

Avaliação da influência do aquecimento da liga de alumínio AA5083 na corrosão em ambiente salino.

M.P.S.Ribeiro¹; A. B. R. M. Abrahão¹; L.L.G. SILVA¹, I. L. R. Cintra¹, A. Sartori, R. O. Santos

1-Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba –
Rodovia Vereador Abel Fabrício Dias, 4010 – Pindamonhangaba/SP,
CEP: 12.445-010, Brasil.
Telefone: (12) 3648-8756,
*marcos.sribeiro@live.com

RESUMO: A liga Alumínio AA5083 é bastante utilizada na fabricação de tanques rodoviários, de armazenamento de produtos químicos, silos para estocagem de grãos e tem grandes aplicações marítimas. Sabe-se que a resistência à corrosão de ligas com mais de 3% de magnésio é bastante afetada quando exposta a temperaturas elevadas por tempo prolongado. Portanto este trabalho visa fazer um estudo do efeito do pré-aquecimento da liga de alumínio na resistência a corrosão salina. Foi utilizado para este fim os ensaios: ensaio de imersão, câmara salina e por fim pelo método potenciodinâmico, sendo a caracterização das amostras realizadas antes e depois dos ensaios corrosivos por meio de microscopia eletrônica, metalografia, microdureza, e medidas de massa.

PALAVRAS-CHAVE: sensibilização; corrosão; alumínio; 5083; Potenciodinâmico

ABSTRACT: The aluminum alloy AA5083 is widely used in the manufacture of road tanks, chemical storage, silos for grain storage and has great marine applications. It is known that the corrosion resistance of alloys with more than 3% of magnesium is greatly affected when exposed to high temperatures for a long time. Therefore, this work aims to study the effect of aluminum alloy preheating on corrosion resistance. For this purpose, the following tests were used: immersion test, saline chamber and finally the potentiodynamic method. The characterization of the samples before and after the corrosive tests using electron microscopy, metallography, microhardness, and mass measurements were performed.

KEYWORDS: sensitization; corrosion; aluminum; 5083; Potenciodynamic

1. INTRODUÇÃO

O alumínio, apesar de ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, é o metal mais jovem usado em escala industrial (ABAL, 2003). Esse metal apresenta uma autoproteção natural que só é destruída por uma condição agressiva ou por determinada substância que dissipe sua película de óxido de alumínio (Al_2O_3) de proteção. Essa propriedade facilita a conservação de produtos como portas e revestimentos usados na construção civil, bem como em equipamentos, partes e estruturas de veículos de qualquer porte conforme a Associação Brasileira do Alumínio (2003).

As ligas de alumínio foram divididas em dois grupos, o grupo das ligas trabalhadas, e o das ligas forjadas. Elas foram agrupadas em famílias ou séries, e cada liga dentro de uma mesma série é identificada por um sistema de quatro dígitos (ZANGRANDI, 2008).

Para a série 1xxx, o primeiro dígito designa o alumínio comercialmente puro, que indica aproximadamente 99% de pureza. Para as ligas 2xxx a 8xxx, o primeiro dígito designa a série, a qual

pertence a liga e o seu principal elemento, onde as ligas da série 2xxx, 6xxx e 7xxx são utilizadas para trabalhos mecânicos e tratamentos térmicos. As ligas da série 1xxx, 3xxx e 5xxx são ligas de trabalhos mecânicos sem tratamentos térmicos. (PEREIRA, 2010)

O alumínio 5083 contém 3 a 5% de cromo e manganês, apresentando as melhores propriedades da série 5xxx, como uma boa soldabilidade e uma alta resistência, sobretudo em atmosfera marítima, seu uso é muito comum na indústria naval. Nas ligas comerciais, além do manganês estão presentes outros elementos de liga em menor quantidade, que contribui para a formação da fase β -Al₆(Fe, Mn) (ZANGRANDI, 2008; GOSWAMI; SPANOS; HOLTZ, 2010). Na tabela 2 podemos ver a composição química da liga 5083.

Tabela 1. Composição química da liga de Alumínio AA 5083.

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros
Min				0,40	4,0	0,05			
Max	0,40	0,40	0,10	1,0	4,9	0,25	0,25	0,15	0,15

Fonte: (MARTINS, 2008)

As ligas AlMg são muito resistentes a corrosão e a água do mar, sua resistência é aumentada segundo o grau de endurecimento a frio, a sua aplicação se estende a todos os casos que se necessita dessa propriedade específica, como por exemplo na construção naval. (MAGAROLA, S. C.; BELTRAN, J. 1959). A velocidade de corrosão do alumínio na atmosfera é relativamente baixa e tende a diminuir ao longo do tempo de exposição, com o acúmulo na superfície do metal do produto da corrosão na camada da passivação. A liga AA5083 com 3% de magnésio pode se tornar susceptível ao ataque intergranular e à corrosão sob tensão quando é exposto à temperaturas na faixa entre 50°C e 225°C (CORTNEY B. et al, 2015).

Segundo Sartori e Silva (2007) as ligas contendo mais magnésio em solução sólida do que o equilíbrio permite, tende a precipitar o excesso na forma de um componente denominado de Beta (Mg₂Al₃), que quando precipitada no metal, causa um efeito considerável na liga Alumínio–Magnésio. Este precipitado é altamente anódico, fazendo com que a precipitação diminua fortemente a sua resistência a corrosão, tendendo a gerar corrosão intergranular, sob tensão ou corrosão por esfoliação,

A corrosão intergranular acontece nos contornos de grãos resultando em um desprendimento do mesmo. Quando aquecidas, durante um determinado tempo, algumas ligas tornam-se susceptíveis a este tipo de ataque. Esta corrosão tem mecanismo eletroquímico, onde alguns elementos da liga no momento da difusão se deslocam até o contorno de grão, a fim de formar precipitado o que resulta no empobrecimento da estrutura, conforme (SARTORI; VEIGA, 2005; RAMANATHAN. s.d). Ligas de Alumínio–Magnésio com mais de 3% de magnésio em sua composição, quando expostos a determinadas temperaturas durante determinado período de tempo apresentam um precipitado de Mg₂Al₃ nos contornos de grão. Estes precipitados são menos nobres que a matriz do grão, gerando assim a propagação da corrosão intergranular (NUNEZ, 2007).

O monitoramento da corrosão consiste na utilização de técnicas que permitam avaliar os processos de corrosão, que possam afetar a integridade do material. O monitoramento, também, pode ser realizado através de ações para prever medidas corretivas que assegurem uma vida longa para equipamentos e instalações. O método potenciodinâmico é amplamente utilizado no monitoramento da corrosão, onde são obtidas as curvas de polarização do material. Adicionalmente,

este método é baseado nos fenômenos de polarização e passivação, que assumem um importante papel na cinética dos processos de corrosão eletroquímica, a vida útil do material e a determinação da corrente de corrosão (NUNES, 2007; SAVONOV, 2011; CALLISTER, 2006).

O potencial de corrosão pode ser determinado através das curvas de polarização de um material a ser estudado em contato com um meio corrosivo para avaliar o potencial de corrosão e determinar sua corrente de corrosão (NUNES, 2007; WOLYNEC). Neste contexto, a proposta deste trabalho é analisar o efeito da temperatura na resistência à corrosão da liga de Alumínio AA 5083 em ambiente salino.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

A liga AA 5083, é um material não tratável termicamente, que possui média resistência mecânica e conhecida por apresentar excelente resistência à corrosão. No entanto, a liga pode se tornar susceptível ao ataque intergranular e à corrosão sob-tensão quando é exposta à temperaturas na faixa entre 50°C e 200°C por períodos suficientemente longos. Os corpos de provas da liga de alumínio AA 5083, foram confeccionados em um total de 4 amostras com um diâmetro de 14,8 mm, como mostrado na Figura 1.



Figura 1. Corpo de prova para realização do ensaio potenciodinamico AA 5083.

2.2. Processo de aquecimento

Depois de confeccionadas as amostras, elas foram colocadas em um forno marca GRION, como ilustra a Figura 2. As amostras foram submetidas a uma atmosfera de oxigênio em temperatura de 180° C durante 72 h.



Figura 2. Forno utilizado para o aquecimento das amostras da liga de Alumínio 5083.

2.3. Ensaio potenciodinâmico

Para a realização do ensaio potenciodinâmico, as amostras foram lixadas com lixa de granulometria de 180 a 2000 e polidas com pasta de diamante de $3\mu\text{m}$. A análise eletroquímica foi realizada através de dois métodos, potencial de Circuito Aberto e Curvas de Polarização. Os ensaios foram realizados no equipamento da marca AUTOLAB, modelo PGSTAT 302N (Figura 4). A amostra foi inserida na célula eletrolítica contendo três eletrodos, sendo o eletrodo de trabalho consistiu de amostras de cobre e seus diferentes revestimentos, com a área exposta de $0,8\text{ cm}^2$, o eletrodo de referência (Ag/AgCl) e dois contra eletrodos de Platina.

Para a realização dos ensaios, foi utilizado uma solução aerada de alta condutividade de NaCl 3,5% (p/p) com (pH 6,2), em temperatura ambiente. Todas as amostras permaneceram imersas em solução por aproximadamente 22 horas para a estabilização do potencial e após este período, realizou-se a medida de potencial de circuito aberto no período de 2 horas. Logo após, foram obtidas as curvas de polarização para se determinar a densidade de corrente de corrosão, nas quais foi aplicada uma faixa de potencial de $-1,0\text{ V}$ até $-0,5\text{ V}$ com uma velocidade de varredura de $0,33\text{ mV/s}$. O aparelho potenciostato da AUTOLAB 302N foi utilizado para a realização destes métodos, como ilustrado na Figura 3.



Figura 3. Aparelho potenciostato utilizado para determinação dos potenciais

2.4. Ensaio de imersão das amostras em água do mar

Foram confeccionadas ao todo quatro amostras de ligas de alumínio AA 5083, sendo duas amostras: uma aquecida e a outra como recebida. As dimensões das amostras, que foram lixadas e

as medidas de suas massas iniciais para os testes de imersão em água salina são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Valores das áreas e massas das amostras

Período de Imersão	Amostras	Área (mm ²)	Massa iniciais das Amostras (g)
120 Dias	Padrão (n/s) 2	404,95	1,4681
	Aquecida (s) 2	407,89	1,1080

Fonte: Autor

Para a realização do teste de imersão as amostras foram colocadas em béqueres de 50 ml com 30 ml de água do mar da praia do Tenório da cidade de Ubatuba-SP.

2.5. Ensaio de microdureza Vickers

O ensaio de microdureza Vickers fornece a escala de dureza contínua, e aplica-se a uma gama de materiais e microestruturas. A impressão do endentador de diamante é extremamente pequena e com aplicações de cargas de 1 a 1000g. As amostras foram limpas com acetona e álcool na superfície para deixar isentas de impurezas e óxidos. Todos os testes são realizados na escala de 0,1 Kgf aplicando a carga na superfície da amostra por 15s e seguem a norma ASTM E92 (1997).

2.6. Microscopia óptica

A análise foi executada por microscopia óptica através do estereoscópio da marca Olympus SZ2-ET com aumento de 6,7x a 45x e do microscópio óptico da marca ZEISS modelo Vert.A1.

2.7. Microscopia de varredura

Esta etapa teve como objetivo mostrar o efeito da corrosão após a realização do teste potenciodinâmico, mostrando assim o efeito e o tipo de corrosão nas amostras da liga AA 5083 padrão e tratadas termicamente. Para a obtenção das imagens foi utilizado um microscópio de varredura eletrônica da marca ZEISS, modelo LEO 1450VP.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Potencial de Circuito Aberto e Curvas de Polarização Potenciodinâmica

Com os resultados obtidos do teste de Potencial de Circuito Aberto, foram feitas as comparações da liga AA5083 como recebida e submetida por processo de aquecimento, como mostrados na Figura 4, que apresenta os potenciais em função do tempo. A liga AA5083 aquecida apresentou um leve aumento do potencial em função do tempo até se estabilizar em -0,78V, enquanto que, a liga AA 5083 padrão, apresentou uma leve diminuição do potencial até se estabilizar em aproximadamente -0,81V,

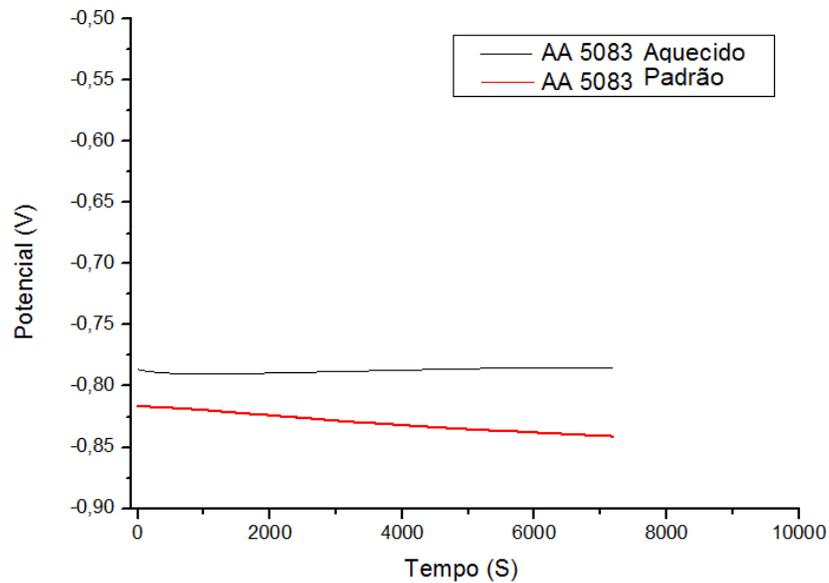


Figura 4. Potencial de Circuito Aberto (OCP) para as ligas de alumínio AA5083 tratadas e não tratadas termicamente.

Na Figura 5 pode ser observado que a região catódica das duas curvas de polarização, mostrou uma diminuição da densidade de corrente com o aumento do potencial aplicado até atingir o potencial de corrosão (convergência entre as curvas). Logo após pode ser visto um gradativo aumento da densidade de corrente com o aumento do potencial aplicado, que corresponde à região anódica da curva, onde há degradação do material.

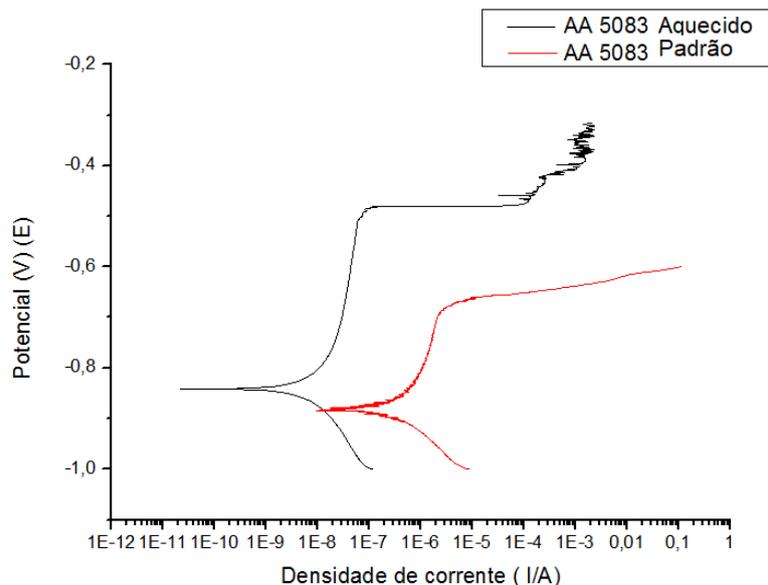


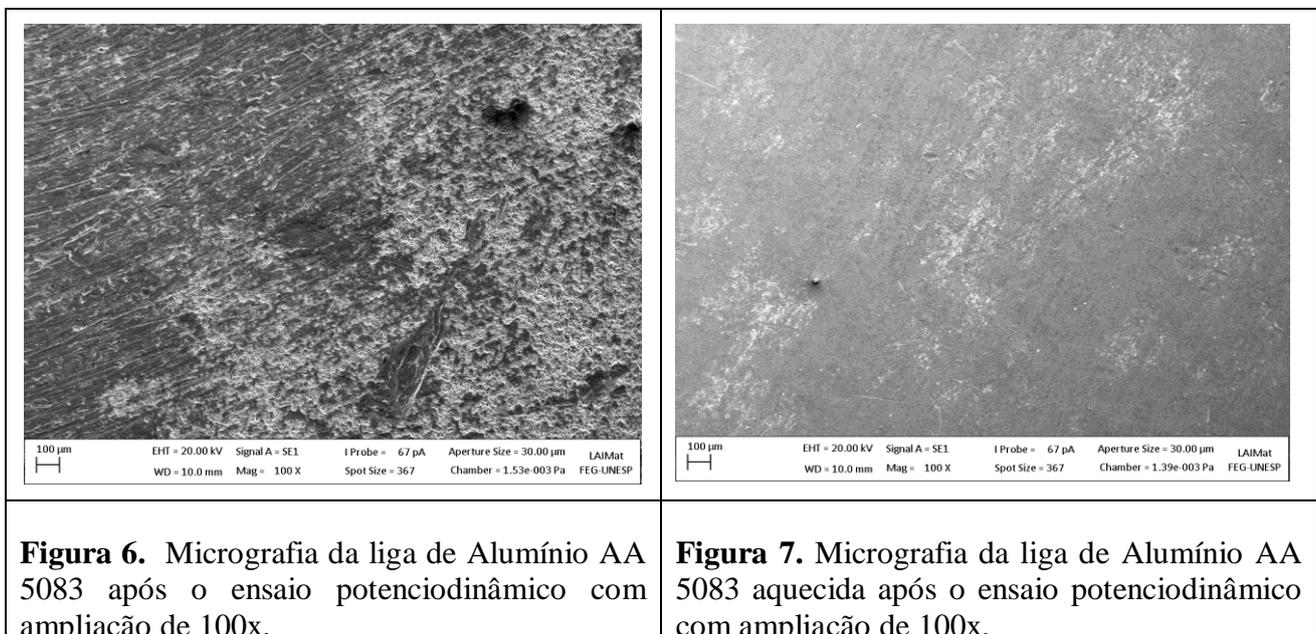
Figura 5. Curva de polarização para as ligas de alumínio aquecido e padrão.

O potencial de corrosão para a curva da liga de alumínio tratada ($\sim -0,84\text{V}$) foi maior do que o potencial de corrosão para a liga como recebida ($-0,90\text{ V}$), indicando um caráter mais nobre, como visto na Figura 5. Foi também observado que enquanto a densidade de corrente de corrosão da amostra tratada termicamente ($6,5 \times 10^{-10}\text{ A/cm}^2$) foi de duas ordens de grandezas menor que a densidade de corrosão da liga padrão ($3,0 \times 10^{-8}\text{ A/cm}^2$), confirmando um aumento da resistência á corrosão da amostra aquecida.

Adicionalmente, foi verificada uma região passiva para as duas amostras, que corresponde a uma camada de proteção sobre a liga, sendo mais pronunciada na amostra aquecida. Para a liga tratada, a região passiva a faixa de potencial foi em torno de $-0,82\text{ V}$ até aproximadamente $-0,46\text{ V}$, já a amostra sem aquecimento apresentou uma região passiva compreendida entre aproximadamente $-0,88\text{ V}$ e $-0,68\text{V}$. A partir deste valor de potencial a camada se rompe e a densidade de corrente aumenta acentuadamente, provocando um aumento da corrosão das amostras.

3.2. Análise das amostras submetidas ao ensaio potenciodinâmico por Microscopia Eletrônica de Varredura

A análise realizada pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) das amostras utilizadas no ensaio potenciodinamico mostram que no alumínio como recebido apresentou corrosão superficial e provavelmente a formação de pites de corrosão, onde houve maior degradação da superfície comparada com o material passado pelo processo de aquecimento. Como visto nas Figuras 6 e 7 houve uma maior taxa de corrosão na amostra de material puro mostradas nas áreas de coloração branca onde se pode ver em grandes regiões de corrosão, enquanto na amostras aquecidas poucas áreas apresentaram corrosões menores e de formas mais espalhadas.



As amostras de AA 5083 tratadas em comparação com as sem tratamento apresentaram a região submetida ao ensaio potenciodinâmico com aspecto mais homogêneo sem imperfeições que podem ser atribuídas principalmente pela formação de pites de corrosão. Adicionalmente este fato pode ser explicado pela tendência destas ligas de alumínio com o aumento de temperatura,

formarem uma camada de passivação com composição principalmente em Magnésio e fazer a proteção inicial da superfície (NUNES, 2007). Como sequência destas análises também foram obtidas micrografias com ampliações maiores destas áreas ensaiadas das amostras como ilustradas na Figura 8 e 9.

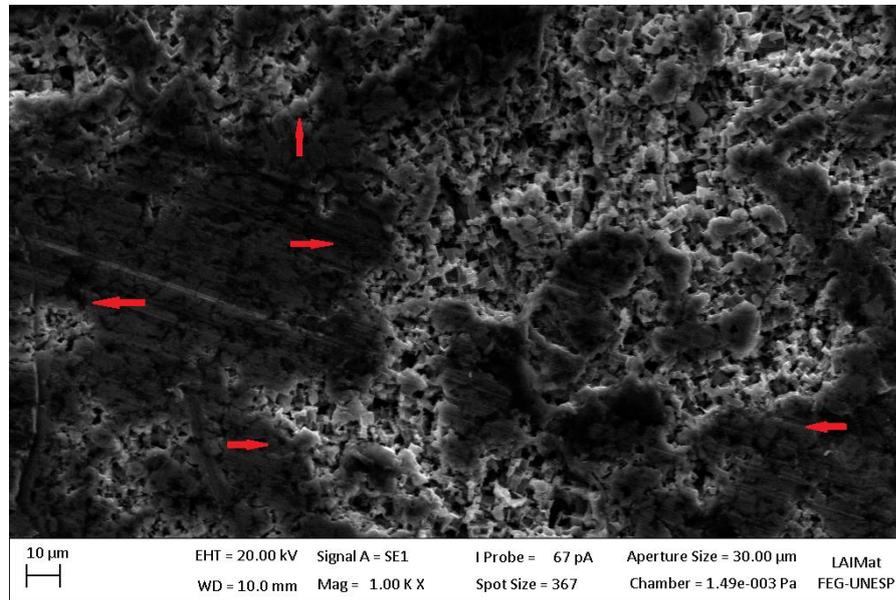


Figura 8. Imagem obtida por microscópio de varredura da liga de Alumínio AA5083 após o ensaio potenciodinâmico (1000x).

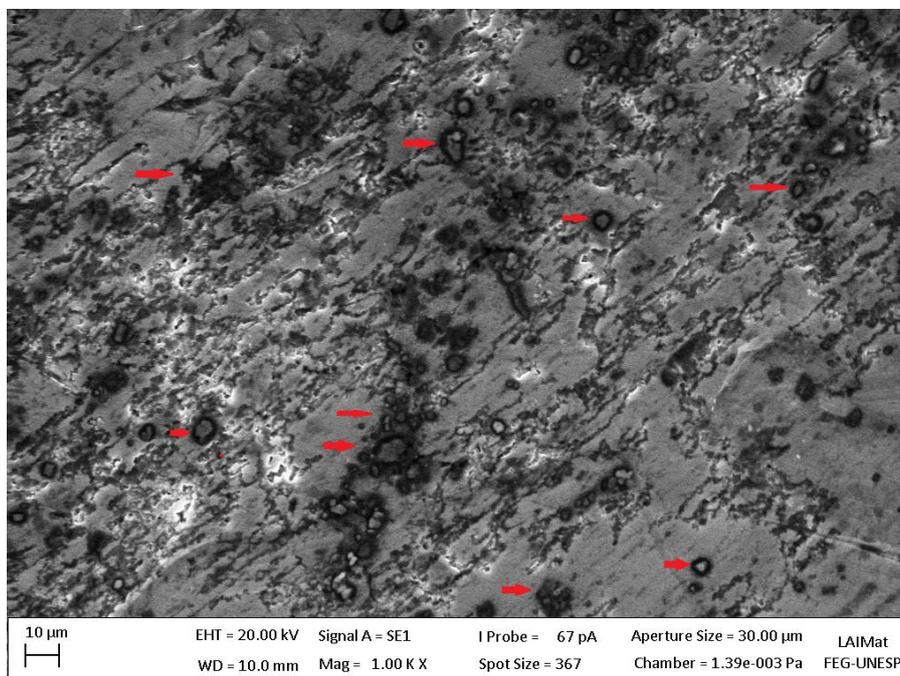


Figura 9. Imagem obtida por microscópio de varredura da liga de Alumínio AA5083 aquecida após o ensaio potenciodinâmico (1000x).

Com as análises da Figura 8 e 9 pode observar a menor presença de pites (mostrado pelas setas vermelhas) de corrosão na amostra tratada devido tendência da passivação desta liga quando aquecida (NUNES, 2007). Um outro fator que contribui para a passivação é o fenômeno de

sensitização do material, em que com aumento da temperatura o Magnésio do interior do grão precipita fazendo com que sua camada passiva se torne relativamente mais resistente, entretanto podendo causar o empobrecimento no contorno de grão e a precipitação da fase Al_2Mg_3 . (OGUOCHA; ADIGUN; YANNACOPOULOS, 2008)

3.3. Análise metalográfica das amostras pelos ensaios de imersão

As amostras de AA 5083 ficaram imersas em água do mar durante 120 dias, ao final do processo foi feita a observação da degradação da superfície do material em meio salino, onde foi realizada a comparação do alumínio tratado e comum. A figura 10 mostra a análise visual da superfície do material, onde pode ser observada a agressividade do meio salino para a liga de Alumínio AA 5083.

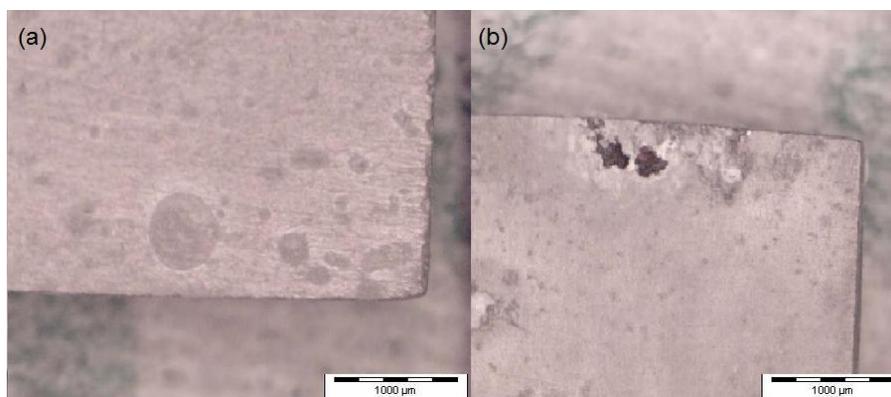


Figura 10. Imagens da superfície das amostras da liga de Alumínio 5083 após a imersão em meio salino ampliação de 15x (a) como recebida (b) pré-aquecida.

As amostras comuns apresentaram tanto degradação branda em sua borda como também apresentou indícios de corrosão localizadas das bordas para o centro, formando pequenos pites de corrosão superficiais. No material que passou pelo processo de aquecimento, pode-se observar que houve uma degradação mais agressiva nas bordas, além da presença de pites maiores e mais profundos de corrosão (setas vermelhas). Ficou ainda evidenciado que durante o período imerso 120 dias, o a liga AA 5083 não pré-aquecida começou a ter propagação de corrosão intergranular (setas pretas) através dos pites (setas vermelhas) de corrosão no material, como visto na Figura 11.

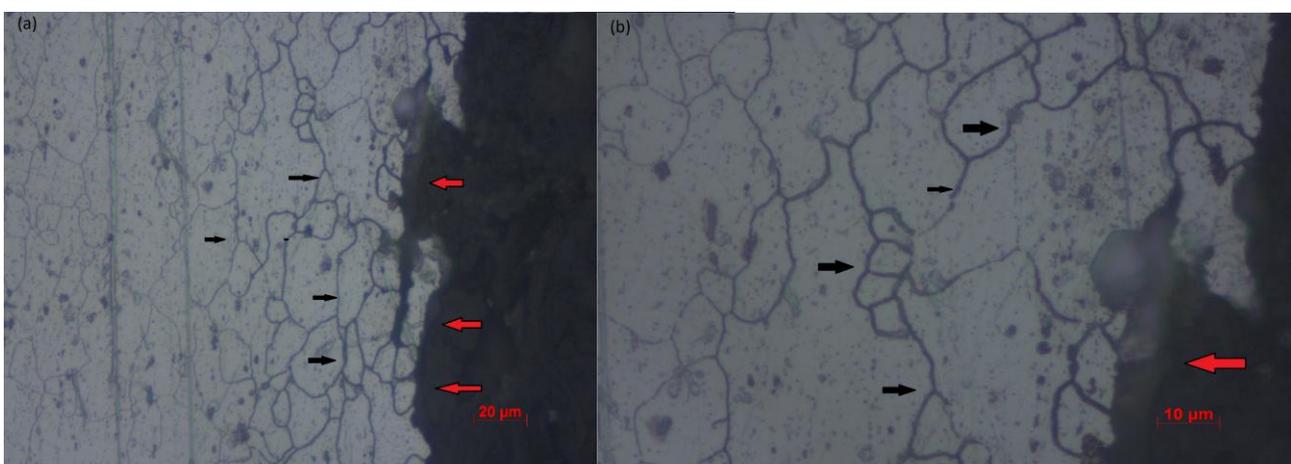


Figura 11 microestruturas da liga AA 5083 padrão com aproximação de (a) 500x e (b) 1000x, evidenciando a presença de corrosão intergranular e de pites.

Nas amostras tratadas foi verificada uma degradação maior e mais profunda, sendo que a microestrutura apresentou uma maior área de corrosão intergranular tanto na borda da amostra quanto no interior da superfície analisada apontando a sensitização da liga. A Figura 12 mostra o sentido da corrosão intergranular, evidenciado pela seta preta.

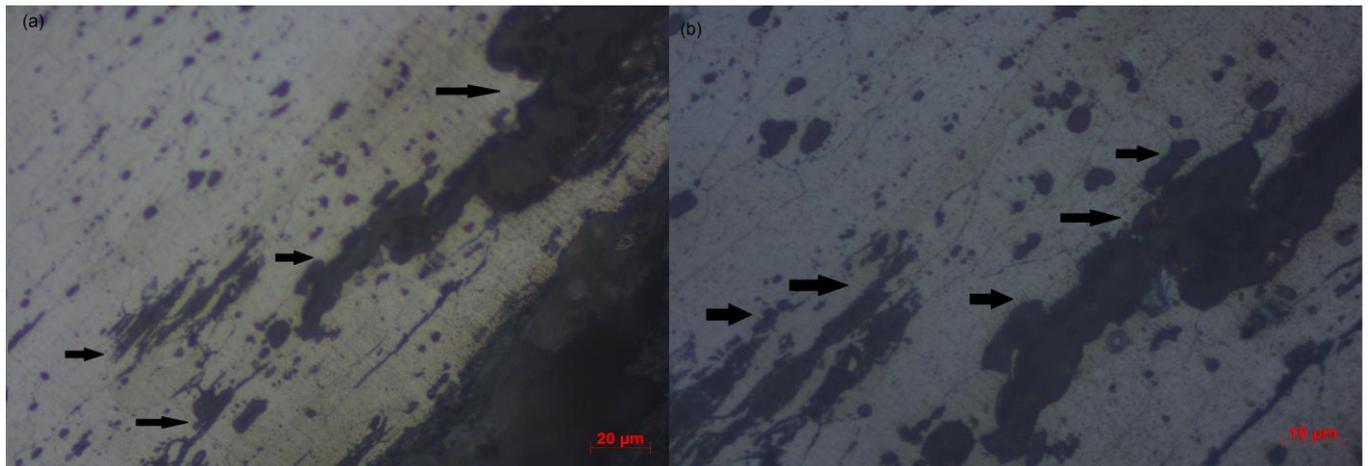


Figura 12 microestruturas da liga AA 5083 aquecida com aproximação de (a) 500x e (b) 1000x, evidenciando a presença e a direção de corrosão intergranular

3.4. Microdureza

Após a finalização do teste de imersão foi realizado o ensaio de microdureza para a verificação da dureza superficial nas amostras de alumínio. Foi verificada a dureza das amostras do material pré-aquecido e padrão após imersão em água do mar com o período 120 dias. Na Tabela 2 são mostrados os valores obtidos através do teste de microdureza.

Tabela 2. Comparação da Dureza HV do AA 5083

Amostras	Dureza HV	
	Imersas	Não Imersas
AA 5083 Aquecida	162,75	116,8
AA 5083 comum	89,14	81,94

Fonte: Autor

A liga de alumínio pré-aquecida apresentou maior dureza antes e depois do teste de imersão comparadas com as amostras padrão. O aumento da dureza (~30%) das amostras pré-aquecidas (~120 HV) foi devido possivelmente, à formação da fase β (Al_2Mg_3) durante o processo de aquecimento da liga. Entretanto, a liga padrão apresentou uma dureza entre 80 HV a 90 HV, evidenciando assim que o processo de aquecimento levou a formação de uma camada passiva aumentando a dureza superficial do material quando aquecido confirmando os fatos observados pelas análises feitas por microscopia onde detectou-se a presença pronunciada da camada passiva.

3.5 Análise das massas e taxa de corrosão após o ensaio por imersão

Os valores de massa das amostras antes e depois da imersão por 120 dias revelaram um pequeno aumento da massa referente as amostras que passaram por um pré-aquecimento e uma perda de massa da liga padrão na mesma ordem de valor. As taxas de corrosão considerando as perdas e ganhos de massa em módulo são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Valores de medidas de massa e taxa de corrosão das amostras da liga 5083 aquecidas e como recebidas após ensaio de imersão em água do mar.

Amostras	Massa iniciais das Amostras (g)	Massa final das Amostras (g)	Taxa de corrosão (mm\ano)
Como recebida	1,4681	1,0947	0,0996
Pré aquecida	1,1080	1,4567	0,0937

Como observado o ganho de massa da amostra pré-aquecida corrobora também com as análises anteriores pois sugere que este ganho é referente da formação da camada passiva na superfície.

4. CONCLUSÕES

Considerando os ensaios potenciodinâmico á liga de alumínio AA5083 pré-aquecida no período de três dias mostrou uma densidade de corrente de corrosão duas ordens de grandeza menor que a da liga padrão, mostrando assim um aumento da resistência à corrosão em meio salino. Esta liga também mostrou uma tendência a ter um comportamento um pouco mais nobre do que o que a liga de alumínio padrão, com os resultados apontando a causa ser a formação de uma camada passiva mais pronunciada. As imagens MEV confirmaram os resultados obtidos das curvas de polarização, que mostraram maior área com formação da corrosão por pite e com mais heterogeneidades.

Em relação aos resultados e análises realizadas em água do mar, foram contatados início da corrosão intergranular nas duas amostras sendo mais pronunciada na amostra tratada termicamente. Os resultados de microdureza e análise das massas, confirmaram a presença da camada passiva principalmente na amostra pré-aquecida, devido ao aumento de dureza e também no ganho de massa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMINIO. **Guia Técnico do Alumínio Tratamento Térmico.** 1º edição. São Paulo. 2003

CALLISTER, W. Corrosão e Degradação dos Materiais. In._____. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais:** uma abordagem integrada. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CORTNEY B. et al. **Stress Corrosion Cracking of Al-Mg Alloy 5083 Sensitized at Low Temperature.** Revista Corrosion .2015



GOSWAMI, R. et al. **Precipitation behavior of the β phase in Al-5083.** Materials Science and Engineering A. v. 527 p. 1089–1095. 2010

MAGAROLA, S. C.; BELTRAN, J. **Manual Del Alumínio.** 11ª Edição – Barcelona: Editorial Revertê, S.A, 1959.

MARTINS, N. E. C. **Soldadura das Ligas de Alumínio de Construção Naval.** 139 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia dos Materiais) - Universidade Nova, Universidade de Lisboa, Lisboa. 2008

NUNEZ, L.P. **Fundamentos de Resistência a Corrosão.** Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2007. 330p.

OGUOCHA, I, N, A; ADIGUN, O. J; YANNACOPOULOS, S. **Effect of sensitization heat treatment on properties of Al-Mg alloy AA5083-H116.** J Mater Sci. v. 43 p. 4208 – 4214. 2008

PEREIRA, J. M. M. V. **Estudo das ligas de alumínio aplicadas em construção naval nomeadamente na resistência à corrosão em estruturas navais soldadas.** 108 f Dissertação. (Mestrado em Engenharia dos Materiais) - Universidade Nova, Universidade de Lisboa, Lisboa. 2010

RAMANATHAN, I.V. **Corrosão e seu Controle.** Editora Hemus. S/D

SARTORI, A.; SILVA, B. **Influência do Tempo de Exposição e Temperaturas Elevadas na Microestrutura da Liga AA5083.** In: III Congresso Internacional do Alumínio, São Paulo, 2007.

SARTORI, A.; VEIGA, J. **Determinação da susceptibilidade à corrosão intergranular, para ligas Al-Mg (5XXX) com mais de 3 % de Mg, através da perda de massa por unidade de área,** Pindamonhangaba, 2005.

SAVONOV, G. S. **Implantação iônica por imersão em plasma em materiais metálicos leves.** 2011.148 f. Tese de Doutorado- Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão.** São Paulo: Edusp, 176 p.

ZANGRANDI, A. **ALUMÍNIO E SUAS LIGAS: FUNDAMENTOS METALÚRGICOS E TECNOLÓGICOS.** Lorena: Instituto Santa Teresa, 2008.