comparação, os ensaios foram realizados no substrato, o qual foi polido com lixa 600# antes de cada experimento e nas amostras tratadas a laser. Os ensaios foram realizados à temperatura de 25 °C, utilizando-se de um termostato de marca Brookfield, modelo TC 501. Estes ensaios foram realizados no laboratório de caracterização elétrica e térmica da Universidade Estadual de Ponta Grossa-PR (UEPG), fazendo-se uso de um potenciostato Autolab modelo PGSTAT 30.

Um metal que sofre corrosão numa solução de baixa resistividade elétrica assume um potencial característico, designado como potencial de corrosão ou potencial de circuito aberto (PCA). Esse potencial é dado pela intersecção da curva de polarização anódica com a de polarização catódica (9). O E_{corr} é um parâmetro eletroquímico de fácil determinação experimental, pois se trata de um potencial assumido pelo metal que é obtido através de medição direta em relação a um eletrodo de referência. Essa medida também é conhecida como medida de potencial de circuito aberto (9). Segundo a norma ASTM G59-97 (10), o potencial de corrosão (E_{corr}) é determinado após o metal estar em contato com a solução eletrolítica durante 3300 segundos (55 minutos).

O potencial de corrosão foi medido para a amostra tratada por refusão superficial a laser e para o substrato polido. A representação de E_{corr} versus tempo é mostrado na Figura 6.

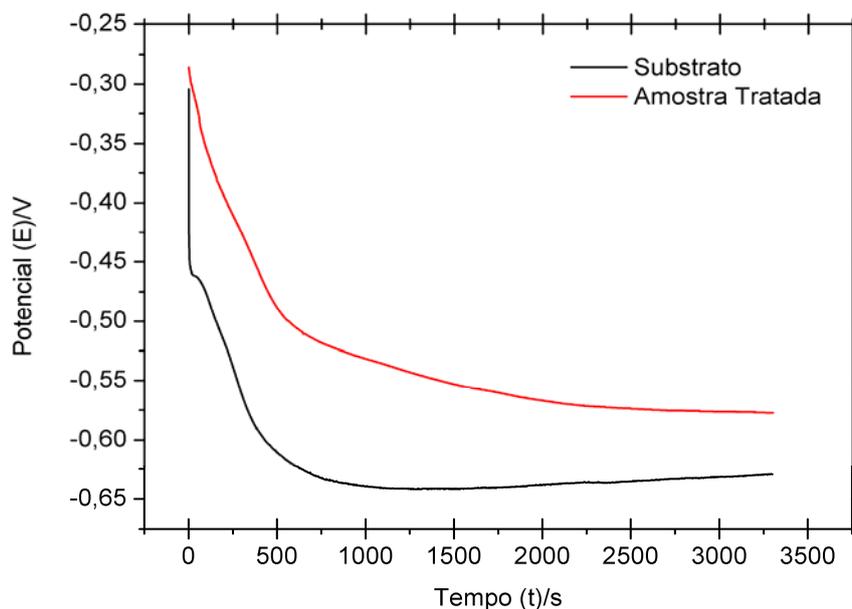


Figura 6 – Potencial de corrosão versus eletrodo de calomelano saturado (ECS) para os eletrodos polido e tratado por RSL em meio aerado de H_2SO_4 , 0,1 mol/L a 25°C.

A amostra tratada a laser apresentou E_{corr} inicial de -0,285, o qual caiu acentuadamente até aproximadamente -0,620 V e se estabilizou a -0,577 V até o final do ensaio. Para o substrato o

potencial foi inicialmente de -0,642 V, decaindo até aproximadamente -0,650 V, permanecendo neste valor até 1000 segundos. Após isso, gradualmente aumentou a até atingir -0,629 V.

Dando continuidade ao estudo de corrosão das ligas Al-2% Fe, tratadas e não tratadas por refusão a laser, realizou-se ensaios de curvas de polarização. Segundo Freire (10) o princípio da técnica de curvas de polarização é a aplicação de sobrepotenciais em relação ao E_{corr} , tanto no sentido anódico como no sentido catódico, exercendo assim uma polarização no metal, as quais permitem, pela observação da magnitude dos valores numéricos medidos e das formas que descrevem após plotadas, que se façam análises preliminares confiáveis sobre o tipo de processo corrosivo em andamento.

A polarização linear produz uma pequena variação de potencial em torno do E_{corr} . A norma ASTM recomenda a utilização entre ± 10 a ± 20 mV em torno do E_{corr} (11). A resistência à polarização (R_p), medida em Ohms (Ω), é o inverso do coeficiente angular da reta formada pela medição da polarização linear, para um dado potencial aplicado. A Figura 7 apresenta o comportamento da corrente após a uma polarização linear de ± 10 mV em torno do potencial de corrosão para as ligas Al-2,0% Fe, tratadas e não tratadas por RSL.

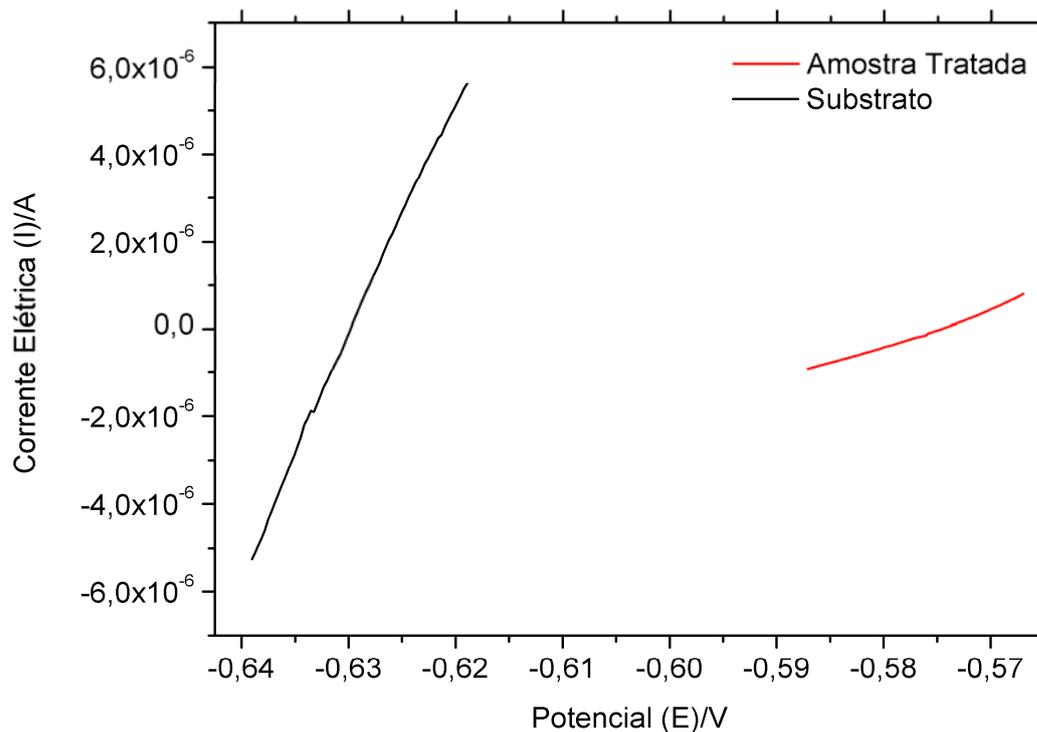


Figura 7 – Polarização linear de ± 10 mV próximo ao E_{corr} para os eletrodos estudados versus ECS em meio aerado de H_2SO_4 , 0,1 mol/L, a 25°C

O inverso das inclinações da Figura 7 permitiu determinar a R_p para os dois eletrodos, sendo que, para a mostra tratada, a R_p foi determinada como sendo de 12,1 $\text{K}\Omega$; já para o substrato determinou-se o valor de 1,78 $\text{K}\Omega$.

Assim como na polarização linear, as curvas de polarização são aplicadas com uma variação de potenciais em torno do E_{corr} , mas esta se varia entre ± 100 e ± 150 mV (11). O gráfico log da corrente elétrica versus o potencial aplicado, obtido na macropolarização fornece informações quanto às reações catódicas e anódicas na superfície das amostras através das inclinações de Tafel catódica (β_c) e anódica (β_a), medidas em V/década, calculadas a partir dos coeficientes angulares das retas catódica e anódica, respectivamente (9), (10). A Figura 8 apresenta o resultado das macropolarizações de ± 150 mV em torno de E_{corr} para a liga tratada e sem tratamento por RSL.

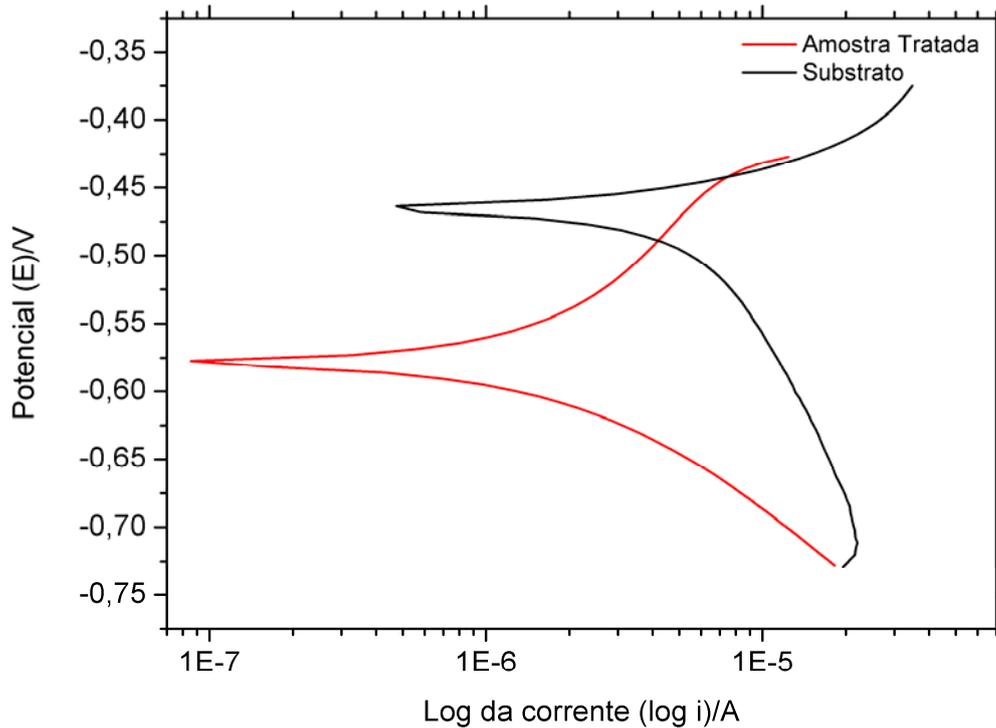


Figura 8 – Curvas de polarização dos eletrodos da liga Al-2,0%Fe tratada e não tratada por RSL em 0,1 mol/L de H_2SO_4 , 25°C, aerado.

Observa-se que o potencial de corrosão é mais anódico (-0,450 V) que o potencial de corrosão do material tratado (-0,575 V) quando da varredura de 1 mV/seg partindo-se de valores catódicos em direção aos anódicos. As inclinações das curvas permitiram determinar as constantes de Tafel catódicas e anódicas, onde se obteve para o material tratado $\beta_c = 0,208$ V/dec e $\beta_a = 0,129$ V/dec, e para o material não tratado (substrato) $\beta_c = 0,084$ V/dec e $\beta_a = 0,296$ V/dec.

A tabela 3 apresenta os parâmetros eletroquímicos obtidos para a liga Al-2,0%Fe tratada e não tratada por RSL em 0,1 mol/L H_2SO_4 .

Tabela 3 - Parâmetros eletroquímicos obtidos para a liga Al-2,0%Fe tratada e não tratada por RSL em 0,1 mol/L H₂SO₄.

Material	E _{corr} (V)	R _p (KΩ)	β _a (V/dec)	-β _c (V/dec)	I _{corr} (A/cm ²)	Taxa de corrosão (mm/ano)
Tratado	-0,577	12,1	0,129	0,208	1,16.10 ⁻⁶	0,077
Substrato	-0,629	1,78	0,084	0,296	7,10.10 ⁻⁴	1,261

Observa-se que a resistência de polarização da liga tratada é de 12,1 KΩ e do substrato é de aproximadamente 1,78 KΩ, ou seja, a liga tratada obteve R_p em torno de 6,7 vezes maior em relação à liga não-tratada. Isso ocorre em função da camada de óxido de alumínio mais espessa formada durante a RSL (5). Por outro lado, esta camada de óxido apresenta uma taxa de corrosão bem abaixo do que a camada fina de óxido de alumínio formada após o polimento da amostra não tratada.

O material tratado apresentou uma taxa de corrosão de 0,077 mm/ano contra 1,261 mm/ano para a superfície da liga não tratada, quando em contato com 0,1 mol/L de H₂SO₄. Ou seja, houve um aumento da taxa de corrosão de cerca de 16 vezes se comparando o material tratado para o material não tratado.

Além das técnicas de curvas de polarização realizou-se também análise de voltametria cíclica das amostras tratadas e não tratadas por RSL. A partir da análise do comportamento das correntes anódicas e/ou catódicas em função do potencial aplicado, esta técnica permite obter informações a respeito dos processos de eletrodo, tais como, a reversibilidade das reações eletroquímicas e a determinação de parâmetros cinéticos e termodinâmicos (9). A Figura 9 apresenta os voltamogramas cíclicos das amostras tratadas e não tratadas por RSL em meio de 0,1 mol/L de H₂SO₄.

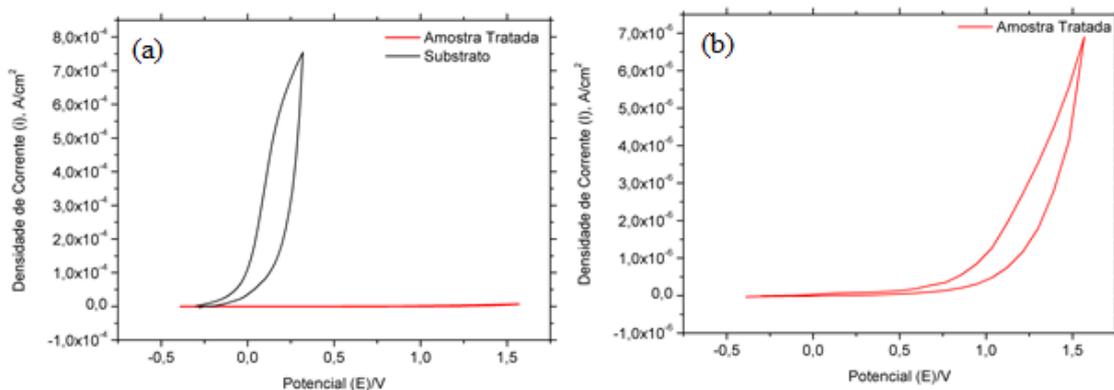


Figura 9- Voltametria cíclica (a) comparativa para as amostras tratada a laser e polida e (b) mostra a ampliação da curva para a amostra tratada 0,1 mol/L de H₂SO₄, 25°C, aerado e 50 mV/s.

A Figura 9 (a) apresenta o voltamograma cíclico partindo de -0,4 V versus ECS até aproximadamente +1,6 V a 50 mV/s. Observa-se que para a amostra não-tratada, com somente uma fina camada de óxido de alumínio formado após o polimento, que a partir de -0,10 V apresentam o surgimento de uma corrente anódica associado ao crescimento do filme de Al₂O₃ sobre o substrato não tratado. Por outro lado, a mesma varredura realizada sobre a liga Al-2,0%Fe tratada por RSL não se observa esta corrente anódica até o potencial de +1,6 V. Isto indica que não se obteve a formação de óxido de alumínio sobre a camada da superfície tratada por RSL, visto que as correntes anódicas são muito baixas como apresentadas na Figura 9 (b).

Conclusões

Nesta pesquisa realizou-se um estudo a cerca da corrosão de ligas Al-2,0 %Fe tratados por refusão superficial a laser (RSL), comparando com amostras não-tratadas (substrato). Para tanto foram realizados ensaios de potencial de circuito aberto ou potencial de corrosão, polarizações lineares curvas de polarizações e voltametria cíclica. Foram realizadas caracterizações do material base (substrato) e do material tratado por RSL através de microscópio eletrônico de varredura (MEV), microscópio óptico (MO)

Os resultados apresentaram que tratamento superficial a laser efetuado em ligas de Al-2,0% Fe conduz a formação de uma estrutura de camadas lamelares com microestrutura mais compacta, homogênea e refinada. Além disso, com aumento de dureza superficial redução de rugosidade e das taxas de corrosão de aproximadamente 16 vezes menor quando comparada com a liga não-tratada em meio de H₂SO₄ 0,1 mol/L.

Referências bibliográficas

- (1) YUE, T. M., et al. Excimer laser surface treatment of aluminum alloy AA7075 to improve corrosion resistance, **Surf. Coat. Technol.** v. 179, p.158-164, 2004.
- (2) CAMPESTRINI P., VAN WESTING E.P.M., VAN ROOIJEN H.W., DE WIT J.H.W., Relation between microstructural aspects of AA2024 and its corrosion behavior investigated using AFM scanning potential, **Corrosion. Sci.** v.42, p.1853-1861, 2000.
- (3) YILBAS B.S., A.F., ARIF M., ABDUL ALEEM B.J., Laser bending of AISI 304 steel sheets: Thermal stress analysis. **Optics & Laser Technology** v.44, p.303–309, 2012.
- (4) PARIONA M.M., RUGENSKI J.K., CANTE' M.V., SPINELLI J.E., GARCIA A. Thermal stress analysis of a directionally solidified Al–1 wt% Ni alloy casting. **Finite Elements in Analysis and Design** v.46, p.889–895, 2010.
- (5) TELEGINSKI, V. **Resistência à corrosão e simulação numérica da temperatura e tensões induzidas na refusão superficial a laser da liga aeroespacial Al–1,5% Fe.** 2012, 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências de Materiais). Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2012.

- (6) PARIONA M. M., et al. Yb-fiber laser beam effects on the surface modification of Al–Fe aerospace alloy obtaining weld filet structures, low fine porosity and corrosion resistance. **Surface & Coatings Technology**, v.206, p.2293–2301, 2012 I.
- (7) BERTELLI, F. et al. Laser remelting of Al–1.5wt.% Fe alloy surfaces: numerical and experimental analyses. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 49, p. 490-497, 2011.
- (8) PARIONA, M. M. et al. AFM study of the effects of laser surface remelting on the morphology of Al Fe aerospace alloys. **Materials Characterization**, v. 74, p. 64-76, 2012 II.
- (9) WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**, São Paulo, Edusp, 2003, 173 p.
- (10) FREIRE, K. R. R. **Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto**, 2005. 192 f. Dissertação (Mestrado Engenharia e Ciências dos Materiais). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.
- (11) ASTM G59-97. **Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements**, 2009.