

RESISTÊNCIA A CORROSÃO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA A
BASE DE ALUMÍNIO REFORÇADO COM INTERMETÁLICO Ni₃Al

Patricia Borges da Silva Maia – Faculdade Anhanguera de Joinville - unidade 1

Cesar Edil da Costa – Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC Joinville

Francisco Velasco – Universidad Carlos III de Madrid

RESUMO: A resistência a corrosão dos compósitos de matriz metálica a base de alumínio reforçado com Ni₃Al, elaborados pelo processo de metalurgia do pó é abordada neste estudo. O reforço em questão foi obtido por duas rotas de fabricação, ou seja, solidificação rápida e ligação mecânica. Este último processo também foi utilizado para elaboração da matriz metálica a base de alumínio 2014. Todos os materiais foram testados como extrudados e após tratamento térmico. Os testes de corrosão seguidos foram: ASTM G110 (corrosão intergranular), G34 (susceptibilidade a corrosão por esfoliação) e G69 (potencial de corrosão). A influência dos diferentes intermetálicos e do tratamento térmico frente à resistência a corrosão dos compósitos foi analisada usando as técnicas de microscopia eletrônica de varredura e análise de energia de dispersão por raios-X.

ABSTRACT: The corrosion resistance of aluminium matrix composites strengthened with the intermetallic Ni₃Al manufactured for powder metallurgy process is evaluated in this study. The referred intermetallic is obtained through process of rapid atomization and mechanical bond, being the last process also utilized for the elaboration of the base alloy AA2014. All materials were tested in as extruded and after heat treatment. Corrosion testes were carried following ASTM G110 standard (intergranular corrosion), G34 (EXCO test) and G69 (corrosion potentials). It has been studied the influence that the different intermetallic and heat treatment has on the corrosion resistance of composites were studied, using techniques as scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray analysis.

PALAVRAS-CHAVE:

metalurgia do pó, ligas de alumínio, ligação mecânica, solidificação rápida, tratamento térmico.

KEYWORDS:

powder metallurgy, aluminium alloy, mechanical alloying, rapid solidification, heat treatment.

Artigo Original

Recebido em: 13/03/2011

Avaliado em: 31/10/2011

Publicado em: 28/04/2014

Publicação

Anhanguera Educacional Ltda.

Coordenação

Instituto de Pesquisas Aplicadas e
Desenvolvimento Educacional - IPADE

Correspondência

Sistema Anhanguera de
Revistas Eletrônicas - SARE
rc.ipade@anhanguera.com

1. INTRODUÇÃO

Conforme descrito por Maia; Costa; Velasco (2009, p. 10), “Os materiais compósitos de Matriz Metálica (CMM’s), com o passar do tempo, estão ampliando seu campo de aplicação uma vez que permitem a combinação de propriedades impossíveis de serem obtidas pelos materiais monolíticos convencionais”. Por permitem a incorporação de reforços diversos a matriz metálica, estes materiais apresentam excelente combinação de propriedades mecânicas, químicas, térmicas, magnéticas e elétricas, resultando em componentes com elevadas resistência mecânica, dureza, tenacidade, dureza bem como geralmente baixa densidade (VIEIRA et al., 2009). Dentre as matrizes metálicas mais aplicadas em engenharia, encontram-se às de alumínio, ferro, níquel, tungstênio e cobre, sendo que entre os reforços estão os óxidos, nitretos, boretos e compostos intermetálicos (ARAMI; SIMCHI; REIHNI, 2007).

Entretanto, no que se refere a aplicações estruturais, pode-se destacar os compósitos de matriz metálica a base de alumínio como os mais promissores. Quanto aos materiais utilizados como reforço dos CMM’s, destaca-se a família dos intermetálicos (CARRASCO et al., 1994), mais especificamente o Ni₃Al, que talvez seja um dos mais bem caracterizados e conhecidos (PEREZ et al., 1994). Isto decorre do fato de apresentarem uma combinação de características peculiares tais como elevado ponto de fusão, relativamente baixa densidade, elevada resistência mecânica, boa resistência a corrosão e oxidação.

Estudos já foram efetuados e compilados quanto ao comportamento à corrosão de compósitos de matriz metálica a base de alumínio com reforços diversos, como por exemplo, carbetos de silício (HARRIS; NOBLE; TROWSDALE, 1996), alumina (NUNES; RAMANATHAN, 1995), e cobre e grafite (SHARMA et al., 1996). Tais análises mostram que a adição de carbetos de silício (SiC) não afeta a resistência a corrosão intergranular de CMM’s a base de alumínio, mas também não auxiliam na resistência a corrosão galvânica. Por sua vez, a alumina (Al₂O₃) e SiC não alteram os resultados da resistência a corrosão por *pitting* assim como o potencial de corrosão. Porém, a formação de poros e fissuras na interface entre matriz e reforço (SiC) ocorreu de forma acentuada, dando início a formação de *pitting* quando o material foi imerso em NaCl. Por sua vez, encontra-se uma lacuna na literatura quanto ao comportamento à corrosão de compósitos de matriz metálica a base de alumínio reforçados com Ni₃Al. Assim sendo, este estudo teve por objetivo verificar o desempenho de compósitos de matriz metálica a base da liga de alumínio AA2014 reforçada com o intermetálico Ni₃Al quanto à resistência a corrosão, mais especificamente os ensaios padronizados conforme as normas ASTM (*American Society Testing Materials*) G110, G34 e G69.

Para a obtenção do compósito, objeto deste estudo, utilizou-se o processamento via metalurgia do pó (M/P). O intermetálico Ni₃Al empregado como reforço foi obtido por duas formas distintas de elaboração: técnica de solidificação rápida (RST) e ligação mecânica (*Mechanical alloying*), esta última também empregada para a produção dos pós da liga base de alumínio.

Faz-se necessário destacar o fato de que este artigo não abrange de forma ampla os temas liga AA2014, intermetálico Ni₃Al e sua função na liga, etc., uma vez que, não se trata de um informe técnico

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Elaboração dos Materiais

A liga base de alumínio com composição teórica da liga AA2014 (% em peso: Cu: 4,5; Si: 0,7; Mg: 0,5; Al: resto) foi elaborada através de ligação mecânica, sendo que os pós elementares foram misturados em um atritor por 10 horas a 700 rpm em atmosfera de argônio. A razão bolas/carga, na câmara de moagem foi de 20/1, sendo utilizado o produto Microwax como lubrificante durante o processo. Depois de elaborada, a liga base foi reforçada com partículas de Ni₃Al produzidas por diferentes rotas:

- Ni₃Al elaborado por ligação mecânica (MA): Ni e Al foram tratados em atritor por 3 horas a 700 rpm em atmosfera de argônio; razão bolas/carga: 20/1.
- Ni₃Al obtido por tecnologia de solidificação rápida (RST): produzido e caracterizado por Perez et al., 1994.

Para obtenção do material compósito, misturou-se durante 30 minutos, em misturador de laboratório, 5% (em peso) do intermetálicos a liga base. A fim de estudo, três diferentes materiais (liga base de alumínio AA2014: MA24; liga base de alumínio AA2014 reforçado com Ni₃Al por MA: MA24 + Ni₃Al MA; liga base de alumínio AA2014 reforçado com Ni₃Al por RST: MA24 + Ni₃Al RST) foram compactados uniaxialmente a 300 MPa. Estas preformas, após pre-aquecidas a 150°C, foram imersas em suspensão de óleo + grafite, foram posteriormente extrudadas a 500°C por 30 minutos a 350 MPa com uma taxa de extrusão de 25:1 e razão de carregamento de 5mm/s. A extrusão foi realizada sem desgaseificação nem encapsulamento, sendo que nenhum sinal de oxidação foi observado nas amostras após o término do processo descrito. As propriedades dos diferentes materiais foram determinadas na condição como extrudadas e após tratamento térmico (T.T.) T6: solubilização a 490° C em banho de sal durante 1 hora seguida por precipitação/envelhecimento durante 18 horas a 160° C.

Neste trabalho, fez-se um estudo microestrutural das diferentes amostras obtidas, antes e após T6, mediante a utilização da microscopia ótica convencional e eletrônica de varredura, respectivamente. O principal objetivo deste estudo diz respeito a influência das diferentes técnicas usadas na elaboração do intermetálicos Ni₃Al, bem como do tratamento térmico aplicado as amostras de compósitos quanto à resistência a corrosão das mesmas.

2.2. Testes de Corrosão

A avaliação dos materiais em estudo incluiu:

- Resistência a corrosão intergranular, de acordo com o ensaio padronizado ASTM G110, 1992.
- Susceptibilidade a corrosão por esfoliação (EXCO), de acordo com o ensaio padronizado ASTM G34, 1990.
- Medidas de potencial de corrosão, de acordo com o ensaio padrão ASTM G69, 1994 (padrão e modificado).

Resistência a corrosão intergranular

A corrosão intergranular é um fenômeno típico que ocorre nas ligas de alumínio tratadas termicamente, sendo frequentemente empregado o tratamento térmico de tempera assim como o de envelhecimento. Neste tipo de ensaio, pequenas seções de todas as amostras, assim como obtidas, foram cortadas e pesadas antes de serem imersas em uma solução de 57g de NaCl + 10 ml de H₂O₂, diluída em um litro de água destilada, a temperatura ambiente, por 6 horas. Após o tempo determinado de imersão, as amostras foram limpas e novamente pesadas. Desta forma, pode-se avaliar a resistência a corrosão pela perda de peso. Dando seqüência ao ensaio, as amostras foram preparadas (embutidas e polidas) para análises microscópicas (MEV) e dispersão de energia por raios-X (EDX), efetuando então a medida da profundidade do ataque corrosivo e fazer a análise química semi-quantitativa das áreas corroídas.

Susceptibilidade a corrosão por esfoliação

O estudo a susceptibilidade a corrosão por esfoliação de materiais metálicos faz-se imprescindível, principalmente quando se trata da aplicação destes materiais, mais precisamente das ligas das series 2XXX e 7XXX sob influencia de ambientes salino (marinho, por exemplo) e industrial. De forma a facilitar as análises macroscópicas inerentes a este tipo de ensaio, foram utilizadas as seções de maior área das amostras elaboradas, que também foram seccionadas e pesadas antes e após serem imersas em solução de 234 g de NaCl + 50 g de KNO₃ + 6,3 ml de HNO₃ (70%), diluída em 1 litro de água destilada, a temperatura ambiente. De acordo com a padronização ASTM G34, as amostras ficaram imersas por 72 horas. Além da classificação visual dos materiais, a análise por difração de raios-X demonstrou que a corrosão dos produtos ocorreu na superfície das amostras e permitiu avaliar o produto de corrosão formado na superfície das mesmas.

Medidas de potencial de corrosão

O conhecimento do potencial de corrosão de um determinado material metálico e de fundamental importância, sendo este uma ferramenta especialmente útil para a caracterização das condições metalúrgicas das ligas de alumínio da serie 2xxx e 7xxx, as quais apresentam cobre e zinco em suas composições.

Assim sendo, as medidas dos potenciais de corrosão de todos os compósitos elaborados foram apontadas seguindo o ensaio padronizado ASTM G69. Neste estudo, os potenciais de corrosão foram medidos em solução de 58,5 g de NaCl e 9 ml H₂O₂ (30%) diluídos em 1 litro de água destilada.

Para efetuar este ensaio, pequenas seções de todas as amostras foram cortadas, embutidas e polidas adequadamente. As amostras e o eletrodo de referencia (calomelano) foram posicionados no recipiente contendo a solução, tomando-se o devido cuidado para que a área dos materiais a ser medido o potencial de corrosão não estivesse exposta a mesma. Sobre estas áreas, em intervalos de 5 minutos por um período de 1 hora, conectava-se um dos terminais de um multímetro que apresentava o outro terminal conectado ao eletrodo de referencia.

Destaca-se o fato de que, devido ao interesse em estudar, além do comportamento dos diferentes materiais, a influencia do tempo e da concentração de NaCl sobre o potencial de corrosão (E_{corr}) procedeu-se um ensaio de potencial de corrosão modificado.

Este obedeceu ao mesmo procedimento experimental adotado para o potencial de corrosão normalizado citado acima, estando a diferença apenas na solução. Ou seja, formulou-se soluções com diferentes percentuais de NaCl (0.75, 1.5, 1.75, 2.5, 3.5, 5 e 6%, em peso) diluídos em 1 litro de água destilada, a temperatura ambiente. Portanto, repetiu-se sete vezes este ensaio porem para concentrações diferentes de NaCl.

3. RESULTADOS

Conforme apresentado por Maia, Costa e Velasco (p. 14-16, 2009) as microestruturas de todos os materiais estudados, ou seja, elaborados a partir da liga AA2014 pura e reforçada com o intermetálico Ni₃Al, exibiram de forma geral, uma homogeneidade microestrutural. Contudo, pode-se observar nitidamente a diferença entre as morfologias das partículas de intermetálicos utilizados como reforço, segundo seu processo de obtenção. Destaca-se, porém o fato de que após o tratamento térmico T6, ocorreu a formação de um composto ternário sobre a superfície destes elementos de reforço.

No que tange ao comportamento das amostras submetidas aos diferentes ensaios de corrosão (resistência a corrosão intergranular, susceptibilidade a corrosão por esfoliação e potencial de corrosão), tem-se na seqüência os resultados obtidos durante os procedimentos experimentais, inerentes a cada ensaio.

3.1. Resistência a corrosão intergranular

Por intermédio da Tabela 1 pode-se avaliar o resultado do ensaio de corrosão intergranular, a qual possibilita análise por diferentes caminhos, isto é, o comportamento a corrosão de todos os materiais quanto: a perda de peso durante o ensaio; a profundidade do ataque corrosivo e a relação Al/Cu na região corroída e a porcentagem de oxigênio nesta área.

Tabela 1 - Resultados do ensaio de corrosão intergranular.

Material	Perda em peso (%)	Profundidade do ataque (μm)	Relação Al/Cu (borda)	Teor de O na área corroída (%)
MA24	1,55	145	12,5	18,25
MA24 T6	1,06	96,1	8,4	37,2
MA24 + Ni ₃ Al RST	1,24	105	11,5	24,15
MA24 + Ni ₃ Al RST + T6	0,81	17,5	12,2	17,55
MA24 + Ni ₃ Al MA	1,18	123,6	12	29,2
MA24 + Ni ₃ Al MA T6	1,38	55,5	11,7	36,8

Considerando o fato de que para a liga base, a relação Al/Cu (teórica) é igual a 21, constata-se pela tabela acima, que esta relação é menor para a borda de todas as amostras após o ensaio em questão. Este comportamento indica uma perda de Al nas áreas corroídas (*pits*) que por sua vez apresentam um alto índice de oxigênio. Por sua vez, fica evidente que a profundidade do ataque corrosivo é mais pronunciada para os materiais que não foram submetidos a tratamento térmico.

Na seqüência, tem-se ilustradas as principais microestruturas, obtidas por microscopia eletrônica de varredura, dos materiais que foram submetidos ao ensaio de corrosão intergranular ASTM G110. A Figura 1 apresenta a liga base (MA24), a Figura 2 o compósito MA24 + 5% Ni₃Al (RST) e a Figura 3 o compósito MA24 + 5% Ni₃Al (MA), respectivamente.

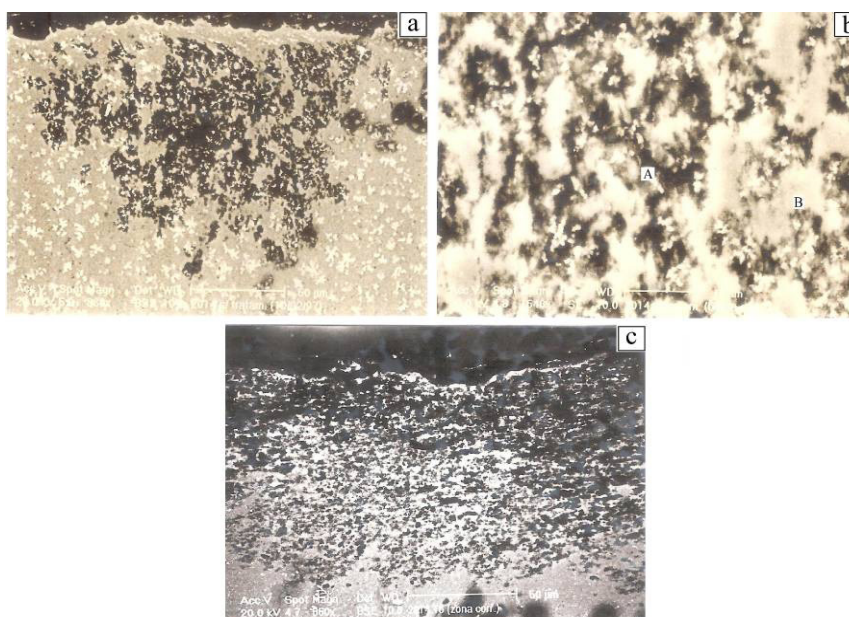


Figura 1 - Liga MA24 após ensaio de corrosão (MEV): Sem T6 (a e b) e após T6 (c).

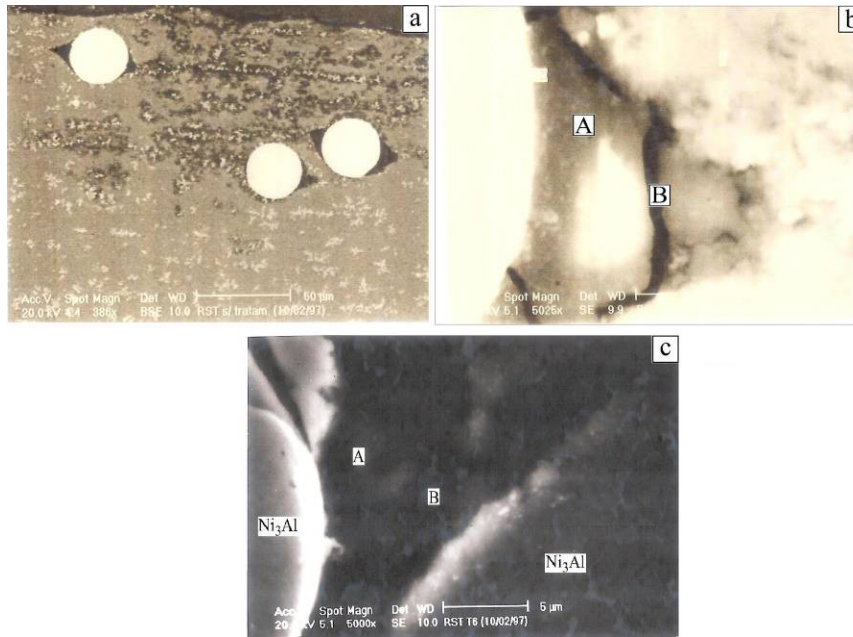


Figura 2 - Compósito + 5% Ni₃Al RST após ensaio de corrosão (MEV): a) Aspecto geral (a) e do ataque corrosivo junto ao reforço (b), antes de T6, respectivamente; b) Detalhe do ataque corrosivo junto ao reforço (c) após T6.

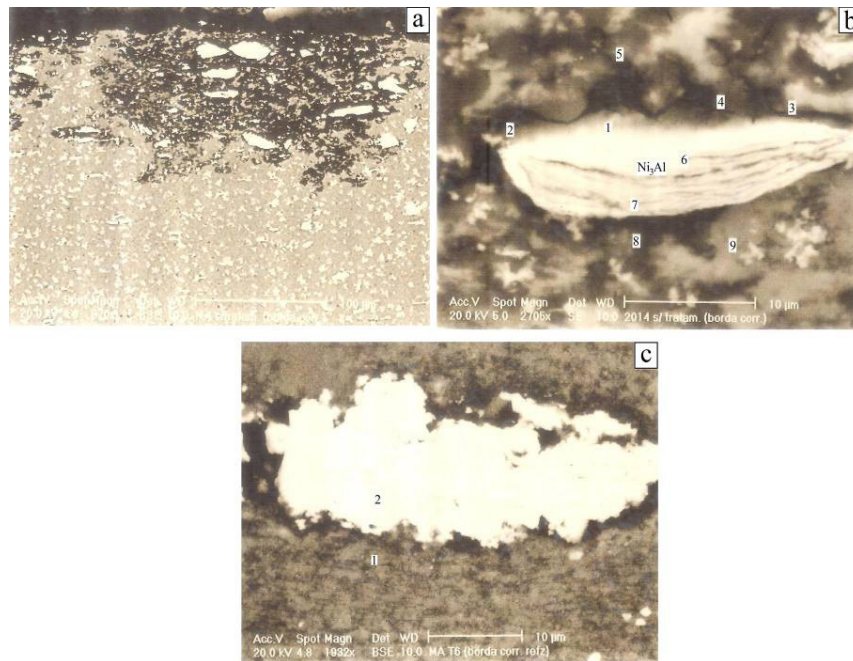


Figura 3 - Compósito + 5% Ni₃Al MA após ensaio de corrosão (MEV). a) Aspecto geral (a) e detalhe do ataque corrosivo junto ao reforço (b), antes de T6, respectivamente; b) Detalhe do ataque corrosivo junto ao reforço (c), após T6.

Dada a Figura 1, observa-se que na liga MA24 sem T6, a corrosão manifesta-se intergranularmente, mais especificamente ao redor dos precipitados de CuAl₂ (ponto A da Figura 1 (b)). Com o auxílio da difração de raios-x, nesta região detectou-se, além dos precipitados CuAl₂, a presença de oxigênio e uma quantidade de Al menor que na matriz, indicando assim, áreas mais corroídas quando comparado ao ponto B da referida figura. A metalografia da liga MA24 + T6, Figura 1 (c) e similar a liga sem tratamento térmico (S/T), porem com uma menor profundidade do ataque corrosivo, conforme pode ser constatado.

Em se tratando do compósito + Ni₃Al RST, apresentado pela Figura 2, verifica-se que o ataque corrosivo também se manifesta de forma intergranular. Contudo, quando este

ataque atinge as partículas de Ni₃Al, passa a concentrar-se em ambos os lados da mesma. Este comportamento pode ser confirmado por intermédio da Figura 2 (b), que devido a sua maior ampliação, destaca uma destas áreas e a formação de uma “cauda de cometa” ao redor da partícula de reforço. Efetuada a análise por EDX, confirma-se neste caso, a não decomposição do intermetálico, sendo, portanto, as áreas A e B desta figura, áreas de corrosão. Por sua vez, um comportamento similar é registrado para os compósitos após T6, cuja diferença significativa diz respeito às partículas de Ni₃Al encontrarem-se menos rodeadas pelo ataque. Este resultado é atribuído ao desenvolvimento do composto ternário sobre as partículas de reforço, fato este já citado anteriormente. Todavia, nas áreas corroídas próximas ao intermetálico, pontos A e B da Figura 2 (c), detectou-se a presença de Ni que advém da decomposição deste composto.

Por sua vez, o compósito reforçado com Ni₃Al MA apresenta comportamento distinto ao apresentado pela liga MA24 + 5% Ni₃Al RST, pois suas partículas de reforço sofrem dissolução. Um aspecto global destas áreas corroídas (material não tratado termicamente) pode ser observado na Figura 3 (a). Na Tabela 2, dada a seguir, tem-se registrado a composição dos nove pontos destacados na Figura 3 (b), a qual ilustra a forma pela qual as partículas de intermetálico são atacadas pela solução. Deve-se ressaltar que o mesmo comportamento, isto é, a dissolução das partículas de Ni₃Al e a formação do composto ternário formado no compósito reforçado com Ni₃Al RST e observado também nos compósitos + Ni₃Al MA após T6 (Figura 3 (c)).

Tabela 2 – Composição química semi-quantitativa (EDX) dos pontos marcados na Figura 3 (b).

Pontos	Elementos (%)					
	Al	Ni	Cu	Si	Mg	O
1	26,1	18,5	10,7	0,6	9,9	34,2
2	40,9	7,2	4,0	0,6	5,1	42,2
3	64,8	4,1	2,6	0,4	2,8	25,3
4	43,9	8,0	3,5	0,7	12,1	31,8
5	64,8	2,3	2,6	1,2	3,5	25,6
6	24,3	54,4	-	-	4,7	16,6
7	20,2	67,9	-	-	1,8	10,1
8	56,5	5,0	4,3	-	3,1	31,1
9	91,0	-	2,0	-	2,1	4,9

3.2. Susceptibilidade a corrosão por esfoliação

Dada a Figura 4, registro do aspecto superficial das amostras submetidas ao ensaio de susceptibilidade a corrosão por esfoliação ASTM G34 (EXCO), faz-se pertinente algumas conclusões. Isto é, mediante uma análise visual das amostras após 72 horas de ensaio,

observa-se que todos os materiais apresentaram resultado similar. Entretanto, para seguir o ensaio de forma precisa, faz-se necessário comparar o aspecto superficial das amostras em questão com a fotografia do aspecto superficial indicado pela referida norma.



Figura 4 – Aspecto das amostras após 72 horas de imersão na solução padronizada para o ensaio ASTM G34. (Microscopia ótica).

A avaliação do ensaio de corrosão por esfoliação faz-se possível mediante comparação entre o aspecto superficial de todas as amostras indicadas na Figura 4 e os vários estágios de corrosão por esfoliação (*ASM Specialty Handbook, Aluminium and Aluminium Alloys, 1996*). Seguindo este procedimento, tem-se a indicação da ocorrência de um ataque corrosivo tipo EA (superficial) em todas as amostras. Todavia, através da análise de difração de raios-X, diferenças na composição do produto de corrosão formado sobre a superfície das amostras após o ensaio foram detectadas. Além do NaCl (resíduo da solução de ataque), as substâncias encontradas encontram-se discriminadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Descrição da composição encontrada após ensaio ASTM G34, na superfície das amostras.

Amostra	Composição
Liga 2014 S/T (MA24)	Al(OH) ₃
Liga 2014 T6 (MA24 T6)	AlOCl
2014 MA S/T (MA24 + 5% Ni ₃ Al MA)	Al(OH) ₃ e AlOCl
2014 MA T6 (MA24 + 5% Ni ₃ Al MA + T6)	AlOCl
2014 RST S/T (MA24 + 5% Ni ₃ Al RST)	AlOCl
2014 RST T6 (MA24 + 5% Ni ₃ Al RST + T6)	AlOCl + Al

Em se tratando dos produtos de corrosão discriminados na tabela acima, identifica-se o AlOCl, a Al(OH)₃ (baerita) e o Al livre como os produtos formados. A Figura 5 ilustra as superfícies das amostras MA24 e MA24 + 5% Ni₃Al MA, ambas sem T6, respectivamente que apresentam a formação de baerita (óxido).

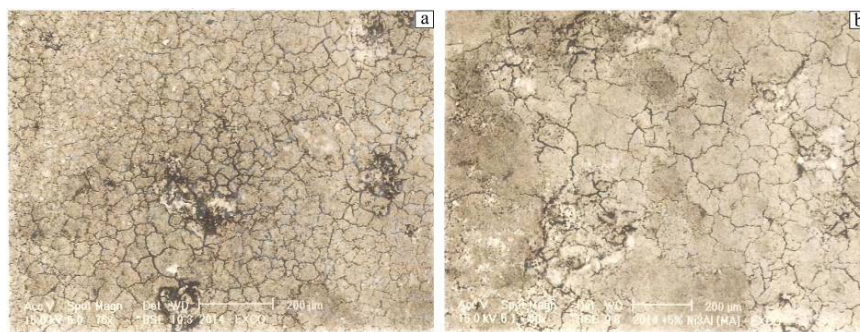


Figura 5 - Aspecto superficial das amostras (a) MA24 (b) MA24 + 5% Ni₃Al MA, após ensaio ASTM G34. (MEV).

3.3. Potencial de corrosão

No que diz respeito ao ensaio do potencial de corrosão ASTM G69, apresentam-se a seguir compilados os valores obtidos dos potenciais de corrosão para todos os materiais, segundo os ensaios ASTM G69 modificado e padrão (Figura 6 (a) e (b)), respectivamente.

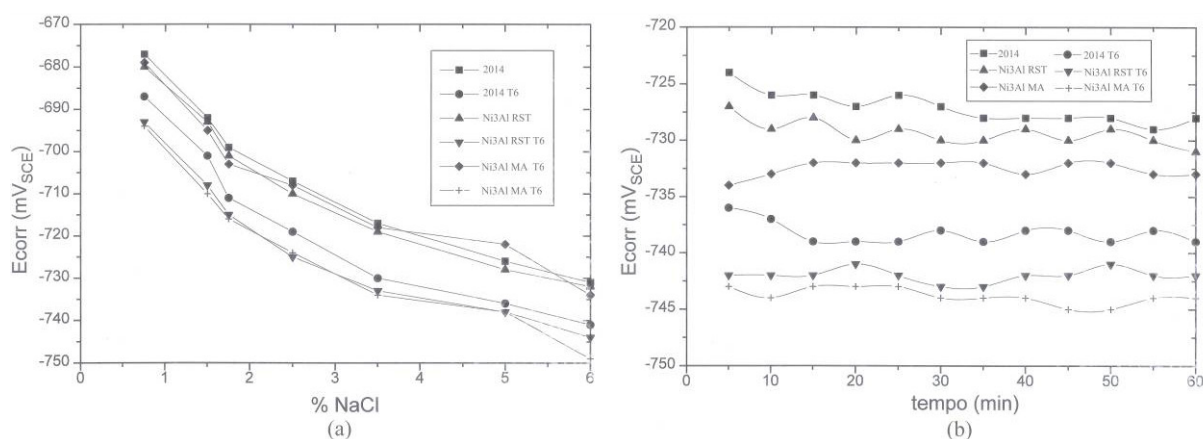


Figura 6 - Potencial de corrosão para todos os materiais, segundo a norma ASTM G69: (a) Modificado; (b) Padrão.

Segundo os dados apresentados pela Figura 6 (a), torna-se evidente que o potencial de corrosão decresce para todos os materiais, conforme aumenta a quantidade (%) de NaCl na solução (media dos valores registrados para cada concentração). Por outro lado, verifica-se pela Figura 6 (b), que a adição de H₂O₂ a solução não altera o potencial de corrosão das amostras ao longo do tempo, que apresentam comportamento estável durante o ensaio.

4. DISCUSSÃO

Em relação ao ataque de corrosão intergranular, observando os resultados de todos os materiais estudados, pode-se classificar o comportamento da liga MA24, tanto no estado extrudado como após T.T., como a mais suscetível a corrosão. Assim sendo, conclui-se que a adição do intermetálico, independente de sua forma de elaboração, a liga base teve um efeito positivo na resistência a corrosão da mesma. Em suma, ambos os intermetálicos (MA e RST) dificultam o ataque em profundidade, mas provavelmente por diferentes motivos: o reforço produzido por RST atua como área catódica enquanto os elaborados por MA atuam como

anodos de sacrifício, pois são preferencialmente atacados quando comparados a matriz. A razão para este comportamento baseia-se na forma de obtenção dos intermetálicos: o Ni_3Al produzido por ligação mecânica apresenta-se amorfo e contendo pequena quantidade de níquel livre (resultados de difração de raios-X para o Ni_3Al MA) (MAIA; COSTA; VELASCO, 2009). Conclui-se então, que durante a extrusão ocorre a recristalização apenas parcial deste reforço, o que justifica níquel ainda livre, e que o torna mais susceptível a corrosão do que a matriz de Al. Em suma, pode-se dizer que este tipo de reforço atua como anodo de sacrifício, promovendo proteção catódica a matriz de alumínio, conseqüentemente diminuindo a corrosão. Todavia, o intermetálico obtido por RST é mais estável, tanto do ponto de vista químico como cristalográfico, apresentando comportamento catódico frente a matriz. Ou seja, quando o ataque atinge as partículas deste tipo de reforço, a corrosão centra-se ao redor das mesmas, que passam a atuar como catodos frente a matriz dificultando o ataque corrosivo. Deve-se porém ressaltar o fato de que, para ambos intermetálicos (MA e RST) após T6, observa-se certa dissolução de níquel nas áreas corroídas da matriz. Tal comportamento deve-se a formação de um composto ternário (Al, Cu e Ni) nas superfícies destes reforços que é facilmente corroída e motivo da presença níquel sempre próximo a estas áreas. Neste caso, os intermetálicos Ni_3Al MA e Ni_3Al RST atuam promovendo proteção anódica a matriz, interrompendo o ataque em profundidade.

No que diz respeito ao ensaio de susceptibilidade a corrosão por esfoliação, após decorridas as 72 horas de ensaio, constatou-se que todas as amostras apresentaram características compatíveis com a corrosão tipo EA (superficial). Este resultado foi corroborado pelo fato de poucas áreas indicarem a formação de *pits*, ou seja, um nível insignificante de esfoliação. Entretanto, após o término deste ensaio e a fim uma conclusão melhor fundamentada, procedeu-se a análise dos produtos de corrosão formado sobre as superfícies das amostras. O AlOCl foi o principal produto de corrosão, embora nas amostras MA24 e MA24 + Ni_3Al MA, ambas sem T6, o produto de corrosão foi o $\text{Al}(\text{OH})_3$, sendo que, neste último material também ocorreu a formação de AlOCl e o ataque foi menos intenso. Porém, de forma distinta, sobre a superfície da amostra MA24 + 5% Ni_3Al RST + T6 detectou-se a presença de Al livre, o que induz a concluir que, do ponto de vista a corrosão, a oxidação não foi efetiva, tornando esta amostra o melhor material. Todavia, de forma geral, conclui-se que todas as amostras submetidas a este tipo de ensaio apresentam características favoráveis para aplicações em meios salinos.

Quanto ao potencial de corrosão dos materiais analisados, conclui-se de forma contundente que o incremento na quantidade de NaCl na solução (ensaio modificado) implica no decréscimo do potencial de corrosão para todos os materiais em estudo. Portanto, torna-se evidente que maior é a atividade e corrosividade da solução conforme o aumento na concentração de NaCl. A diferença entre os potenciais de corrosão para os materiais no

estado extrudados e após T6 e outro aspecto a ser considerado. Ou seja, os potenciais de corrosão dos materiais não tratados mostraram-se maiores que para os tratados termicamente, embora a diferença registrada tenha sido pequena (aproximadamente 15 mV). Contudo, deve-se destacar: do ponto de vista prático, ambos os intermetálicos não modificaram o potencial a corrosão da liga base, quer sem tratamento térmico ou não; e nenhuma mudança significativa no potencial a corrosão foi detectado com o passar do tempo do ensaio. De forma análoga, verifica-se que no ensaio padrão, no qual ocorre à adição de H₂O₂, o potencial de corrosão não se altera para nenhuma amostra. Em suma, comparando os resultados dos ensaios padrão e modificado, conclui-se que as amostras apresentaram resultados similares para ambos os casos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

- O reforço da liga de alumínio 2014 com o intermetálico Ni₃Al é benéfico do ponto de vista de resistência a corrosão, tanto no estado extrudado como após tratamento térmico T6.
- Os potenciais de corrosão da liga 2014 são levemente afetados por ambos os tipos de reforços intermetálicos.
- O resultado do ensaio de corrosão (EXCO) por esfoliação indicou que todas as amostras podem ser utilizadas por períodos relativamente longos em ambientes salinos;
- Referente aos resultados do ensaio de resistência a corrosão intergranular, verifica-se que as partículas de Ni₃Al atuam como defesa a este tipo de corrosão;
- Em relação a matriz, o Ni₃Al (MA) atua como anodo de sacrifício e o Ni₃Al (RST) interrompe o ataque em profundidade, o que significa dizer que atuam como proteção catódica e catodo, respectivamente.

REFERÊNCIAS

ARAMI, H.; REIHNI, S.; SIMCHI, A. **Mechanical induced reaction in Al-CuO system for in situ fabrication of Al based nanocomposites**. Journal of Alloys and Compounds, v. 465, p. 151-156, 2007.

ASM Specialty Handbook. Aluminium and aluminium alloys: Corrosion Behavior. Ed J.R.Davis, p. 600-601, 1996.

ASTM G34: Standard test Method for Exfoliation Corrosion Susceptibility in 2XXX and 7XXX Series Aluminum Alloys (EXCO Test). Annual Book of Standard, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990.

ASTM G60: Standard Practice for Measurement of Corrosion Potentials of Aluminum Alloys. Annual Book of ASTM Standard, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994.

- ASTM G110: Standard Practice for Evaluating Intergranular Corrosion ResistANCE OF Heat Treatable Aluminum Alloys by Immersion in Sodium Chloride + Hydrogen Peroxide Solution. Annual Book of ASTM Standard, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992.
- CARRASCO, J. L. G.; CANO, F. G.; CARUANA, G.; LIEBICH, M. **Aluminum/Ni₃Al composites processed by powder metallurgy**. Materials Science and Engineering A, 183, L5-L8, 1994.
- HARRIS, S.J.; NOBLE, B.; TROWSDALE, A.J. **Corrosion behaviour of aluminum matrix composites containing silicon carbide particles**. Materials Science Forum, v.217-222, p. 1571-1576, 1996.
- MAIA, P.B.S.; COSTA, C.E.; VELASCO, F. **Caracterização microestrutural e mecânica de compósitos de matriz metálica reforçados com intermetálico Ni₃Al**. Revista de Ciências Exatas e Tecnologia, v. IV, n. 4, p. 9-22, 2009.
- NUNES, P.C.R.; RAMANATHAN, L.V. **Corrosion behavior of alumina-aluminum and silicon carbide-aluminum metal-matrix composites**. Corrosion Science, p.610-617, august, 1995.
- PEREZ, P.; CARRASCO, J. L. G.; CARUANA, G.; LIEBICH, M.; ADEVA, P. **Microstructural characterization of P/M Ni₃Al consolidation by HIP**. Materials Characterization 33, p. 349-356, 1994.
- SHARMA, S.C.; RAO, G.S.K.; NAGARAJAN, M. et al. **Evaluation of corrosion resistance of aluminium-copper-graphite particulate composites**. Materials Science Forum, v. 217-222, p. 1577-1580, 1996.
- VIEIRA Jr., L.E. NETO, J.B.R.; HORTZA, D.; KLEIN, A.N. **Compósitos de matriz metálica reforçados pela dispersão de partículas cerâmicas produzidos por mecanossíntese: uma revisão**. Exacta, São Paulo, v.7, n.2, p. 195-204, 2009.