

COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DA LIGA DE MAGNÉSIO AZ31 SUBMETIDA AO ENSAIO DE POLARIZAÇÃO CÍCLICA*

Camila Queiroz Correia Fernandes¹
Elivelton Alves Ferreira²
José Adilson de Castro³
Darlene Souza da Silva Almeida⁴
Leonardo Martins da Silva⁵

Resumo

Esta pesquisa apresenta um estudo comparativo da resistência a corrosão da liga de magnésio AZ31 tratada termicamente por solubilização e diferentes tempos de envelhecimento, submetida ao teste de polarização cíclica em solução de 3,5% de NaCl. Amostras da liga foram solubilizadas a 440° C por 24 horas. Após a solubilização as amostras foram envelhecidas a 220° C; por 2, 6 e 12 horas. Foram realizadas análises microestruturais para compreender as alterações advindas dos tratamentos térmicos. As amostras foram submetidas ao ensaio de polarização cíclica. As amostras que foram expostas a maiores tempos de envelhecimento tiveram o tamanho médio dos grãos aumentados, assim como a dureza. Análise dos indicadores de corrosão como potencial em circuito aberto, potencial de corrosão, potencial de pite, densidade de corrente e taxa de corrosão mostraram que quanto maior o tempo de envelhecimento e consequentemente maior tamanho de grão, menor a resistência à corrosão da liga.

Palavras-chave: Liga de Magnésio; AZ31; Corrosão; Polarização Cíclica.

COMPARATIVE BEHAVIOR OF MAGNESIUM ALLOY AZ31 BY CYCLIC POLARIZATION TEST

Abstract

This research presents a comparative study between the corrosion resistance of the heat treated magnesium alloy AZ31 by solubilization and different aging times, submitted to the cyclic polarization test in 3.5% NaCl solution. Four samples were solubilized at 440 ° C for 24 hours. After a solubilization, the samples were aged at 220 ° C; one for two hours, another for 6 hours and a third for 12 hours. Microstructural analysis was carried out to identify microstructural changes obtained. The samples were submitted to the cyclic polarization test in order to correlate the effect of the changes achieved by heat treatments on the corrosion resistance of the magnesium alloy AZ31.

Keywords: Magnesium Alloy; AZ31; Corrosion Resistance; Cyclic Polarization.

¹ Engenharia Metalúrgica, Bacharel, Analista de Qualidade, Tecnologia de Processo e Produto, Gerdau, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.

² Engenharia Química, Doutor, Professor, Departamento de Física, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil.

³ Engenheiro Metalúrgico, PhD em Engenharia, Professor, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil.

⁴ Engenharia Metalúrgica, Bacharel, Aluna de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil.

⁵ Engenharia Metalúrgica, Bacharel, Aluno de Pós-Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O magnésio e suas ligas têm sido apontados como alternativa para satisfazerem exigências de indústrias que buscam constantemente por materiais que possuam ótima resistência mecânica e baixo peso, apresentando assim grande potencial em substituição às ligas aço e de alumínio amplamente utilizadas em indústrias de transporte como automobilísticas e aeronáuticas. Contudo, apesar de seu grande potencial mecânico, as ligas deste grupo ainda não são amplamente utilizadas principalmente devido a sua baixa resistência a corrosão. Em um estudo Cao et al. [1] investigou o comportamento de corrosão da liga de Mg AZ91 em solução de NaCl 0,1 M usando técnicas eletroquímicas observando uma natureza altamente corrosiva da liga AZ91 em comparação com o metal Mg. Cheng et al. [2] estudou a influência de elementos de liga como Zr, Al na resistência à corrosão do Mg em solução de NaCl 1 M usando medições eletroquímicas. Eles observaram que a liga AZ91 apresentou a pior resistência à corrosão quando comparada às ligas AZ31, AM60 e ZK60. Nos tratamentos térmicos das ligas de magnésio, a recristalização pode vir acompanhada pelos processos de autodifusão e interdifusão dos elementos de liga e das fases intermetálicas, dependendo da temperatura, concentração dos elementos de liga e da presença de fases. A liga de magnésio AZ31 com fase majoritária α - Mg gera a formação de precipitados $Mg_{17}Al_{12}$ junto a outros de baixa solubilidade (Al_8Mn_5 , $Al_{11}Mn_4$ e SiMg) na faixa de temperaturas entre 150 e 250°C. A formação de precipitados pode inserir considerável endurecimento, mas torna a liga novamente suscetível à corrosão devido a estas fases terem alto potencial de oxidação [3].

Este estudo visa através da polarização cíclica obter uma correlação do efeito do tamanho de grão e a presença da fase $Mg_{17}Al_{12}$ na resistência a corrosão da liga de magnésio AZ31.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

O objeto de estudo será a liga de magnésio AZ31, que contém 3% de alumínio e 1% de zinco, na forma de placa laminada com superfície previamente polida a 800 Mesh. Foi realizada caracterização da liga no estado como recebida e após tratamento térmico. Esta caracterização constitui-se de medida de microdureza, análise metalográfica por microscopia ótica e micrografia por microscópio eletrônico de varredura (MEV). As amostras de material como recebido e após realização do tratamento térmico foram submetidas aos ensaios eletroquímicos.

Baseando-se na norma ASTM E92 [4], testes de microdureza foram realizados com o auxílio do microdurômetro automático Shimadzu HMV-2. Para condução dos testes é utilizada uma carga de 980 mN aplicada durante 13 segundos. Dez identificações são realizadas em cada amostra da seção transversal da chapa e um intervalo de 95% de confiança é obtido por meio da equação 1[5].

$$\text{Intervalo}_{(95\%)} = HV_{\text{médio}} \pm 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

\sqrt{n}

Onde σ é o desvio padrão e n é o número de medidas realizadas.

Para a análise metalográfica, as amostras foram seccionadas na longitudinal, transversal e na seção de laminação, as superfícies embutidas em baquelite epoxy, lixadas e polidas para avaliação da microestrutura e possíveis defeitos. As lixas

utilizadas foram de SiC de grana 320 a 2500 mesh, para polimento utilizou-se sílica coloidal de 0,04 μm .

As amostras foram também atacadas pelo método de imersão em solução reagente (90 ml álcool etílico, 10 ml água destilada, 2 ml ácido acético e 5,8 g ácido pícrico) durante 20 segundos com a finalidade de avaliar microestrutura predominante, tamanho de grão e presença de outras fases possivelmente presentes[6]. As medidas de tamanho de grão foram realizadas com auxílio de um perfilômetro baseando na norma ASTM E112[7].

A amostra do material como recebido apresentou uma microestrutura heterogênea com distribuição bimodal do tamanho de grão. Assim, as medidas foram realizadas separadamente para as regiões recristalizadas (grãos finos) e para as regiões não recristalizadas de grãos alongados (grãos grosseiros).

Para medir o tamanho de grão foram “traçadas” 10 linhas horizontais (para medir o tamanho de grão da região refinada) e 10 linhas verticais (interceptando os grãos alongados) sobre a imagem do material no visor do perfilômetro (a própria linha do visor do perfilômetro foi utilizada para este fim), em seguida, os interceptos dos contornos de grão com a linha foram contados e o tamanho de grão médio foi então calculado pela equação 2[7].

$$T_{\text{grao}(\bar{d})\text{médio}} = \frac{L \times A}{n} \quad (\text{mm}) \quad (2)$$

n

Onde L é o comprimento da linha, A é ampliação da imagem e n é o número de interceptos.

Para realização dos ensaios eletroquímicos foi utilizada uma célula eletroquímica do tipo Tait com eletrodo de trabalho sendo a liga de magnésio AZ31 com área de 1 cm^2 , contra eletrodo auxiliar de platina de área de 2 cm^2 e de eletrodo de referência de prata/cloreto de prata. Os eletrodos de trabalho foram lixados e polidos; as lixas de SiC de grana 320 a 2500 mesh e para polimento sílica coloidal de 0,04 μm . Foi utilizada solução de 3,5% de NaCl de pH 7 para avaliação sob caráter neutro. Vale salientar que as soluções foram preparadas com água deionizada a temperatura ambiente.

2.1.1 Tratamento Térmico

Segundo o diagrama de equilíbrio para liga binária Mg-Al apresentado na Figura 1, pela regra da alavanca é possível observar que acima de 170°C a liga AZ31 apresenta microestrutura monofásica. Assim, com base na literatura [8, 9], as amostras foram primeiramente solubilizadas à 440°C por 24 horas e em seguida resfriadas em água. Após a solubilização, com exceção da “Amostra 1”, a “Amostra 2, Amostra 3 e Amostra 4” foram envelhecidas por 4, 6 e 12 horas respectivamente, e em seguida resfriadas em água. Variou-se o tempo de envelhecimento justamente para obter microestruturas diferentes para que posteriormente essas mudanças pudessem ser correlacionadas às diferenças nas medidas eletroquímicas de corrosão.

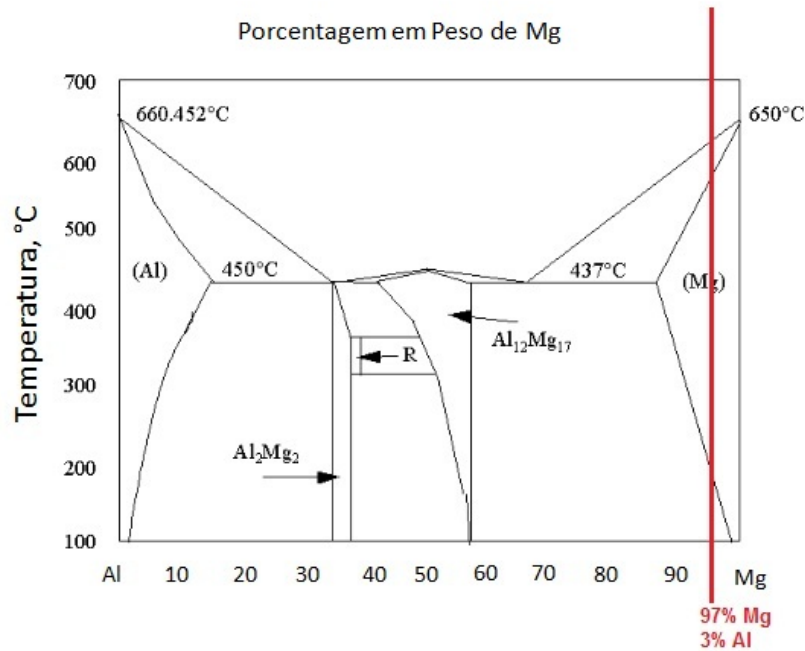


Figura 1. Diagrama de equilíbrio do sistema binário Mg-Al [10]

2.1.2 Curvas de Polarização

Foram obtidas utilizando um potenciostato modelo EmSat acoplado ao software OS Trace 4.2 durante um período de 1 hora dos eletrodos imersos nas soluções de 3,5% de NaCl, sendo as medidas feitas após a estabilização do potencial de circuito aberto utilizando uma velocidade de varredura de 1 mV/s, a fim de verificar o deslocamento do potencial de corrosão e densidade de corrente, iniciando a -150 mV do potencial em circuito aberto até +150 mV acima deste mesmo potencial. As curvas de Tafel foram obtidas através dos dados gerados pelas curvas de polarização cíclica. A taxa de corrosão TC foi calculada a partir das equações 3 e 4 de acordo com a norma ASTM G102 [11].

$$EW = \sum 1 / (n_i f_i / w_i) \quad (3)$$

Onde n_i é a valência do i th elemento na liga, f_i a fração mássica do i th elemento na liga, e w_i o peso atômico do i th elemento na liga.

$$TC = (k \times i_{\text{corr}} \times EW) / \rho \quad (4)$$

Onde k é 0,00327 para obter valores em mm/ano, i_{corr} a densidade de corrosão, e ρ a densidade da liga.

2.2 Resultados e Discussões

A Figura 2 apresenta micrografias no plano longitudinal para a liga AZ31 no estado como recebida. É possível observar que o material, no estado como recebido, apresenta uma microestrutura bastante heterogênea com regiões de grãos de α -Mg bastante refinados pela ocorrência de fenômenos de recristalização localizados e outras regiões não recristalizadas que mantiveram os grãos alongados, característicos do processo de laminação [6].

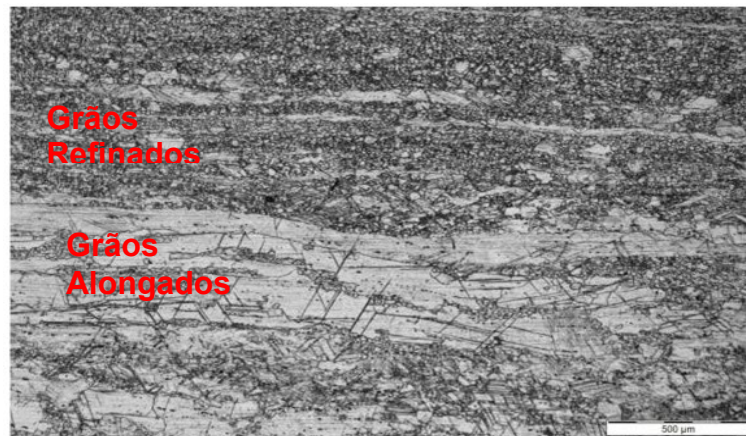


Figura 2. Micrografia da Seção Longitudinal da Liga AZ31 como Recebida (Aumento de 50x)

Na Figura 3, que apresenta a superfície da amostra solubilizada, é possível observar a presença de precipitados, que se destacam pela coloração branca que contrasta à matriz de cor cinza da liga. As demais amostras também apresentaram a mesma distribuição desses precipitados que podem se tratar da fase eutética $Mg_{17}Al_{12}$, como mostra o perfil de EDS (Figura 4) realizado no Spectrum 2.

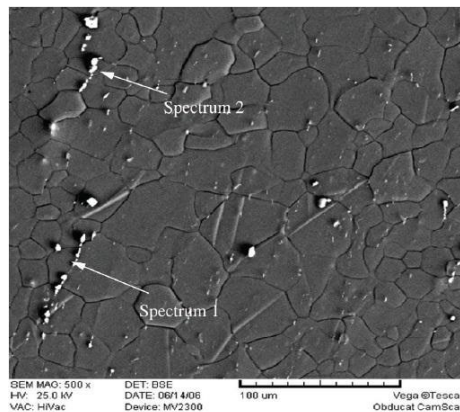


Figura 3. Superfície de laminação da liga de magnésio AZ31 como recebida no modo de elétrons secundários SE.

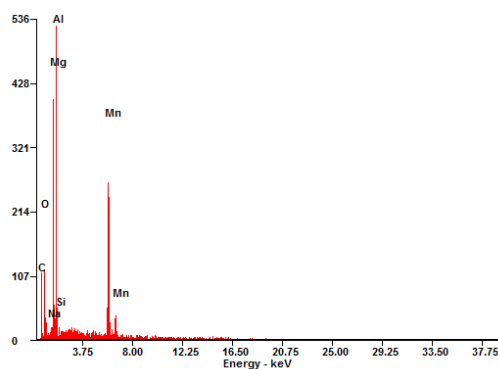


Figura 4. Perfil de Elementos Químicos no Spectrum 2.

As Figuras 5 à 8 mostram a microestrutura da liga após os tratamentos térmicos. Observa-se em todas as amostras a presença de maclas, sendo que nas amostras que foram envelhecidas as maclas apresentaram-se mais dispersas. Segundo estudos, nas ligas de magnésio as maclas podem ser induzidas pelo próprio tratamento térmico [12]. Além disso, houve também um crescimento de grãos com o aumento do tempo de envelhecimento. O tamanho de grão da liga no estado como recebida foi medido separadamente para as regiões recristalizadas e regiões de grãos alongados. Não foi possível medir o tamanho de grão para a Amostra 1, que foi apenas solubilizada, devido a forte presença de maclas.

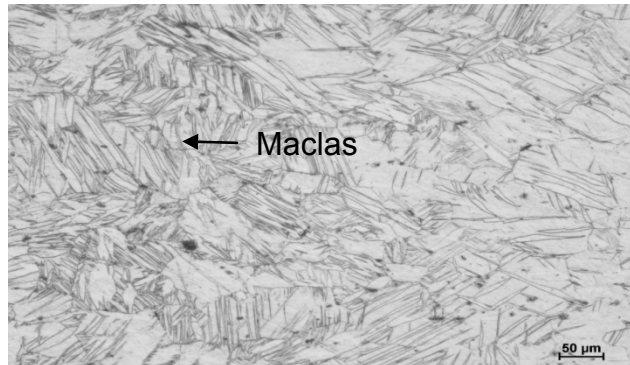


Figura 5. Microestrutura da Amostra 1 Solubilizada à 440 °C por 24 horas (Aumento de 100x)

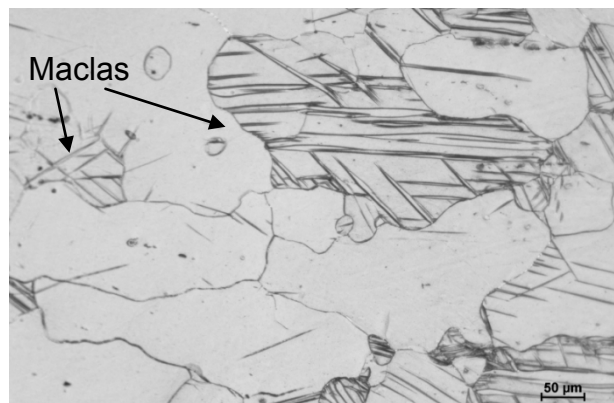


Figura 6. Microestrutura da Amostra 2 Solubilizada a 440 °C por 24 horas e Envelhecida a 220 °C por 4 horas (Aumento de 100x).

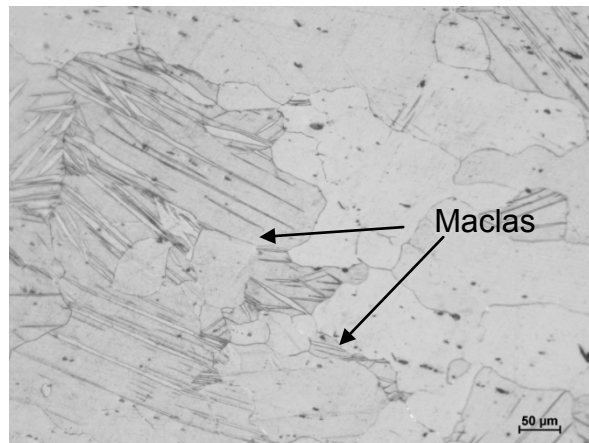


Figura 7. Microestrutura da Amostra 3 Solubilizada a 440 °C por 24 horas e Envelhecida a 220 °C por 6 horas (Aumento de 100x).

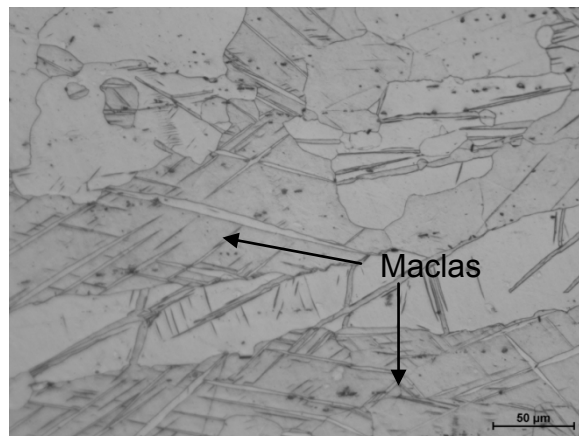


Figura 8. Microestrutura da Amostra 4 Solubilizada a 440 °C por 24 horas e Envelhecida a 220°C por 12 horas (Aumento de 100x).

2.2.1 Microdureza

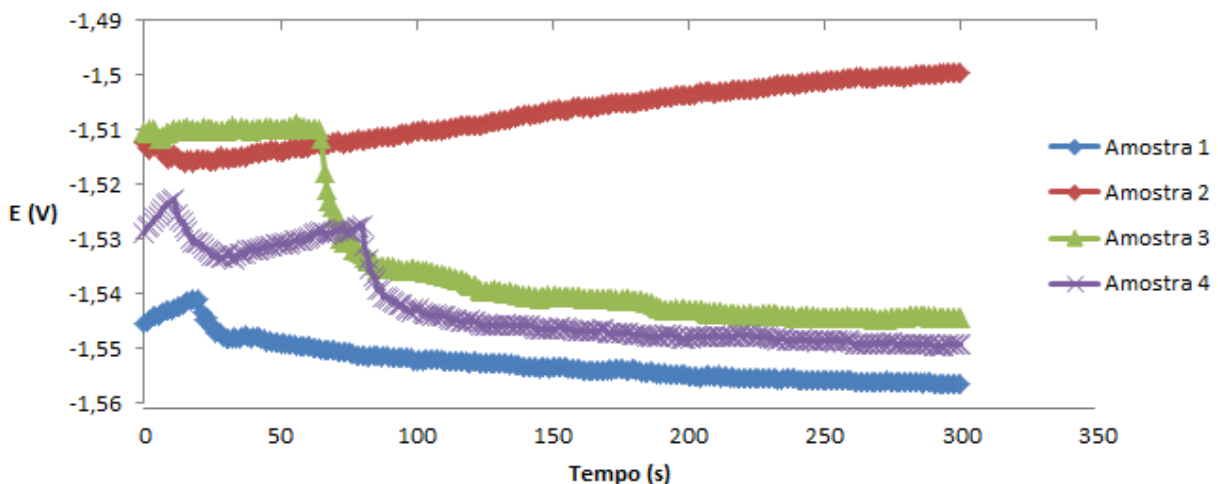
As medidas de microdureza estão apresentadas na Tabela 1. Na amostra como recebida obteve-se um valor médio de 63 HV, bastante superior aos demais valores obtidos nas amostras que foram submetidas ao tratamento térmico. Contudo, não há maiores informações sobre os processamentos nos quais a liga pode ter sido submetida pelo fabricante. Observa-se então uma queda na dureza nas amostras tratadas termicamente, que pode ser atribuída a mecanismos de recuperação que são ativados durante o tratamento térmico aliviando tensões acumuladas durante a laminação [13]. Nas amostras tratadas termicamente, a maior dureza é obtida na Amostra 1, solubilizada a 440°C por 24 horas. Há novamente uma queda na dureza após o envelhecimento. Observa-se, contudo, que com o aumento do tempo de envelhecimento há também aumento da dureza. Este aumento pode estar correlacionado com a dissolução de possíveis precipitados, causando endurecimento do material por solução sólida. Além disso, o aumento da solubilidade do alumínio na rede de magnésio provocado pelo tratamento térmico causa distorção na rede cristalina, devido às diferenças entre os raios atômicos desses elementos, promovendo maior dureza [14].

Tabela1.Medidas de Microdureza e Tamanho de Grão.

	Microdureza (HV)	Tamanho de Grão (μm)
Como Recebida (Região Recristalizada)	63,00 +/- 13,00	14,09 +/- 0,90
Como Recebida (Região Alongada)		120,00 +/- 26,00
Amostra 1	39,85 +/- 4,83	-
Amostra 2	31,42 +/- 4,22	12,09 +/- 2,92
Amostra 3	33,40 +/- 7,11	12,25 +/- 2,46
Amostra 4	37,55 +/- 5,73	26,39 +/- 7,47

2.2.2 Ensaios Eletroquímicos

Logo nos primeiros minutos de exposição das amostras da liga AZ31 à solução de 3,5% de NaCl, foi observado visualmente a formação de bolhas de hidrogênio na superfície da liga [15]. A Figura 9 apresenta um gráfico da evolução do potencial em circuito aberto (E_{ocp}) ao longo do tempo. Bin Jiang [16] em uma pesquisa da influência do tamanho de grão e da orientação cristalográfica no comportamento à corrosão de chapas da liga de magnésio AZ31 encontrou valores de E_{ocp} próximos aos obtidos neste estudo, em torno de -1,50 V, que tornava-se mais negativo quanto maior o tamanho do grão. Durante os 30 minutos de exposição a Amostra 1 apresentou o menor valor de potencial em circuito aberto, aproximadamente -1,55 V. Maiores tempos de envelhecimento apresentaram aumento de tamanho de grão e menores valores de E_{ocp} , em concordância com a literatura citada. Observou-se também que, com excessão da Amostra 2, nos primeiros segundos de exposição à solução, houve um aumento do valor de E_{ocp} que em seguida tendeu para valores mais negativos. Este comportamento inicial pode ser atribuído à dissolução do Mg, que favorece a produção de íons de OH, como resultado da formação de gás de hidrogênio da reação catódica [17].

Figura 9.Potencial em Circuito Aberto (E_{ocp}) ao Longo do Tempo

As curvas de polarização cíclica estão representadas na Figura10. Todas as amostras apresentaram comportamento similar, onde o potencial de corrosão após a reversão de corrente é mais negativo que antes desta, indicando que a área que foi corroída continua atuando como ânodo protegendo a área que ainda não sofreu corrosão, acelerando a reação anódica causando pites [17]. Além disso, após a

reversão da varredura de potencial, na região 3, o sentido da curva demonstra que houve corrosão localizada, ou seja, corrosão por pite. Neste ponto é determinado o potencial de pite. A região 1 corresponde à região catódica e representa a evolução do hidrogênio, enquanto a região 2 corresponde à região anódica e representa a dissolução do Mg em Mg^{2+} [18]. No início da varredura na região 1, ocorre diminuição da densidade de corrente provavelmente pela passivação da superfície em contato com a solução formando uma camada de $Mg(OH)_2$. Contudo, os íons cloreto penetram facilmente neste filme causando sua deterioração [19]. Assim, a densidade de corrente continua tendendo para valores mais negativos até atingir o E_{corr} , onde passa a tender para valores mais positivos devido à corrosão localizada induzida pelos íons de cloreto [20].

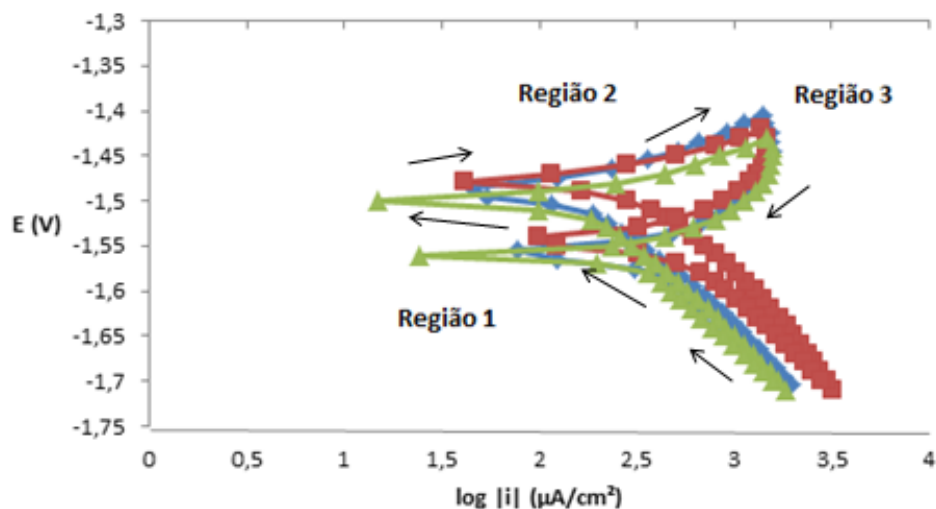


Figura 10. Polarização Cíclica - Amostra 1

Os dados da Tabela 2 foram obtidos através das curvas de potencial em circuito aberto e curvas de polarização, pelo método da extrapolação de Tafel. É possível perceber que o E_{corr} (ou E_{ocp}) se tornou mais negativo com o aumento do tempo de envelhecimento. Além disso, a densidade de corrente aumentou com o tempo de envelhecimento. Estudos [21] demonstram que dois fatores são fundamentais para determinar a corrosão da liga de magnésio AZ31: textura cristalográfica e tamanho de grão. Planos cristalográficos contribuem para a energia de superfície e conseqüentemente para o comportamento à corrosão das ligas de magnésio. O plano (0001) nas ligas de Mg tem a maior densidade atômica (1.13×10^{19} átomos/ m^2) e maior coordenação atômica é associada a planos mais empacotados, com maior energia de contorno de grão, menor energia superficial, e maior energia de ativação para dissolução do Mg [20].

O plano (0001) tem a menor energia de superfície, é mais difícil de dissolver e a corrosão ocorre mais devagar, conseqüentemente este plano tem a menor taxa de corrosão quando comparado aos planos do Mg [22 e 23]. Apesar da textura cristalográfica explicar relativamente a corrosão da liga AZ31, não explora a interferência do tamanho de grão. Zhang et al. [17] sugeriu que contornos de grão atuam facilitando a passivação reduzindo a taxa de corrosão. Outro estudo [20] indicou ainda que uma possível alternativa para reduzir a taxa de corrosão é reduzir o tamanho de grão. Em resumo, ligas de magnésio com grãos mais refinados apresentaram menor densidade de corrente de corrosão que foram associadas à maior facilidade na formação da camada de produtos de corrosão

que oferece maior proteção à difusão de íons agressivos na superfície do eletrodo de trabalho [20]. Neste estudo, as amostras que foram expostas a menores tempos de envelhecimento e conseqüentemente apresentaram menores tamanhos de grãos apresentaram menor taxa de corrosão, concordando com os resultados mostrados na literatura citada, onde é sugerido que o contorno de grão pode atuar como barreira para a corrosão. Pode-se notar também que o E_{pite} alcançou valores mais negativos com o aumento do tempo de envelhecimento, aproximando-se do E_{corr} . De acordo com Lillard et al.[15] esta aproximação ao E_{corr} pode ser interpretada como maior suscetibilidade da amostra sofrer corrosão e ainda que a corrosão localizada ou o pite inicia apenas em potenciais relativamente anódicos ao E_{ocp} .

Ainda observando a Tabela 2 é evidente o aumento da taxa de corrosão TC com o aumento do tempo de envelhecimento ou aumento do tamanho do grão. Este aumento está em concordância com estudos que apontam menores TC para amostras da liga de magnésio AZ31 com grãos mais refinados [16].

Tabela 2. Valores Indicativos da Corrosão para Amostras da Liga de Magnésio AZ31.

	E_{ocp} (V)	E_{corr} (V)	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	E_{pite} (V)	TC (mm/ano)
Amostra 1	-1,5535 +/- 0,0046	-1,4870 +/- 0,0109	1,44E+02 +/- 3,54	-1,4250 +/- 0,0126	3,3036
Amostra 2	-1,5258 +/- 0,0430	-1,4680 +/- 0,0420	1,07E+02 +/- 9,90	-1,3970 +/- 0,0210	2,4736
Amostra 3	-1,5379 +/- 0,0148	-1,4750 +/- 0,0220	1,40E+02 +/- 3,82	-1,4000 +/- 0,0140	3,2230
Amostra 4	-1,5418 +/- 0,0115	-1,4810 +/- 0,0110	2,48E+02 +/- 4,24	-1,4260 +/- 0,0390	5,7093

3 CONCLUSÃO

De forma específica, neste estudo pode-se elencar algumas conclusões a respeito das análises realizadas:

a) A microestrutura do material como recebido apresentou distribuição heterogênea de grãos, regiões de grãos de α -Mg refinados pela ocorrência de fenômenos de recristalização localizados com tamanho médio do grão de 14,09 μm , e outras regiões não recristalizadas de tamanho médio de grão de 120 μm que mantiveram os grãos alongados característicos do processo de laminação.

b) Foi observado em todas as amostras uma grande presença de precipitados dispersos pela matriz. Pelo resultado da análise por EDS acredita-se tratar de precipitados de Mg-Al.

c) Após os tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento houve homogeneização da microestrutura. Com o aumento do tempo de envelhecimento houve também aumento no tamanho médio dos grãos. A amostra solubilizada mostrou uma forte presença de maclas, que pode ter sido induzida pelo próprio tratamento térmico. As amostras envelhecidas também apresentaram maclas, porém mais dispersas na matriz.

d) Os valores médios de dureza aumentaram com o tempo de envelhecimento da liga. A amostra 1 que foi submetida apenas à solubilização à 440°C por 24 horas apresentou o maior valor de dureza dentre as amostras tratadas termicamente (39,85 HV).

- e) Os valores de potencial em circuito aberto E_{ocp} apresentados estão de acordo com a literatura, em torno de $-1,50$ V. Os valores de E_{ocp} foram tanto menores quanto maior o tempo de envelhecimento da liga. Nos primeiros instantes a curva do E_{ocp} ao longo do tempo mostrou tendência para potenciais mais nobres e após alguns segundos de exposição à solução de 3,5% de NaCl o E_{ocp} decaiu tendendo para valores mais negativos. Este aumento inicial pode ser atribuído à dissolução do Mg, que favorece a produção de íons de OH, como resultado da formação de gás de hidrogênio da reação catódica.
- f) As amostras tiveram comportamento semelhante quanto ao perfil das curvas de polarização cíclica, indicando tendência à corrosão localizada ou por pites evidenciada pelo sentido da curva após a inversão do potencial de varredura.
- g) O potencial de corrosão tornou-se mais negativo com o aumento do tamanho do grão, causado por maiores tempos de exposição ao envelhecimento. A densidade de corrente foi instensa nas amostras de maior tamanho de grão. Assim, O E_{corr} e o i_{corr} mostraram que quanto maior o tamanho do grão maior a suscetibilidade de ocorrer corrosão.
- h) O potencial de pite foi mais positivo nas amostras de menor tamanho de grão, sugerindo que grãos mais refinados apresentam maior resistência à corrosão localizada.
- i) A taxa de corrosão também confirmou os dados citados anteriormente, sendo maior quanto maior o tamanho do grão.

Agradecimentos

Agradecemos a CAPES pela concessão de bolsa de estudos de 2016 a 2018.

REFERÊNCIAS

- 1 F.H. Cao, V.H. Len, Z. Zhang, V.H. Zhang, X. Zhang, Russ. J. Electrochem. 43 (2007) 837 e 843
- 2 Y.L. Chang, T.W. Qin, H.M. Wang, Z. Zhang, Trans. Nonferr. Met. Soc.China 19 (2005) 517e524.
- 3 WATAN et al., 2004) Cui-ju Wang, Kun-kun Deng, Kai-boNie, Shuan-jun Shang, WeiLiang.Competition behavior of the strengthening effects in as-extruded AZ91 matrix: Influence of pre-existed Mg 17 Al 12 phase. Materials Science & Engineering, Vol. A656, 2016.
- 4 ASTM E92 – 82. Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials, 1997.
- 5 Souza, S. A. Desenvolvimento Numérico e Experimental de Rotas de Conformação via Laminação Assimétrica e Posterior Revestimento da Liga de Mg AZ31 [Dissertação de Mestrado]. Volta Redonda: Universidade Federal Fluminense, 2016.
- 6 Silva, R. R. Evolução microestrutural de ligas de magnésio AZ31 com adição de cério e cálcio [Trabalho de Graduação]. Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.
- 7 ASTM E112 – 12. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, 2013.
- 8 Diquing Wan et al. Precipitation and responding damping behavior of heat-treated AZ31 magnesium alloy. Acta Metall. Sin., v.22, 1 – 6, 2009.
- 9 Cu Ju Wang et al. Competition behavior of the strengthening effects in as extruded AZ91 matrix: Influence of pre-existed $Mg_{17}Al_{12}$ phase. Materials & Science Engineering, v. 656, 102 – 110, 2016.

- 10 Izumi S, Yamasaki M, Kawamura Y. Relation between corrosion behavior and microstructure of Mg-Zn-Y alloys prepared by rapid solidification at various cooling rates. *Corrosion Science*, v. 51 , 395 – 402, 2009.
- 11 ASTM G102 – 89. Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements, 1994.
- 12 StikaStráská et al. Microstructure stability of ultra-fined grained magnesium alloy AZ31 processed by extrusion and equal-channel angular pressing (EX-ECAP). *Material Characterization*, v. 94, 69 – 79, 2014.
- 13 Catorceno, C. L. L. Estudo do encruamento, recristalização e crescimento de grão]. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.
- 14 S.H. Avner. Introduction to Physical Metallurgy, Mc Graw-Hill Book Co., Singapore, 1974.
- 15 S. Pawar et al. Crystallographic effects on the corrosion of twin roll cast AZ31 Mg alloy sheet. *Acta Materialia*, v. 133, 90 – 99, 2017.
- 16 Bin Jiang et al. Influence of crystallographic texture and grain size on the corrosion behavior of as-extruded Mg alloy AZ31 sheets. *Corrosion Science*, v. 126, 174 – 180, 2017.
- 17 Li T, Zhang H, He Y, Wang X. Comparison of corrosion behavior of Mg–1.5Zn–0.6Zr and AZ91D alloys in a NaCl solution. *Materials Corrosion*, v.66, 7 – 15, 2015.
- 18 M.C. Zhao, M. Liu, G.L. Song, A. Atrens, Influence of pH and chloride ion concentration on the corrosion of Mg alloy ZE41, *Corrosion Science*, v. 50, 3168 – 3178, 2008.
- 19 Sabariz, A. Estudo da corrosão eletroquímica em ligas de magnésio AM50 e AM60 fundidas sob pressão [Trabalho de Pós Graduação]. São João Del Rei: Universidade Federal de São João Del Rei, 2010.
- 20 M. Alvarez Lopez. Corrosion behavior of AZ31 magnesium alloy with different grain sizes in simulated biological fluids. *Acta Biomaterialia*, v.6, 1763 – 1771, 2010.
- 21 F. Pan, Q. Wang, B. Jiang, J. He, Y. Chai, J. Xu. An effective approach called the composite extrusion to improve the mechanical properties of AZ31 magnesium alloy sheets. *Material Science Engineering*, v. 655, 339 – 345, 2016.
- 22 G.L. Song, Raja Mishra, Z.Q. Xu. Crystallographic orientation and electrochemical activity of AZ31 Mg alloy. *Electrochemical Community*, v. 12, 1009–1012, 2010.
- 23 T. Zhang, Y. Shao, G. Meng, Z. Cui, F. Wang. Corrosion of hot extrusion AZ91 magnesium alloy: i-relation between the microstructure and corrosion behavior. *Corrosion Science*, v. 53, 1960 – 1968, 2011.