INTERCORR2008_089

Copyright 2008, ABRACO
Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2008, em Recife/PE, no mês de maio de 2008.
As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Efeito da concentração de cloretos na corrosão das ligas de alumínio 2024-T3 e 7050-T7451

Jean V. Ferrari[1], Flávio de S. Costa [2], Hercílio G. de Melo[3]

Abstract

One of the main problems associated to the industrial use of Al and its alloys is their susceptibility to localized corrosion. Due to microstructural complexity, this issue is particularly relevant for the high-strength Al alloys group. In the literature, the corrosion studies of Al alloys in chloride solutions have been frequently performed in concentrated solutions. In the present work, the electrochemical behaviour of high strength Al alloys, 2024-T3 and 7050-T7451, in solutions containing chloride in the concentration range from 10 to 500 mM was investigated and compared. The experimental techniques employed were: open circuit potential (OCP), anodic polarisation curves and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). For both alloys, OCP results showed a logarithmic dependence on chloride concentration, with the 2024-T3 alloy presenting always nobler values. On the other hand, anodic polarisation curves presented no defined passive region and showed depolarisation with increasing chloride concentration. EIS experiments showed different responses for the two alloys. While a pure capacitive response was observed for the 2024-T3 alloy, a low frequency inductive loop was defined for the 7050-T7451 samples. Some hypotheses are presented which may explain these different impedance behaviours.

Keywords: aluminium, corrosion, chloride, EIS, OCP

Resumo

Um dos principais problemas associados ao uso industrial do Al é sua suscetibilidade à corrosão localizada. Nas ligas de elevada resistência mecânica a microestrutura complexa agrava este problema. Na maioria dos casos, os estudos de corrosão de ligas de Al em meios contendo cloretos são realizados em soluções concentradas. Neste trabalho o comportamento eletroquímico das ligas de alumínio de elevada resistência mecânica, 2024-T3 e 7050-T7451, em soluções contendo cloretos na faixa de concentração entre 10 e 500 mM foi investigado e comparado. Foi registrada a variação do potencial de circuito aberto (PCA), obtidas curvas de polarização anódica e realizados ensaios de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS). Os resultados do PCA mostraram uma dependência logarítmica entre o valor desta grandeza e a

[1] Mestre em Engenharia de Materiais, doutorando em Eng. Química – Escola Politécnica da USP, Depto. de Engenharia Química.
[2] Estudante de Engenharia Química, aluno de iniciação científica – Escola Politécnica da USP, Depto. de Engenharia Química.
[3] Professor Doutor em Engenharia Química – Escola Politécnica da USP, Depto. de Eng. Química.

concentração de cloretos, sendo o PCA da liga 2024-T3 sempre mais nobre. Por sua vez, as curvas de polarização anódica não apresentaram região passiva definida e apresentaram despolarização com o aumento da concentração de cloretos. Os ensaios de EIS mostraram que a resposta das duas ligas é diferente, enquanto a liga 2024-T3 apresenta um comportamento puramente capacitivo, a liga 7050-T7451 se caracteriza por uma resposta indutiva na região de baixas freqüências. Hipóteses são apresentadas para explicar estas diferenças.

Palavras-chave: alumínio, corrosão, cloreto, EIS, PCA

1. Introdução

As ligas de alumínio das séries 2000 e 7000, por possuírem uma alta relação resistência mecânica/peso e baixa densidade, são extensivamente utilizadas na indústria aeronáutica. Estas ligas, por possuírem elementos de liga e serem submetidas a tratamentos térmicos, possuem em sua microestrutura intermetálicos com atividade eletroquímica diferente da matriz, originando microcélulas galvânicas, que originam problemas de corrosão localizada, principalmente em meios com cloretos. Este aspecto pode ser agravado quando os intermetálicos são ricos em elementos mais afastados do alumínio na tabela de potencial eletroquímico, como o cobre, por exemplo[1]. Sendo assim, estes materiais dificilmente são utilizados industrialmente sem um sistema de proteção contra a corrosão.

Para as ligas de alumínio em geral, os quatro principais elementos de liga adicionados são: cobre, magnésio, zinco, manganês e silício. Sendo estes elementos também os que influenciam mais significativamente as propriedades destes materiais sob o ponto de vista de resistência à corrosão. Neste sentido, outros elementos de liga adicionados tais como cromo, titânio, zircônio, lítio e níquel possuem efeitos menos significativos[2].

A maioria dos estudos sobre a corrosão de ligas de alumínio em meios contendo cloretos é desenvolvida em soluções concentradas em cloreto. Na literatura, são encontrados vários exemplos de trabalho que adotam a concentração de 3,5% em NaCl (~600 mM) ou ainda maiores[3-7]. Entretanto, quando se deseja compreender a influência dos intermetálicos na iniciação da corrosão das ligas, a utilização de soluções muito concentradas é inadequada pois tais soluções, além de atacarem intensamente a matriz da liga, podem também atacar fortemente os intermetálicos, impedindo a detecção de seus efeitos nas respostas eletroquímicas, principalmente quando não se trabalha com microcélula eletroquímica.

No presente trabalho foi investigado o comportamento eletroquímico médio (*bulk*) das ligas de alumínio 2024-T3 e 7050-T7451 em meio de NaCl naturalmente aerado, no intervalo de concentração entre 10 mM e 500 mM. Os estudos foram realizados por meio de medidas potencial de circuito aberto (PCA), de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) e curvas de polarização anódica.

2. Materiais e métodos

Nas Tabelas 1 e 2 constam as composições nominais das duas ligas de alumínio utilizadas no trabalho.

Tanto para a caracterização microestrutural quando para os ensaios eletroquímicos, foram utilizados corpos-de-prova com área de 1 cm^2. Estes foram submetidos à seqüência de lixamento com lixa de carbeto de silício (400, 600, 1200 e P4000) seguido de polimento com pasta de diamante até 1μm, sempre com lavagem abundante com água destilada e álcool entre cada etapa. Após esta etapa os corpos-de-prova eram lavados abundantemente com água

destilada, álcool e acetona, secos em jato de ar quente, e colocados em um porta-amostras de Teflon, deixando uma área exposta à solução de 1 cm^2.

Os ensaios eletroquímicos realizados foram:
- obtenção de curvas de variação do potencial de circuito aberto (PCA) em função do tempo;
- levantamento de curvas de polarização anódica;
- obtenção de diagramas de impedância eletroquímica.

Estes ensaios eletroquímicos foram realizados em soluções naturalmente aeradas com diferentes concentrações de NaCl: 10, 20, 50, 100, 200 e 500 mM, utilizando uma célula clássica de três eletrodos. Uma grade de platina com grande área superficial foi empregada como contra-eletrodo, e como eletrodo de referência foi usado o calomelano saturado em KCl (ECS).

Todos os ensaios eletroquímicos foram controlados usando um potenciostato da marca Autolab, modelo µAutolab type III/FRA2, o qual é combinado a um analisador de resposta em freqüência. As curvas de polarização anódica foram obtidas com velocidade de varredura de 1,65 $mV.s^{-1}$ a partir do PCA. Por sua vez os diagramas de impedância foram obtidos no PCA, na faixa de freqüência entre 10 kHz e 10 mHz, com 10 pontos de freqüência por década e com amplitude de perturbação de 10 mV (rms).

As imagens por microscopia eletrônica de varredura foram obtidas utilizando um microscópio da marca Philips, modelo XL-30 acoplado a um espectrômetro de energia dispersiva de raios X (EDS).

3. Resultados e Discussão

3.1. Microestrutura dos materiais estudados

As Figuras 1 (a) e (b) apresentam, respectivamente, imagens de elétrons retroespalhados obtidas no MEV das ligas 2024-T3 e 7050-T7451 após polimento e sem ataque. A comparação entre as duas Figuras mostra que a primeira liga apresenta uma maior quantidade de intermetálicos e isto está de acordo com afirmações de Wei et al. (1998)[10] citam que a densidade de intermetálicos em uma liga da série 2000 pode ser duas vezes maior que em uma liga da série 7000.

Assim como já estabelecido na literatura[12,13], as microanálises por EDS mostraram a existência de dois tipos principais de intermetálicos na liga 2024-T3: Al-Cu-Fe-Mn-(Si) (intermetálicos maiores e com aspecto irregular) e Al-Cu-Mg (intermetálicos menores e arredondados). Por sua vez para a liga 7050-T7451, verificou-se a presença de partículas ricas nos elementos cobre e/ou ferro. Para esta liga, verificou-se uma presença maior de partículas mais ricas em cobre.

Devido à diferença entre as atividades eletroquímicas dos intermetálicos e da matriz, para ambas as ligas, espera-se que estas regiões sejam preferenciais para o ataque corrosivo. Buchheit, (1995)[14] propõe uma compilação dos dados obtidos na literatura para os diferentes potenciais eletroquímicos de partículas intermetálicas usualmente presentes nas ligas de alumínio.

A Figura 2 apresenta imagens de elétrons secundários obtidas de uma partícula intermetálica da liga 7050-T7451 após exposição por 30 minutos (2(a)) e por 90 minutos (2(b)) a uma solução de NaCl 50 mM naturalmente aerada. Para esta partícula uma microanálise EDS, após 30 minutos, indicou uma composição aproximada de 51 % de Al, 33% de Cu, 14 % de Fe e de 1,75% de Zn, a qual se manteve praticamente constante após 90 minutos de ensaio. Esta composição está muito próxima da composição nominal deste tipo de partícula (obtida por

análise de diversos intermetálicos em amostras recém-polidas), indicando que a partícula não sofre corrosão interna (desligamento). Entretanto, durante este período (entre 30 e 90 minutos) observa-se um aumento no ataque localizado na matriz adjacente à partícula, indicando que esta última funciona como catodo no processo. Para esta mesma liga, as partículas ricas em Fe apresentaram-se praticamente inertes, não tendo sofrido corrosão interna nem provocado corrosão da matriz adjacente.

No que diz respeito à liga 2024-T3 (já profundamente investigada na literatura) tanto os intermetálicos Al-Cu-Mg como os Al-Cu-Fe-Mn-(Si) passam por desligamento e conseqüente enriquecimento em seus constituintes mais nobres (Cu e Fe), e também provocam a corrosão da matriz adjacente. É importante destacar que, para as duas ligas estudadas, a atividade eletroquímica dos intermetálicos é muito heterogênea, portanto, para uma mesma amostra, intermetálicos com a mesma composição nominal apresentavam atividade eletroquímica ou não.

Para a situação exibida na Figura 2(b), várias microanálises foram realizadas na matriz ao longo da linha demarcada. Os resultados mostraram um enriquecimento em cobre na região da matriz bem próxima ao intermetálico. Na literatura, a ocorrência deste enriquecimento de Cu ao redor de partículas intermetálicas rica em Cu, devido a fenômenos de deslocamento galvânico, também tem sido reportada para a liga 2024-T3 [14].

3.2. Medidas dos potenciais de circuito aberto (PCA) para as ligas Al 2024-T3 e Al 7050-T7451

Medidas de PCA foram obtidas também nas concentrações de 1 mM, 2 mM e 5 mM de NaCl, além das concentrações de 10 mM à 500 mM descritas no item Materiais e Métodos. A Tabela 3 apresenta a variação do PCA das ligas em função da concentração de cloretos na solução, o tempo de estabilização dos potenciais foi de aproximadamente 40 min e de 25 min para as ligas 2024-T3 e 7050-T7451, respectivamente. Verifica-se que o potencial de circuito aberto (PCA) da liga 2024-T3 é mais nobre que o da liga 7050-T7451, devido, provavelmente, ao maior teor de cobre presente em sua microestrutura (Tabelas 1 e 2). Verifica-se também que, para ambas as ligas, o PCA torna-se mais negativo com o aumento da concentração de íons cloreto. Este tipo de comportamento estando relacionado, possivelmente, com a adsorção de cloretos na superfície da liga (que possuem carga negativa), com o conseqüente enfraquecimento da película passiva e aumento da quantidade de sítios disponíveis à corrosão (despolarização da reação anódica).

A última coluna da Tabela 3 apresenta a diferença entre os potenciais de circuito aberto das duas ligas para cada uma das concentrações de cloreto estudada. Observa-se que o valor é aproximadamente constante (entre 120 mV e 130 mV). Considerando as diferenças microestruturais das duas ligas (ver Figura 1), isto indica que, nas condições investigadas, a microestrutura das ligas exerce um papel secundário na determinação do PCA, o qual parece depender primordialmente das interações entre os íons cloreto com as matrizes.

As Figuras 3(a) e 3(b) apresentam, respectivamente, a variação do PCA das ligas de alumínio 2024-T3 e 7050-T7451 em função do logaritmo da concentração de íons cloreto. Para os dois materiais, foi observada uma variação linear deste parâmetro em função do logaritmo da concentração de íons cloreto, indicando que uma lei logarítmica rege a adsorção de tais espécies à superfície das duas ligas. McCafferty[15] também identificou uma variação logarítmica do potencial de pites do Al puro em função da concentração de íons cloreto.

3. Curvas de polarização anódica

As Figuras 4 e 5 apresentam, respectivamente, as curvas de polarização anódica para a liga 2024-T3 e 7050-T7451 para as diferentes concentrações de íons cloreto investigadas. Observou-se que houve uma despolarização das curvas anódicas com o aumento da concentração de cloretos, o que está de acordo com o fato de que a elevação da concentração de espécies agressivas aumenta a velocidade de dissolução da película passiva. Além do mais, para ambas as ligas, e para todas as concentrações investigadas, não foi observada a existência de uma região passiva, indicando a existência de processos ativos de corrosão, mesmo nas condições menos agressivas investigadas.

3.4. Espectroscopia de impedância eletroquímica

As Figuras 6 e 7 apresentam, respectivamente, os diagramas de Nyquist para as ligas 2024-T3 e 7050-T7451 nas diversas concentrações de cloreto investigadas. Para ambas as ligas, na região de altas e médias freqüências, verifica-se que os diagramas são constituídos por um arco capacitivo. No entanto, na região de baixas freqüências, o comportamento das ligas difere: enquanto a liga 2024-T3 apresenta um novo arco capacitivo, uma resposta indutiva é exibida pela liga 7050-T7451, indicando ou mecanismos de corrosão distintos para os dois materiais, ou então que a etapa controladora do processo corrosivo é diferente. Como ligas de Al, sabidamente, sofrem corrosão localizada em meios contendo cloretos, acredita-se que a segunda hipótese seja a responsável pela diferença nas respostas.

Para o Al e suas ligas, constantes de tempo com características indutivas, como a observada na Figura 7 para a liga 7050-T7451, têm sido associadas à relaxação de espécies intermediárias adsorvidas à superfície do eletrodo de alumínio[16,17], ao enfraquecimento da efetividade protetora da camada passiva devido à dissolução anódica da liga[18], ou até mesmo à não linearidade do sistema, quando o E_{pite} e E_{Corr} são praticamente os mesmos[19]. No atual estágio deste trabalho não tem-se condições de discutir a origem desta constante de tempo, porém a última dessas três hipóteses pode ser praticamente descartada, uma vez que a estabilidade do sistema foi verificada antes e depois das medidas de impedância através de medidas de PCA, cujos valores se apresentaram praticamente estáveis. Além do mais, nas condições empregadas, o sistema não apresenta potencial de pites definido (Figura 5) que possa provocar fenômenos estocásticos de quebra e repassivação da película passiva, que poderiam provocar oscilações no valor do PCA e da corrente, prejudicando as medidas de impedância, some-se a isto o fato de que a perturbação empregada foi de pequena amplitude (10 mV), de modo a manter o sistema em estado linear. Contra estas justificativas depõe o fato de que os pontos BF são caracterizados por uma forte dispersão, o que é indicativo da não estacionaridade do sistema. Novas medidas estão sendo feitas em condições mais estabilizadas (principalmente da rede de alimentação) para que se possa dirimir estas dúvidas.

Por sua vez, a liga 2024-T3, na região de baixas freqüências, exibe um comportamento que parece controlado por difusão (Figura 6), e com uma razoável dispersão dos pontos experimentais. Na literatura, este tipo de resposta tem sido associada à corrosão localizada [20, 21]

Analisando o efeito da concentração de cloretos sobre a resposta de impedância dos sistemas, para a liga 7050-T7451, Figura 7, observou-se que o diâmetro do arco capacitivo AF diminuiu à medida que a concentração de íons cloreto nas soluções aumentou de 10mM a 50mM. Entretanto para a concentração de 100 mM houve um novo aumento do diâmetro do arco, o que é indicativo de um aumento na resistência das reações de transferência de cargas, significando um aumento na resistência à corrosão. Este tipo de resposta foi inesperado e por isso a pesquisa continua mais profundamente para entender as razões. Por sua vez, para concentrações de cloreto superiores a 100 mM uma nova diminuição do diâmetro foi verificada.

Os diagramas de ângulo de fases de Bode para as duas ligas em estudo estão apresentados nas Figura 8 e 9 para as ligas 2024-T3 e 7050-T7451, respectivamente. Para as soluções mais concentradas em cloreto, a análise desses diagramas para as duas ligas mostra que as constantes de tempo capacitivas em altas freqüências apresentam características alongadas, indicando que a mesma pode ser originária da sobreposição de duas constantes de tempo. Aoki et al.[16], investigando o comportamento eletroquímico do alumínio puro em solução de ácido cítrico, sugeriram que esta constante de tempo é constituída pela superposição da constante de tempo associada à camada de óxido (em freqüências mais elevadas) e da constante de tempo associada ao carregamento da dupla camada elétrica (em freqüências intermediárias). É importante frisar que este tipo de resposta no diagrama de Bode (constante de tempo alongada) não está presente nas soluções menos concentradas em cloretos devido ao efeito da elevada resistência do eletrólito, que mascara a verdadeira resposta em altas freqüências neste tipo de diagrama. Portanto, nos diagramas de Bode, diferenças entre ângulos de fase, na região em altas freqüências, geradas por mudanças de concentração devem ser analisadas com bastante cuidado, principalmente quando a resistividade do eletrólito for elevada, pois isto afeta de maneira bastante forte tais diagramas.

4. Conclusões

Neste trabalho o comportamento eletroquímico das ligas de Al de elevada resistência mecânica, 2024-T3 e 7050-T7451, em soluções contendo diferentes concentrações de cloreto (entre 10 e 500 mM) foi investigado e comparado usando técnicas eletroquímicas.
Para as duas ligas estudadas, os resultados dos ensaios de PCA mostraram uma dependência logarítmica entre esta grandeza e a concentração de cloretos. Foi observado também que, para todas as concentrações investigadas, a diferença entre os PCAs das duas ligas é aproximadamente constante, indicando, que, nas condições estudadas, as diferenças microestruturais entre as ligas não ativam o processo de adsorção dos cloretos, indicando que este processo depende primordialmente das características da matriz. Em concordância com isto, o PCA da liga 2024-T3 foi sempre mais nobre que o da liga 7050-T7451, provavelmente devido ao teor mais elevado de cobre em sua microestrutura.

Para os dois materiais estudados, não foi observada a definição de uma região passiva, em toda a faixa de concentração de cloretos investigada, indicando a existência de processos ativos de corrosão, mesmo considerando os tempos de ensaio relativamente curtos adotados e concentrações de cloreto relativamente baixas (10 mM, por exemplo).
Os resultados dos ensaios de EIS mostraram respostas diferentes: enquanto a resposta da liga 2024-T3 foi puramente capacitiva, um arco indutivo BF foi observado para a liga 7050-T7451. Para esta última liga uma variação inesperada no diâmetro do arco capacitivo em altas

freqüências foi verificada quando da variação da concentração de cloretos de 50 para 100 mM, já que, apesar do aumento da quantidade de espécies agressivas, foi verificado um aumento no diâmetro do arco capacitivo, indicando um aumento na resistência de transferência de cargas.

5. Agradecimentos

Agradecimentos ao CNPq pelas bolsas de iniciação científica (IC) concedida ao aluno Flávio de S. Costa e de doutorado (GD) concedida ao aluno Jean V. Ferrari.

O prof. Dr. Hercílio G. de Melo agradece a FAPESP pelo apoio financeiro ao projeto.

Os autores agradecem também ao depto. de Engenharia de Materiais da Escola Politécnica da USP pela utilização do MEV.

6. Referências bibliográficas

[1] FONTANA, A. **Utilização de Polianilina como revestimento protetor contra corrosão das ligas de alumínio 2014 F, 2024-T3 e 7075**. 2007. 112p. Dissertação (Mestrado) Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1988

[2] SNODGRASS J. Corrosion Resistance of Aluminum Alloys, Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection, Vol 13A, **ASM Handbook**, ASM International, p 689–691 (2003).

[3] JONES K.; HOEPPNER W. Pit-to-crack transition in pre-corroded 7075-T6 aluminum alloy under cyclic loading. **Corrosion Science**, v. 47, n. 9, p. 2185-2198, Sep. 2005

[4] SILVA J. W. J.; BUSTAMANTE A. G.; CODARO E. N.; NAKAZATO R. Z.; HEIN L. R. O. Morphological analysis of pits formed on Al 2024-T3 in chloride aqueous solution **Applied Surface Science**, v. 236, n. 1-4, 15, p. 356-365, Set. 2004

[5] ABALLE A.; BETHENCOURT M.; BOTANA F. J.; CANO M. J.; MARCOS M. Localized alkaline corrosion of alloy AA 5083 in neutral 3,5% NaCl solution. **Corrosion Science**, v. 43, n. 9, p. 1657-1674, set, 2001

[6] GUILLAUMIN, V.; MANKOWSKI, G. Localized corrosion of 2024 T351 aluminum alloy in chloride media. **Corrosion Science**, v. 41, n.3, p. 421-438. 1999.

[7] TSAI, W. T.; DUH, J. B.; YEH, J. J.; LEE, J. T.; CHANG, Y. C. Effect of pH on stress corrosion cracking of 7050 -T7451 aluminum alloy in 3.5 wt.% sodium chloride solution. **Corrosion**, v. 46, n. 6,p. 444-449, 1990.

[8] CHENG Y.L.; ZHANG Z.; CAO F.H.; Li J.F; ZHANG J.Q.; WANG J.M.; CAO C.N.. A study of the corrosion of aluminum alloy 2024-T3 under thin electrolyte layers, **Corrosion Science**, v. 46, p 1649-1667, 2004.

[9] SAE International. **SAE-AMS 4050E:** Aluminum Alloy Plate 7050-T7451, Warrendale, PA, USA, 1992, p. 1.

[10] WEI R.P.; LIAO C.M.; GAO M. A Transmission Electron Microscopy Study of Constituent-Particle-Induced Corrosion in 7075-T6 and 2024-T3 Aluminum Alloys**. Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 29A, p. 53-1160, 1998.

[11] SCHMUTZ P.; FRANKEL G.S. Corrosion Study of AA2024-T3 by Scanning Kelvin Probe Force Microscopy and In Situ Atomic Force Microscopy Scratching. **Journal of the Electrochemical Society**, v. 145, n. 7, p. 2295-2306, 1998.

[12] KLOET J.V., HASSEL A.W.; STRATMANN M. . Effect of Pretreatment on the Intermetallics in Aluminum Alloy 2024-T3. **Zeitschrift für Physikalische**, v. 219, p. 1505-1518, 2005.

[13] BUCHHEIT R.G.; A Compilation of Corrosion Potentials Reported for Intermetallic Phases in Aluminum Alloys. **Journal of Electrochemical Society**, v. 142, n. 11, p. 3994-3996, 1995

[14] BUCHHEIT R. G.; GRANT R. P.;; HIAVA P. F.; MCKENZIE B.; ZENDER G. Local Dissolution Phenomena Associated with S Phase (AI2CuMg) Particles in Aluminum Alloy 2024-13**.** **Journal of Electrochemical Society**, v.144, n. 8, p. 2621-2628, 1997

[15] McCAFFERTY E.. Sequence of steps in the pitting of aluminum by chloride ions. **Corrosion Science**, v. 45, n. 7 p. 1421-1438, 2003

[16] AOKI I.V.; BERNARD M. C; de TORRESI S. I.C; DESLOUIS C.; De MELO H. G.; JOIRET S.; TRIBOLLET B. Ac-impedance and Raman spectroscopy study of the electrochemical behaviour of pure aluminium in citric acid media, **Electrochimica Acta**, v. 46, n. 12, p. 1871-1878, 2001.

[17] De WIT J. H. W.; LENDERINK H. J. W.; Electrochemical Impedance Spectroscopy as a tool to obtain mechanistic information oh the passive behavior of aluminum. **Electrochimica Acta**. v. 41. n. 7-8, p. 1111-1119, 1996

[18] CAO F.H.; ZHANG Z.; LI J.F.; CHEHG Y.L.; ZANG J.Q. CAO C.N. Exfoliation corrosion of aluminum alloy AA7075 examined by electrochemical impedance spectroscopy. **Materials and Corrosion** v. 55, n.1 p 18-22, 2004

[19] MANSFELD F.; FERNANDES J.C.S. Impedance Spectra for Aluminum 7075 During the Early Stages of Immersion in Sodium Chloride. **Corrosion Science**, v. 34, n.12, p. 2105-2108, 1993

[20] SHIH, H.; MANSFELD F. A fitting procedure for impedance spectra obtained for cases of localized corrosion. **Corrosion**, v. 45, n. 8, p 610-614, 1989

[21] CONDE A.; de DAMBORENEA J. An electrochemical impedance study of a natural aged Al-Cu-Mg alloy in NaCl. **Corrosion Science**, v. 39, n. 2, p. 295-303

Tabelas

Tabela 1: Composição nominal da liga de alumínio 2024-T3[4,8]

Teor % (m/m)	Zn	Mg	Cu	Zr	Fe	Mn	Cr	Si
Mín.		1,2	3,8			0,3		
	≤0,3			0,05	≤0,5		0,10	≤0,5
Máx.		1,8	4,9			0,9		

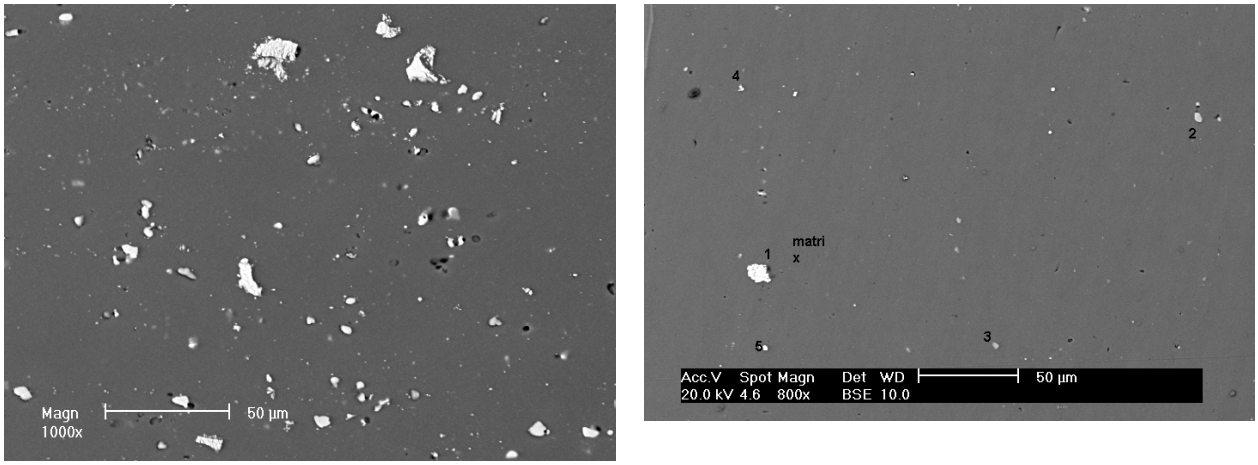
Tabela 2: Composição nominal da liga de alumínio 7050-T7451[9]

Teor % (m/m)	Zn	Mg	Cu	Zr	Fe	Mn	Cr	Si
Mín.	5,70	1,90	2,00	0,08	-	-	-	-
Máx.	6,70	2,60	2,60	0,15	0,15	0,10	0,04	0,12

Tabela 3 - Potencial de circuito aberto das ligas 2024-T3 e 7050-T7451 nas soluções com diferentes concentrações de cloretos.

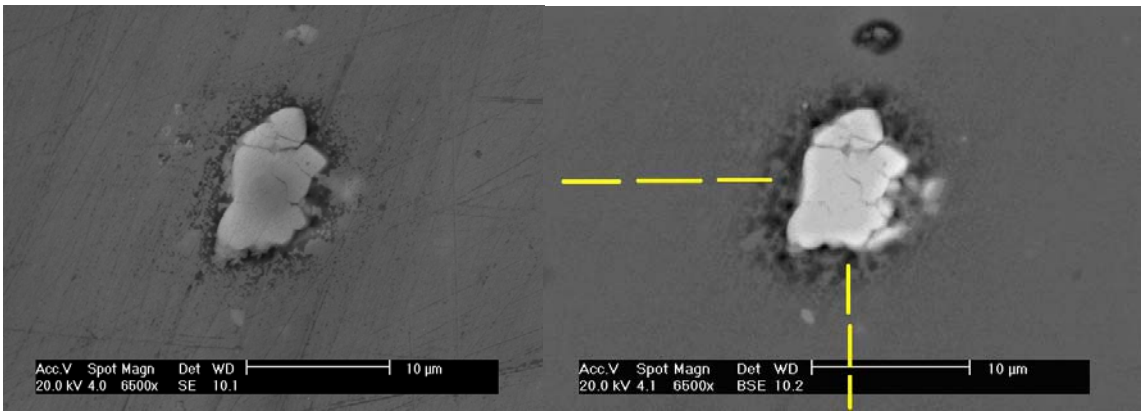
Concentração de Cloreto(mM)	E(mV/ECS) – Liga 2024-T3	E(mV/ECS) – Liga 7050-T7451	ΔE (mV) $PCA_{2024\text{-}T3} - PCA_{7050\text{-}T7451}$
1	-438	-571	133
2	-464	-594	129
5	-478	-611	133
10	-505	-625	120
20	-518	-652	134
50	-547	-676	129
100	-575	-690	115
200	-580	-708	128
500	-605	-726	121

Figuras



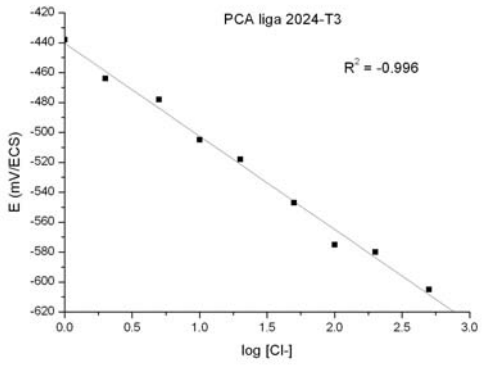
(a) (b)

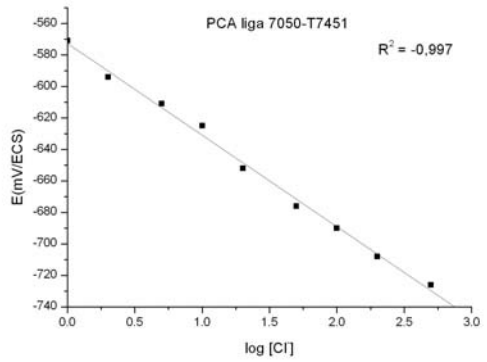
Figura 1 – Imagem de elétrons retroespalhados obtidas em MEV para as ligas (a) 2024-T3 e (b) 7050-T7451. Amostras polidas. Sem ataque.



(a) (b)

Figura 2 – Imagens de elétrons secundários, obtidas em MEV, de uma partícula intermetálica rica em cobre e ferro da liga 7050-T7451, após exposição por 30 minutos (a) e por 90 minutos (b) em solução de NaCl 50 mM naturalmente aerada.





(a) 2024	(b) 7050

Figura 3 – Variação do PCA das ligas de alumínio em função do logaritmo da concentração de íons cloreto.

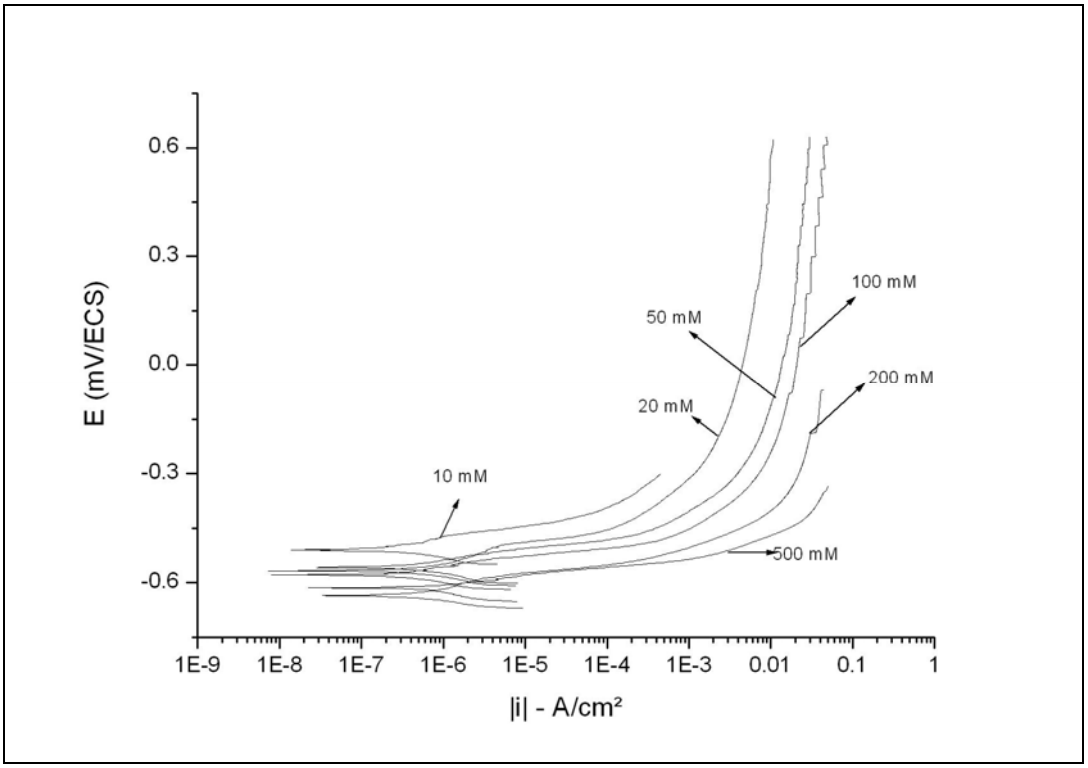


Figura 4 - Curvas de polarização anódica para a liga Al 2024-T3 em diferentes concentrações de cloretos.

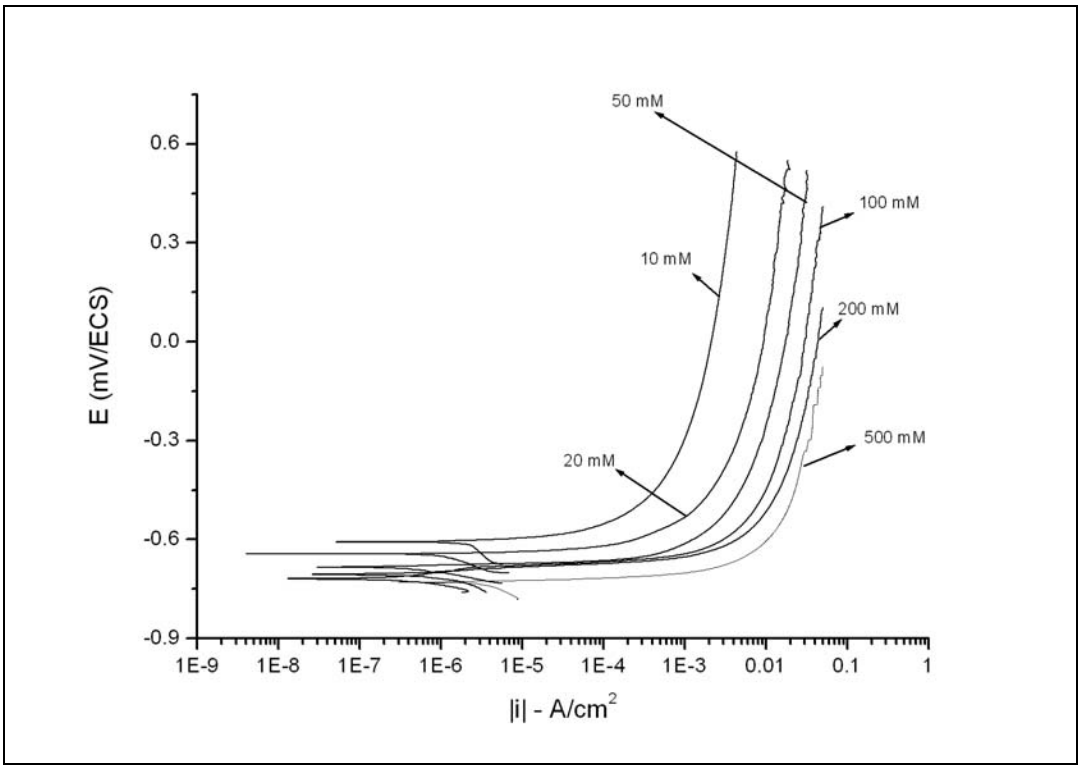


Figura 5 - Curvas de polarização anódica para a liga Al 7050-T7451 em diferentes concentrações de cloretos.

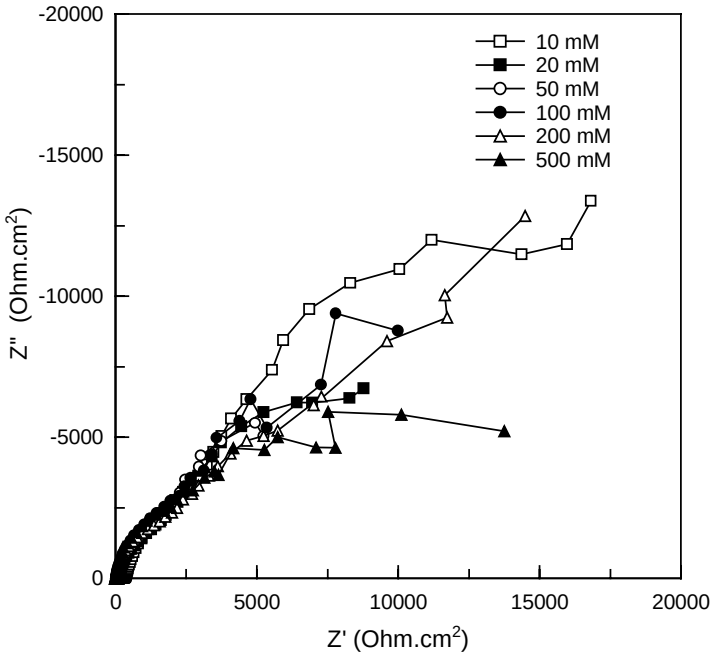


Figura 6 - Diagrama de Nyquist para a liga 2024-T3 em soluções de NaCl com diversas concentrações.

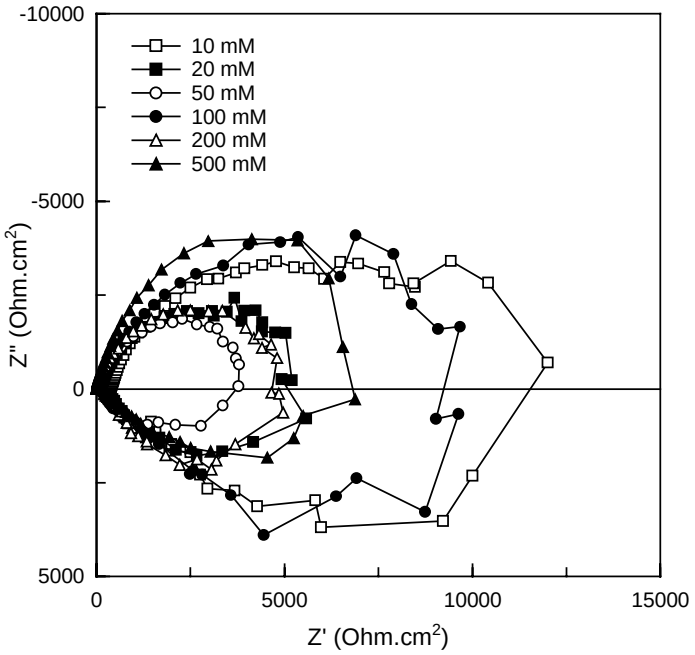


Figura 7 - Diagrama de Nyquist para a liga 7050-T7451 em soluções de NaCl com diversas concentrações..

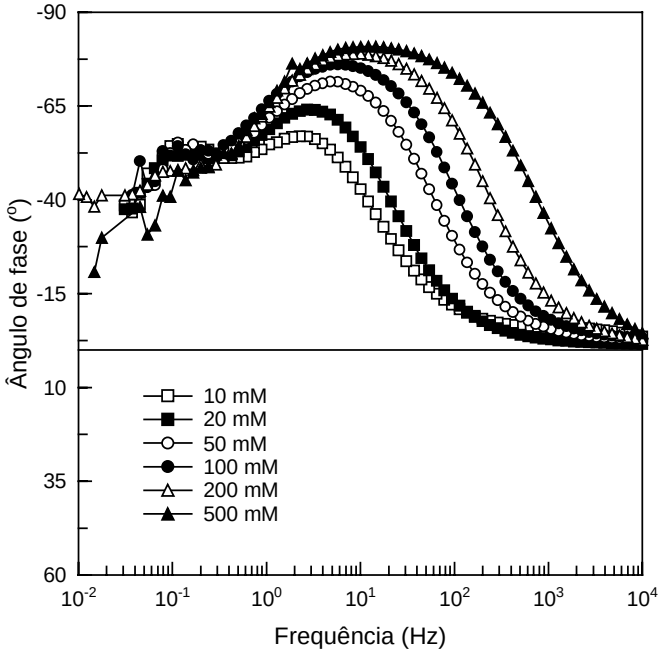


Figura 8 - Diagrama de Bode (ângulo de fase) para a liga 2024-T3 em soluções de NaCl com diversas concentrações.

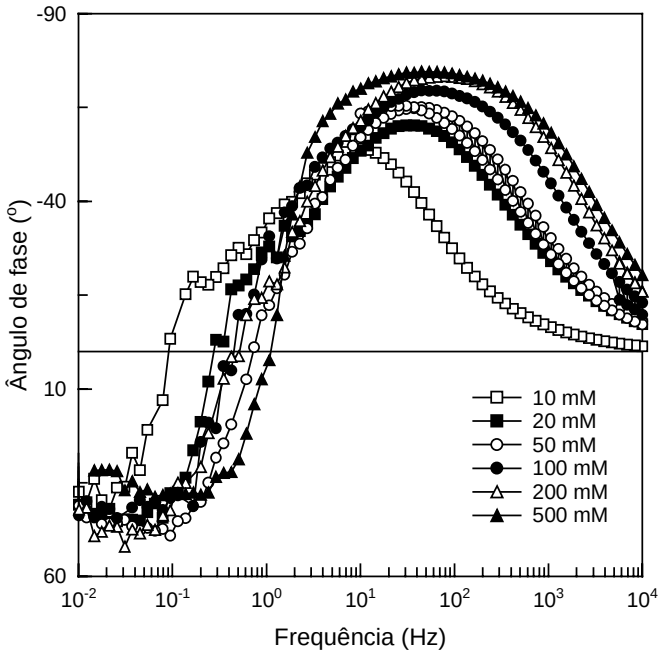


Figura 9 - Diagrama de Bode (ângulo de fase) para a liga 7050-T7451 em soluções de NaCl com diversas concentrações..