

EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE INIBIDOR DE CORROSÃO EM FILMES SILANO OBTIDOS SOBRE A LIGA AA2024-T3¹

*Fernanda Pilla Coutinho²
Tiago Lemos Menezes³
Célia de Fraga Malfatti⁴
Julien Esteban⁵
Florence Ansart⁶
Jean Pierre Bonino⁶*

Resumo

O objetivo deste trabalho é analisar a resistência à corrosão da liga de alumínio AA2024-T3 revestida com sol-gel para diferentes concentrações de cério (zero, 0,01 e 0,05 M). Foram realizadas análises do revestimento por microscopia eletrônica de varredura (SEM), espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e espectroscopia de espalhamento Rutherford (RBS). A resistência à corrosão dos revestimentos foi avaliada a partir de curvas de polarização, curvas de potencial de circuito aberto (OCP), medidas de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) e ensaio acelerado em névoa salina. A hidrofobicidade dos revestimentos foi avaliada pelo teste de molhabilidade. Os resultados obtidos mostraram que existe uma concentração crítica de cério necessária para garantir a otimização da resistência à corrosão, acima desta concentração o inibidor prejudica o efeito barreira promovido pelo filme de silano.

Palavras-chave: Liga AA2024-T3; Sol-gel; Cério.

EFFECT OF CORROSION INHIBITOR CONCENTRATION OF SILANE FILMS ON AA2024-T3 ALLOY

Abstract

The present work aims at studying the corrosion resistance of aluminum alloy AA2024-T3 substrates pre-treated with sol-gel doped with cerium (zero, 0,01 and 0,05 M). The samples surface were analyzed by atomic scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS) and Rutherford backscattering spectroscopy (RBS). The coated corrosion resistance was evaluated by polarization curves, open circuit potential (OCP), electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and salt spray test (ASTM B-117-03). The coated hydrophobicity was evaluated by wettability test. The results show that there is a critical concentration of cerium necessary to guarantee the best corrosion resistance. For concentrations higher than this, the barrier effect of silane film decrease.

Key words: AA2024-T3 alloy; Sol-gel; Cerium.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Graduanda em Engenharia Metalúrgica, DEMET, UFRGS, Porto Alegre, RS*

³ *Doutorando, LACORR, DEMAT, UFRGS, Porto Alegre, RS*

⁴ *Dra. Professora, DEMET, UFRGS, Porto Alegre, RS*

⁵ *Doutorando, CIRIMAT, UPS, Toulouse, França*

⁶ *Dr. Pesquisador, CIRIMAT, UPS, Toulouse, França*

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é um metal leve, macio e resistente, por isto este e suas ligas são muito utilizados em diversos ramos industriais, principalmente no setor aeronáutico e automotivo.⁽¹⁻⁴⁾ Apesar do alumínio e suas ligas serem resistentes à corrosão, os mesmos tendem a sofrer corrosão localizada quando expostos a um meio agressivo.⁽¹⁻³⁾

Inúmeros processos têm sido propostos para melhorar a resistência à corrosão de ligas de alumínio. Os processos baseiam-se, normalmente em três etapas: pré-tratamento, primer e camada final (top-coating). O pré-tratamento tem a função de proteger o metal contra a corrosão e aumentar a aderência entre a superfície metálica e o primer.^(1,4,5) Há muitos anos o processo de cromatização vem sendo utilizado com sucesso como pré-tratamento para ligas de alumínio, porém, este revestimento está sendo proibido em diversos países devido ao fato de que os cromatos são altamente tóxicos e carcinogênicos.^(1,4) Como alternativa ao processo de cromatização filmes silanos têm sido propostos como pré-tratamento para ligas de alumínio.^(1,6,7)

Os filmes silanos agem como uma barreira física que dificulta a penetração de espécies agressivas em direção ao substrato metálico.^(1,7,8) Estes filmes apresentam a fórmula geral $X_3Si(CH_2)_nY$ e são divididos em mono-silanos e bis-silanos. Os mono-silanos possuem um grupo hidrolisável (SiX_3), enquanto os bis-silanos possuem dois.^(8,9)

A adição de inibidores de corrosão aos filmes silanos tem sido proposta com o objetivo de melhorar o desempenho anticorrosivo desses filmes. Dentre os sais de terras raras, os compostos de cério são os mais utilizados como inibidores. O cério, quando inserido na matriz de silano, melhora a resistência à corrosão e confere propriedades de cicatrização dos defeitos formados pelo ataque de espécies agressivas.^(2,4,5,7,8)

O processo sol-gel é baseado na hidrólise e condensação de precursores moleculares. O precursor molecular é convertido em partículas nanométricas para formar uma suspensão coloidal, chamada sol. Estes sóis se unem formando uma rede tridimensional (gel). O gel pode ser supercriticamente extraído produzindo aerogel, ou então evaporado gerando o xerogel.⁽¹⁰⁾

No presente trabalho a liga de alumínio AA2024-T3 foi revestida com um filme de silano a partir do processo de sol-gel por dip-coating com uma velocidade de retirada controlada de $20 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$. A constituição do sol utilizado não será detalhada pois o processo está sendo patenteado. A variação da concentração no filme de silano foi obtida pela adição de diferentes concentrações de nitrato de cério (zero M, 0,01 M e 0,05 M) no sol.

Foram realizadas análises dos filmes obtidos por de microscopia eletrônica de varredura (SEM – *scanning electron microscopy*), espectroscopia de energia dispersiva (EDS – *energy dispersive spectroscopy*) e espectroscopia de espalhamento Rutherford (RBS - *Rutherford backscattering spectroscopy*). A hidrofobicidade do revestimento foi analisada através do teste de molhabilidade. Além disso, A resistência à corrosão dos revestimentos foi avaliada a partir de medidas de potencial de circuito aberto (OCP – *open circuit potencial*), curvas de polarização e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS - *electrochemical impedance spectroscopy*). As amostras foram também submetidas ao ensaio acelerado de névoa salina, conforme a norma ASTM B-117-03.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Elaboração dos revestimentos

Os revestimentos foram obtidos por dip-coating a uma velocidade de retirada de $20 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ a partir de um sol constituído por 3-glicidoxipropiltrimetoxisilano (GPTMS) e outros precursores silanos, com adição de nitrato de cério em diferentes concentrações (0, 0,01 e 0,05M). Os substratos utilizados foram painéis de alumínio com dimensão $8 \times 4,2 \times 0,6 \text{ cm}$.

A Tabela 1 apresenta a descrição das amostras utilizadas neste trabalho.

Tabela 1: Descrição das amostras utilizadas neste trabalho

Amostra	Descrição
AA2024-T3	Liga de alumínio AA2024-T3 sem tratamento
AA2024-T3 SC	Liga de alumínio AA2024-T3 revestida com silano sem adição de cério
AA2024-T3 [0,01]Ce	Liga de alumínio AA2024-T3 revestida com silano com adição de cério na concentração de 0,01M
AA2024-T3 [0,05]Ce	Liga de alumínio AA2024-T3 revestida com silano com adição de cério na concentração de 0,05M

2.2 Caracterização dos Revestimentos

2.2.1 Caracterização morfológica

A análise morfológica da superfície foi realizada por SEM/EDS. O equipamento utilizado foi um JEOL-JSM 5800 Scanning Microscopy, com tensão de aceleração 20 keV. As imagens foram obtidas por elétrons retroespalhados e elétrons secundários. Para a determinação da espessura de camada do filme de silano, utilizou-se o programa ImageJ.

As medidas de espectroscopia de espalhamento Rutherford (RBS) foram realizadas incidindo-se um feixe íons $^4\text{He}^+$ sobre as amostras. A energia utilizada para o experimento foi de 2,4 MeV, sendo o ângulo de espalhamento de 165° , o ângulo entre a normal da amostra e o feixe incidente $\theta_1 = 0$ e o ângulo entre a normal da amostra e a partícula espalhada $\theta_2 = 15^\circ$. O equipamento utilizado para esta análise foi um Acelerador de íon TANDETRON de 3 MV.

2.2.2 Molhabilidade

O teste foi realizado pelo método da gota séssil através de um aparato desenvolvido pelo Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O ângulo de contato é determinado através de um programa de análise de imagens também desenvolvido por este Instituto.

2.2.3 Caracterização eletroquímica

Para a realização dos ensaios eletroquímicos foi utilizado um potenciostato (AUTOLAB PGSTAT 30) associado a um analisador resposta em frequência (FRA). Para isso uma célula eletroquímica de três eletrodos foi empregada, sendo o eletrodo de trabalho constituído pelas amostras com área aparente $0,626 \text{ cm}^2$. Utilizou-se eletrodo de referência de calomelano saturado (ECS) e uma rede de platina como contra eletrodo. Todos os ensaios eletroquímicos foram realizados em solução aerada de NaCl 0,5 M ($\text{pH} = 6,0$).

As curvas de polarização foram obtidas em um intervalo de varredura de -200 mV abaixo do potencial de circuito aberto até 400 mV acima desse potencial, com velocidade de varredura de 1 mV.s^{-1} . Os dados obtidos das medidas de polarização potencioestática foram tratados com o software GPES da AUTOLAB para a determinação da corrente de corrosão, do potencial de corrosão, e da resistência de polarização.

As medidas de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) foram realizadas no potencial de circuito aberto, na faixa de frequência de 10^{-3} a 10^5 Hz, utilizando-se para isso um equipamento AUTOLAB modelo PGSTAT 302. O sinal senoidal utilizado foi de 10 mV. Os sistemas foram monitorados durante 144 horas de imersão.

Para o ensaio de OCP as amostras foram monitoradas durante a primeira hora de imersão no eletrólito.

2.2.4 Ensaio de Névoa Salina

Foram realizados ensaios de exposição em câmara de névoa salina conforme a norma ASTM B-117-03.⁽¹⁾ Para este ensaio, foram utilizados três corpos de prova (CP) de cada amostra. Os CP's foram retirados da câmara a cada 24 horas para acompanhar a evolução do estado superficial dos revestimentos durante 336 horas de exposição.

3 RESULTADOS

3.1 Caracterização Morfológica

Para os revestimentos elaborados por dip-coating, a espessura do revestimento é função da velocidade de retirada. A partir da análise em corte transversal dos revestimentos foi determinada a espessura da camada dos filmes obtidos. Os revestimentos apresentaram espessura de camada de $10,93 \pm 0,12 \mu\text{m}$ (Figura 1). Não foi observada variação importante da espessura de camada para o filme de silano elaborado com 0,05M de Ce ou ainda sem a adição de Ce.

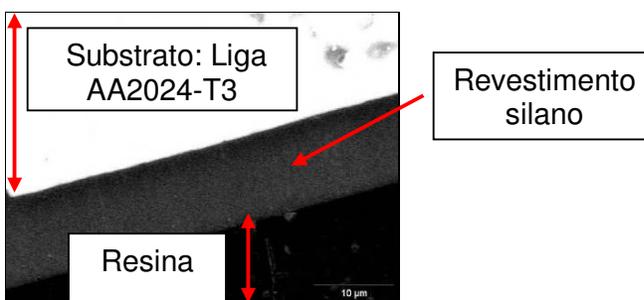


Figura 1: Micrografia obtida por SEM (elétrons retroespalhados) para o revestimento de silano com $[\text{Ce}] = 0,01\text{M}$.

A Figura 2 mostra o resultado obtido por espectroscopia de espalhamento Rutherford (RBS) evidenciando a relação entre a concentração de Ce no sol e a fração atômica do mesmo no filme elaborado.

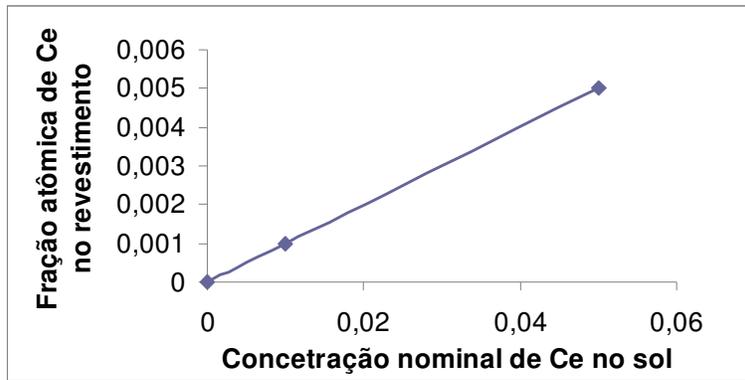


Figura 2: Concentração nominal de cério no sol versus a fração atômica de Ce no revestimento (resultado obtido por RBS).

3.2 Molhabilidade

A Figura 3 mostra as imagens obtidas pelo método da gota séssil para a determinação do ângulo de contato e, portanto, da molhabilidade da superfície.

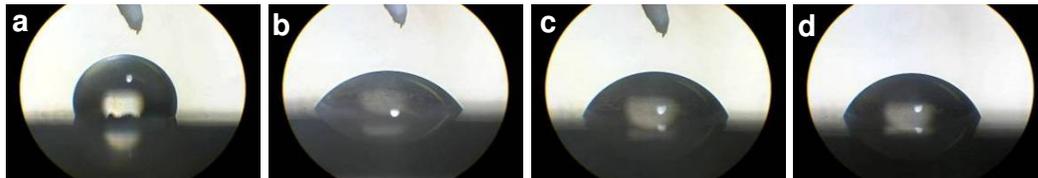


Figura 3: Imagens obtidas pelo método da gota séssil para a determinação do ângulo de contato. a) AA2024-T3, b) AA2024-T3 SC, c) AA2024-T3 [0,01]Ce e d) AA2024-T3 [0,05]Ce.

A partir da Tabela 2 é possível observar a média e desvio padrão das medidas de ângulo de contato obtidas no ensaio.

Tabela 2: Ângulo de contato médio e desvio padrão obtidos pelo do método da gota séssil

Amostra	Ângulo de contato médio	Desvio Padrão
AA2024-T3	106,13°	0,98
AA2024-T3 SC	58,25°	3,25
AA2024-T3 [0,01]Ce	64,08°	2,01
AA2024-T3 [0,05]Ce	65,77°	2,64

3.3 Caracterização eletroquímica

A Figura 4 e a Figura 5 mostram os gráficos obtidos para as medidas de OCP e polarização, respectivamente.

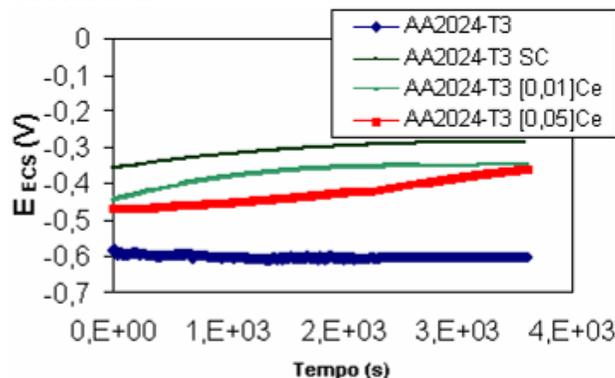


Figura 4: Potencial de circuito aberto monitorado durante 1 hora de imersão em NaCl 0,5M.

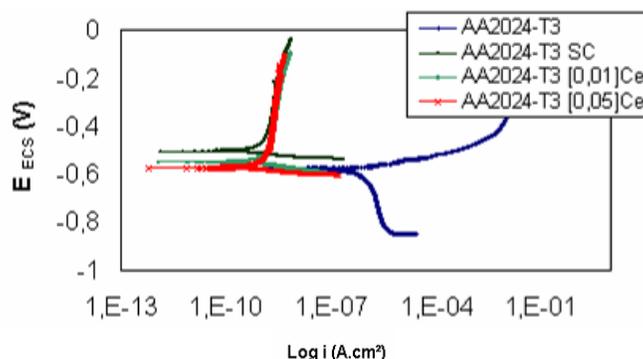


Figura 5: Curvas de polarização em NaCl 0,5M, velocidade de varredura de 1 mV/s.

A corrente de corrosão, o potencial de corrosão e a resistência de polarização foram obtidos por simulação das retas de Tafel, conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Dados obtidos a partir da simulação das retas de Tafel para as curvas mostradas na Figura 5

	AA2024-T3	AA2024-T3 SC	AA2024-T3 [0,01]Ce	AA2024-T3 [0,05]Ce
I_{cor} (A/cm²)	7,892E-7	8,81E-10	8,463E-10	1,074E-9
E_{cor} (V)	-0,586	-0,513	-0,564	-0,579
R_p (Ohm)	3,425E+3	1,869E+6	2,571E+6	1,747E+6

As medidas de impedância das amostras foram realizadas após 1 hora de imersão durante 144 horas de imersão. As Figura 6, 7 e 8 mostram os diagramas de Nyquist, para os tempos de 1 hora, 72 horas e 144 horas, respectivamente.

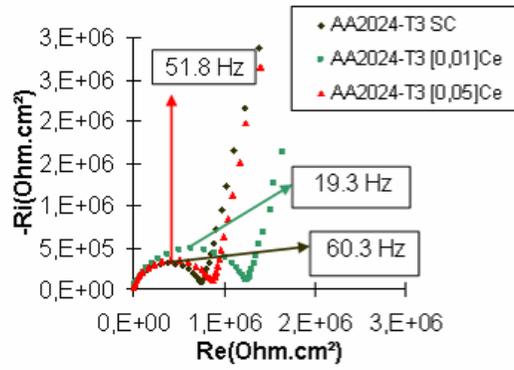


Figura 6: Diagrama de Nyquist para os sistemas com 1 hora de imersão em NaCl 0,5M.

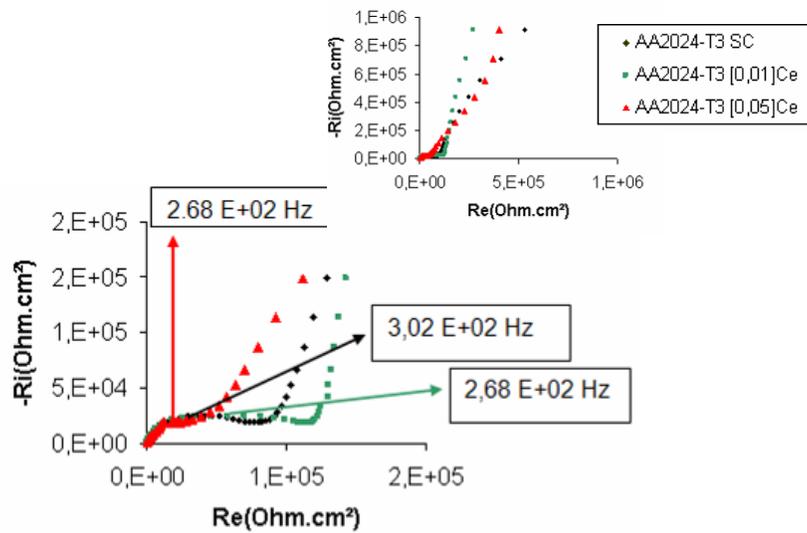


Figura 7: Diagrama de Nyquist para os sistemas com 72 horas de imersão em NaCl 0,5M.

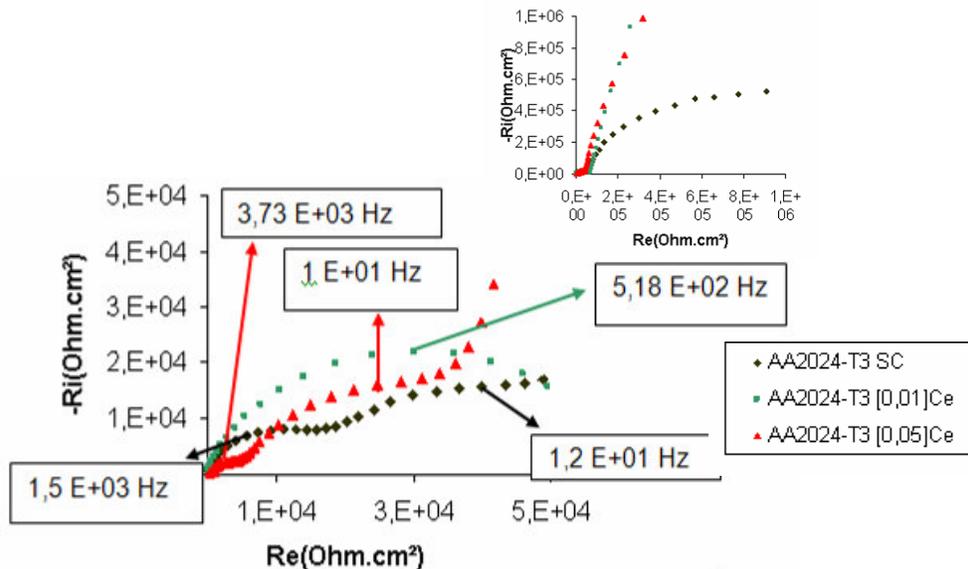


Figura 8: Diagrama de Nyquist para os sistemas com 144 horas de imersão em NaCl 0,5M.

3.4 Ensaio de Névoa Salina

A Figura 9 mostra as imagens das amostras que foram submetidas ao ensaio de névoa salina, para os tempos de 72 horas e 168 horas de exposição. Após 72 horas de ensaio, foram observados os primeiros pontos de corrosão nas amostras.

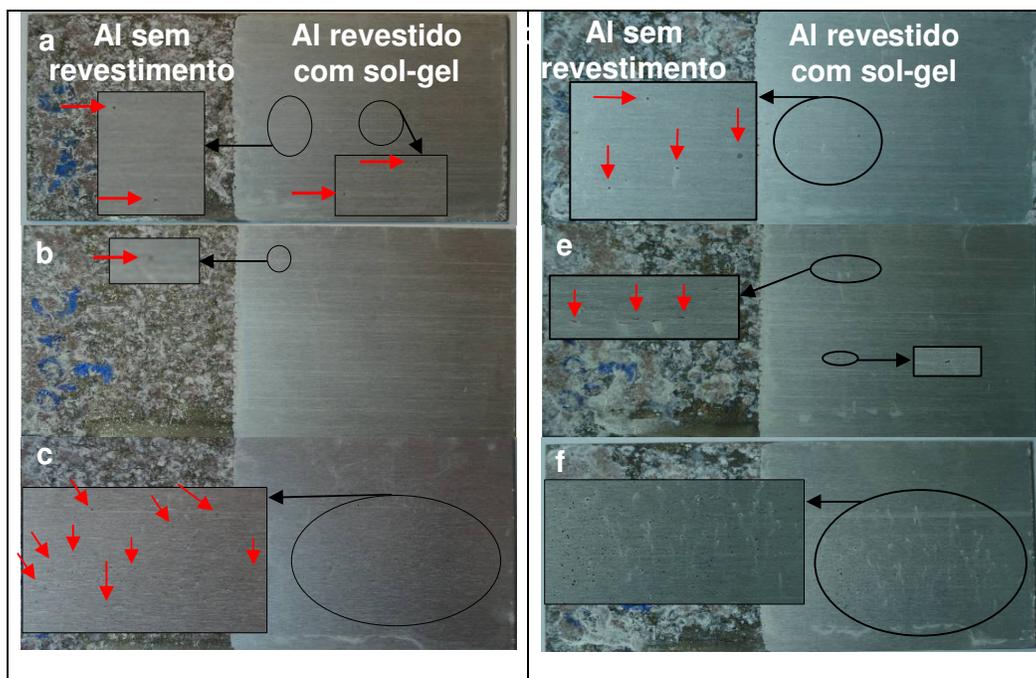


Figura 9: Amostras submetidas ao ensaio de névoa salina. a) AA2024-T3 SC após 72 horas, b) AA2024-T3 [0,01]Ce após 72 horas, c) AA2024-T3 [0,05]Ce após 72 horas, d) AA2024-T3 SC após 168 horas, e) AA2024-T3 [0,01]Ce após 168 horas, f) AA2024-T3 [0,05]Ce após 168 horas.

A Figura 10 mostra a degradação do revestimento ao final do tempo de exposição em névoa salina (após 336 horas).

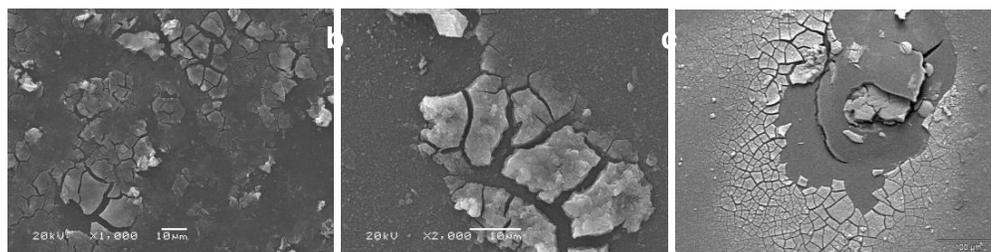


Figura 10: Micrografias obtidas por SEM (elétrons secundários) para as amostras após 336 horas de exposição em câmara de névoa salina. a) AA2024-T3 SC, b) AA2024-T3 [0,01]Ce e c) AA2024-T3 [0,05]Ce.

4 DISCUSSÃO

4.1 Caracterização Morfológica

Analisando a Figura 1 é possível observar que o revestimento sol-gel com espessura de camada de $10,93 (\pm 0,12) \mu\text{m}$ forma uma barreira uniforme sobre a

liga de alumínio. Os resultados obtidos pelo ensaio de RBS (Figura 2), mostraram que a concentração de cério no filme aumenta linearmente com a concentração de cério no sol.

4.2 Molhabilidade

O resultado do teste de molhabilidade (Figura 3 e Tabela 2) mostrou que a liga de alumínio nua apresentou maior ângulo de contato ($106,13^\circ \pm 0,98$) comparativamente às amostras revestidas com silano, indicando que o revestimento sol-gel tende a promover a diminuição da hidrofobicidade. Contudo, as amostras revestidas com silanos apresentaram uma tendência à diminuição da hidrofobicidade com a diminuição da concentração em Ce (Figura 3 e Tabela 2). Se por um lado, o aumento da hidrofobicidade da superfície é desejável para diminuir a molhabilidade da mesma e conseqüentemente promover possíveis melhoras na resistência à corrosão quando o filme de silano é empregado como tratamento final. Por outro lado, quando o mesmo é aplicado como pré-tratamento deseja-se que a superfície tenha menor hidrofobicidade para favorecer a adesão do primer, por exemplo.

4.3 Caracterização Eletroquímica

A partir do ensaio de OCP (Figura 4) é possível observar que as amostras revestidas com silanos apresentaram valores de potenciais deslocados no sentido de potenciais menos ativos em relação à liga de alumínio nua. Entretanto, o aumento da concentração de cério no revestimento promoveu o deslocamento o potencial no sentido de potenciais mais ativos, ou seja, na direção do potencial da liga alumínio. Esse comportamento indica a possível presença de defeitos no filme barreira de silano, efeito que é favorecido pelo aumento da concentração de Ce no filme.

Nos primeiros minutos de imersão a amostra AA2024-T3 [0,05]Ce apresentou potencial mais ativo comparativamente às outras amostras revestidas com sol-gel. Contudo, ao final de 3600 segundos o potencial desenvolvido pela amostra atingiu valores correspondentes aqueles observados para a amostra AA2024-T3 [0,01]Ce. Esse fenômeno sugere que o cério agiu como inibidor de corrosão promovendo a “cicatrização” de possíveis defeitos no filme de silano.^(4,7)

Verificou-se uma diferença de aproximadamente 200mV entre o potencial de OCP (Figura 4) e o potencial de corrosão (Figura 5 e Tabela 3), o que indica que pela metodologia empregada no ensaio de polarização (varredura de -200 mV abaixo do potencial de circuito aberto até 400 mV acima desse potencial), os fenômenos relacionados à varredura catódica exerceram influência sobre o potencial de corrosão.

Os valores dos potenciais de corrosão (Tabela 3 e Figura 5) para as amostras revestidas com sol-gel ficaram próximos aos valores observados para a liga de alumínio. Esse fato pode estar associado ao que foi explicado anteriormente, ou seja, à metodologia empregada no ensaio de polarização. Ainda assim, foi possível observar que o aumento da concentração de cério no revestimento silano deslocou o potencial de corrosão para valores mais negativos ($E_{cor} \text{ AA2024-T3 SC} > E_{cor} \text{ AA2024-T3 [0,01]Ce} > E_{cor} \text{ AA2024-T3 [0,05]Ce}$), o que também foi observado para o OCP (Figura 4).

As amostras revestidas com sol-gel apresentaram diminuição do I_{corr} e aumento da R_p comparativamente à liga nua (Tabela 3 e Figura 5). Observou-se

também, que a presença de Ce modificou o I_{corr} e a R_p , no entanto é evidente a influência da concentração de Ce no filme de silano sobre a resistência à corrosão. Na concentração de 0,001 (Figura 2), em fração atômica, o cério promove o aumento da resistência de polarização e diminuição do I_{corr} comparativamente ao filme de silano sem Ce, contudo quanto a concentração em Ce no filme atinge a fração atômica de 0,005 (Figura 2), a resistência à corrosão é prejudicada, o que pode ser observado pelo aumento do I_{corr} e a diminuição da R_p . Esse resultado está de acordo com os resultados obtidos pelo monitoramento de OCP. Ou seja, a aproximação do potencial de circuito aberto da amostra AA2024-T3 [0,05]Ce em relação à liga de alumínio parece estar associada a presença de defeitos na barreira constituída pelo filme silano quando a concentração de Ce no filme atinge a fração atômica de 0,005 (Figura 2).

Os diagramas de Nyquist, obtidos (Figura 6) mostraram que para o tempo de imersão de 1 hora todos os filmes de silanos apresentaram apenas um arco capacitivo na região de média frequência associado a uma componente de difusão em baixa frequência. Admitindo-se que o valor de resistência obtido pela extrapolação do arco capacitivo com o eixo real pode-se observar que a amostra AA2024-T3 [0,01]Ce apresentou o maior valor de resistência, (aproximadamente $1,24 \times 10^6 \text{ Ohm.cm}^2$) seguida pela amostras AA2024-T3 [0,05]Ce ($8,7 \times 10^5 \text{ Ohm.cm}^2$) e AA2024-T3 SC ($7,4 \times 10^5 \text{ Ohm.cm}^2$). Com 72 horas de imersão (Figura 7), pode-se perceber uma diminuição do diâmetro do arco capacitivo para todos os revestimentos. No entanto, a amostra AA2024-T3 [0,01]Ce continua apresentando o maior valor de resistência ($1,2 \times 10^5 \text{ Ohm.cm}^2$), seguida agora pela amostra AA2024-T3 SC ($8,1 \times 10^4 \text{ Ohm.cm}^2$) e pela amostra AA2024-T3 [0,05]Ce ($2,4 \times 10^4 \text{ Ohm.cm}^2$). Nota-se uma grande diminuição da resistência da amostra AA2024-T3 [0,05]Ce, o que pode estar associado à elevada concentração em cério no filme que pode vir a desestabilizar a matriz de silano, diminuindo a resistência à corrosão do revestimento.

Após 144 horas de imersão (Figura 8), percebe-se o surgimento de um outro arco capacitivo em alta frequência ($1 \times 10^3 \text{ Hz}$) para as amostras AA2024-T3 SC e AA2024-T3 [0,05]Ce. Este arco capacitivo em alta frequência pode ser associado à resistência do poro (possivelmente o filme é poroso), ou ainda a defeitos que surgiram no revestimento durante o tempo de imersão. No entanto, a amostra AA2024-T3 [0,01]Ce não apresentou o surgimento desse fenômeno indicando que a melhor performance quanto a resistência à corrosão foi obtida para esse sistema. Além disso, a amostra AA2024-T3 [0,01]Ce continuou apresentando o maior valor de resistência ($5,0 \times 10^4 \text{ Ohm.cm}^2$), enquanto a amostra AA2024-T3 [0,05]Ce apresentou o menor valor ($5,0 \times 10^3 \text{ Ohm.cm}^2$).

4.4 Ensaio de Névoa Salina

Um dos objetivos deste ensaio é testar de forma comparativa a resistência à corrosão de tratamentos de superfícies.⁽¹²⁾ Os resultados obtidos estão de acordo com a literatura: à medida que o ensaio avança, ocorre uma perda gradativa da resistência à corrosão fornecida pela camada de sol-gel à liga de alumínio.⁽¹²⁾

Para as amostras estudadas (Figura 9), verificou-se o surgimento dos primeiros pontos de corrosão (pites) após 72 horas de exposição. A amostra AA2024-T3 [0,05]Ce apresentou maior densidade de pites comparativamente às demais amostras. Após 168 horas é possível notar que próximo aos pites (para as amostras AA2024-T3 SC e AA2024-T3 [0,05]Ce) ocorre o escorrimento de um produto

esbranquiçado, indicando a formação de um possível óxido ou hidróxido de alumínio, o que indica que a corrosão do substrato de alumínio não foi inibida quando o mesmo ficou exposto. Esse poderia ser um comportamento esperado para a amostra sem Ce (AA2024-T3 SC), contudo a amostra com maior concentração em Ce (AA2024-T3 [0,05]Ce) também apresentou o mesmo fenômeno indicando que em elevadas concentrações o efeito de inibidor de corrosão do Ce é prejudicado. Observa-se também que a amostra AA2024-T3 [0,05]Ce teve o revestimento mais danificado em comparação com as outras amostras (Figura 9 e Figura 10). A amostra AA2024-T3 [0,01]Ce foi aquela que ao final do ensaio apresentou menos pontos de corrosão (Figura 9).

5 CONCLUSÃO

Foi possível observar que para a concentração de cério de 0,01 M a resistência à corrosão do filme de silano é maior do que os filmes com 0,05 M e sem cério. Grande concentração de cério (0,05 M) prejudica o efeito barreira promovido pelo filme de silano e parece anular o poder de atuação como inibidor.

Os filmes de silanos obtidos diminuíram a hidrofobicidade da superfície, no entanto, a concentração em Ce no filme também parece exercer influências sobre essa propriedade, e quanto maior a concentração em Ce mais hidrofóbico o filme.

Agradecimentos

Ao CIRIMAT, CNPq, Finep, CAPES e CNRS.

REFERÊNCIAS

- 1 YASAKAU, K.A.; ZHELUDKEVICH, M.L.; KARAVAI, O.V.; FERREIRA M.G.S. Influence of inhibitor addition on the corrosion protection performance of sol-gel coatings on AA2024. *Progress in Organic Coatings*, v. 63, p. 352-361, 2007.
- 2 TAMBORIM, S.M.; MAISONNAVE, A.P.Z.; AZAMBUJA, D.S.; ENGLERT, G.E. An electrochemical and superficial assessment of the corrosion behavior of AA 2024-T3 treated with metacryloxypropylmethoxysilane and cerium nitrate. *Surface and Coating Technology*, v.202, p. 5591-6001, 2008.
- 3 PATHAK, S.S.; KHANNA, A.S.; SINHA, T.J.M. HMMM cured corrosion resistance waterborne ormosil coating for aluminum alloy. *Progress in Organic Coatings*, v. 60, p. 211-218, 2007.
- 4 PALANIVEL, V.; HUANG, Y., OOIJ, W.J.V. Effects of addition of corrosion inhibitor to silane films on the performance of AA2024-T3 in a 0,5 M NaCl solution. *Progress in Organic Coatings*, v. 53, p. 153-168, 2005.
- 5 CABRAL, A.M.; TRABELSI, W.; SERRA, R.; MONTEMOR, M.F.; ZHELUDKEVICH, M.L.; FERREIRA, M.G.S. The corrosion resistance of hot dip galvanised steel and AA2024-T3 pre-treated with bis-[triethoxysilylpropyl] tetrasulfide solutions doped with Ce(NO₃)₃. *Corrosion Science*, v. 48, p. 3740-3758, 2006.
- 6 ZHU, D.; OOIJ, W.J.V. Enhanced corrosion resistance of AA2024-T3 and hot-dip galvanized steel using a mixture of bis-[triethoxysilylpropyl]tetrasulfide and bis-[trimethoxysilylpropyl]amine. *Electrochemical Acta*, v. 49, p. 1113-1125, 2004.
- 7 TRABELSI, W.; TRIKI, E.; DHOUIBI, L.; FERREIRA, M.G.S.; ZHELUDKEVICH, M.L.; MONTEMOR, M.F. The use of pre-treatments based on doped silane solutions for improved corrosion resistance of galvanized steel substrates. *Surface and Coatings Technology*, v. 200, p. 4240-4250, 2006.

- 8 PATRICIA, S.C. Comportamento corrosivo da liga de magnésio AZ91 revestida com filmes de metiltrietóxi silano e íons cério. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 85 f.:il, Julho 2008.
- 9 ISABELLA, P.A. Caracterização da superfície do aço-carbono ABNT 1008 revestida com organo-silanos por meio de técnicas eletroquímicas e físico-químicas. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 114f.:il, 2006.
- 10 BRINKER, C.J.; SCHERER, G.W. Sol-gel science: the physics and chemistry of sol-gel processing. 1990.
- 11 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM B-117-03: Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. 2003.
- 12 PACHECO, L.G. Análise da viabilidade de implantação da técnica de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica para o Controle de Processos de Tratamento de Superfície no Setor Aeroespacial. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, 156f.: il, 2007.