

# EFEITO DA SOLUBILIZAÇÃO E ENVELHECIMENTO NA MICROESTRUTURA E RESISTÊNCIA A CORROSÃO DA LIGA DE MAGNÉSIO AZ31

Camila Queiroz Correia Fernandes<sup>1</sup>

José Adilson de Castro<sup>2</sup>

Elivelton Alves Ferreira<sup>2</sup>

Darlene Souza da Silva Almeida<sup>2</sup>

Leonardo Martins da Silva<sup>2</sup>

## Resumo

Este trabalho 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 três amostras foram envelhecidas a 220 °C; por 2, 6 e 12 horas, respectivamente. Foram realizadas análises microestruturais com a finalidade de compreender as alterações microestruturais advindas dos tratamentos térmicos realizados. As amostras foram submetidas ao ensaio de polarização cíclica com a finalidade de correlacionar o efeito das mudanças alcançadas pelos tratamentos térmicos na resistência à corrosão da liga de magnésio AZ31. O comportamento das curvas de polarização cíclica foi semelhante para todas as amostras, sugerindo tendência a corrosão por pite. Não houve variação significativa nos valores de potencial de corrosão, sugerindo que os tratamentos térmicos aplicados não influenciaram a resistência a corrosão da liga.

**Palavra-chave:** Liga de magnésio; AZ31; Corrosão; Polarização cíclica.

## COMPARATIVE BEHAVIOR OF MAGNESIUM ALLOY AZ31 BY CYCLIC POLARIZATION TEST

### Abstract

This work presents a comparative study between the corrosion resistance of the magnesium alloy AZ31 treated by solubilization and aging at different times, submitted to the cyclic polarization test in 3.5% NaCl solution. Four samples were solubilized at 440 °C for 24 hours. After solubilization, three samples were aged at 220 °C; one for 2 hours, another for 6 hours and a third for 12 hours. Microstructural analysis were 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. The cyclic polarization presents curves with similar behavior for the samples, indicating propensity to pitting corrosion. There were no significant variation in the values of corrosion potential, suggesting that the heat treatments applied did not influenced the corrosion resistance of the alloy.

**Keywords:** Magnesium Alloy; AZ31; Corrosion resistance; Cyclic polarization.

## I INTRODUÇÃO

O magnésio e suas ligas têm sido apontados como alternativa para satisfazer exigências de indústrias que buscam constantemente por materiais que possuam ótima resistência mecânica e baixo peso, apresentando assim grande potencial em substituição aos aços e ligas de

alumínio amplamente utilizadas em indústrias de transporte como automobilísticas e aeronáuticas. As ligas de magnésio possuem menor densidade (aproximadamente 1,74 g/cm<sup>3</sup>) quando comparadas às ligas mais comuns utilizadas para a fabricação de elementos estruturais [1]. Contudo, apesar

<sup>1</sup>Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense – UFF, Volta Redonda, RJ, Brasil. E-mail: caqueirozc@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal Fluminense – UFF, Volta Redonda, RJ, Brasil.



de seu grande potencial, as ligas deste grupo ainda não são amplamente utilizadas principalmente devido a sua baixa resistência a corrosão.

As primeiras ligas comercializadas de magnésio foram as com os elementos Al e Zn como elementos de liga e o sistema Mg-Al-Zn se mantém como o mais amplamente usado. As ligas AZ31 (3% de Al, 1% de Zn e 0,3% de Mn) são vastamente usadas devido ao fato de oferecerem uma boa combinação de maleabilidade, ductilidade e resistência à corrosão [2].

Em um estudo Cao et al. [3] investigaram o comportamento de corrosão da liga de Mg AZ91 em solução de NaCl 0,1 M usando técnicas eletroquímicas e observaram uma natureza altamente corrosiva da liga AZ91 em comparação com o metal Mg. Chang et al. [4] estudaram a influência de elementos de liga como Zr e 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.

As ligas de magnésio para o uso como implantes biodegradáveis vêm sendo bastante pesquisadas [5-7]. As caracterizações envolvem imersão em solução que simula o meio fisiológico ou a simulação em fluidos do corpo tipicamente a 37 °C favorecendo a produção de filmes óxidos protetivos [8].

A liga AZ91D foi imersa em solução com 3,5% de NaCl a temperatura ambiente por tempos na faixa de 1 minuto à 72 horas. A corrosão iniciou-se nos limites de grãos dos microconstituintes do eutético e, então, propagou-se através dos grãos alfa primários. Foi observado que a fase beta menos severamente atacadas [9].

Nos tratamentos térmicos das ligas de magnésio, geralmente aplicados com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas da liga, 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  $\alpha$  - 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 acarretar considerável endurecimento, mas torna a liga novamente suscetível à corrosão devido a estas fases terem alto potencial de oxidação [7-10].

Tsao [11] realizou estudos de resistência à corrosão da liga AZ31 depois de realizado o seguinte tratamento térmico: 1) aquecimento a 420 °C por 12 h sob vácuo para dissolver a fase beta  $Mg_{17}Al_{12}$ ; 2) resfriamento brusco da liga até a temperatura ambiente; 3) envelhecida a 210 °C

por 5h e 30 min. Devido provavelmente as dimensões dos precipitados da fase beta, não foi possível visualizar por microscopia óptica a formação desta fase. Neste trabalho foi mostrado que o desaparecimento das maclas depois do envelhecimento a 210 °C por 5h e 30 min melhorou significativamente a resistência à corrosão diminuindo a tendência de formação de pites e a densidade de corrente de corrosão em solução de NaCl 3,5% (m/m). Levando se em conta que o tempo de envelhecimento na temperatura de 210 °C pode proporcionar aumento da resistência à corrosão, foi proposto neste trabalho avaliar o efeito do tratamento térmico a partir da solubilização da amostra em 440 °C por 24 h e o envelhecimento em 220 °C por 4, 6 e 12 horas. Portanto, este estudo visa através da polarização cíclica obter dados que permitam fazer uma caracterização do comportamento da corrosão da liga de magnésio AZ31 assim como uma correlação entre as diferenças microestruturais geradas pelos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento realizados.

## 2 METODOLOGIA

O objeto de estudo é a liga de magnésio AZ31, que contém 3% de alumínio e 1% de zinco, fornecida pela importadora Zincomag na forma de chapa laminada com superfície previamente polida a 800 Mesh. A composição química da liga assim como alguns valores de propriedades mecânicas foi fornecida pelo fabricante e estão apresentadas na Tabela 1 e Tabela 2, respectivamente.

Quatro amostras da chapa recebida foram cortadas na dimensão de 50x50x4 mm e submetidas aos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento. As amostras foram solubilizadas a 440 °C por 24 horas e posteriormente três dessas amostras foram envelhecidas a 220 °C por 4, 6 e 12 horas. O resfriamento após solubilização e após o envelhecimento foi feito em água. Após os tratamentos térmicos as amostras foram lixadas e polidas; as lixas são de SiC de grana 320 a 2500 mesh, e para polimento sílica coloidal de 0,04  $\mu m$ .

Para análise microestrutural após polimento as amostras foram 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 a microestrutura predominante, tamanho de grão e presença de fases secundárias possivelmente presentes. As análises via microscopia óptica foram realizadas com o auxílio dos microscópios ópticos Olympus e Nikon LV150. As medidas de tamanho de grão foram realizadas com auxílio de um perfilômetro baseando na norma ASTM E112.

**Tabela 1.** Composição química da chapa da liga AZ31

Elemento	Al	Zn	Mn	Fe	Cu	Ni	Si	Ca	Mg	Outras Impurezas
Peso, %	2,5 - 3,5	0,6 - 1,4	0,2 - 1,0	0,003 (máx)	0,01 (máx)	0,001 (máx)	0,08 (máx)	0,04 (mpax)	Balanço	0,30 (máx)

A microdureza foi medida com o auxílio do microdurômetro automático Shimadzu HVM-2. Para condução dos testes foi utilizada uma carga de 980 mN aplicada durante 13 segundos. Dez identificações foram realizadas em cada amostra da seção transversal da chapa e um intervalo de 95% de confiança foi obtido por meio da equação 1.

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

Onde  $\sigma$  é o desvio padrão e  $n$  é o número de medidas realizadas. 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<sup>2</sup>, contra eletrodo auxiliar de platina de área de 2 cm<sup>2</sup> e eletrodo de referência de prata/cloreto de prata. As medidas foram feitas pelo potenciostato modelo EmSat acoplado ao software OS Trace 4.2. A variação do potencial em circuito aberto ao longo do tempo das amostras em análise foi monitorada por 30 minutos. A curva de Tafel foi determinada a partir da polarização cíclica após a medida do

potencial em circuito aberto, sob ajuste de taxa potencial de varrição de 1 mV/s, iniciando a -150 mV do potencial em circuito aberto até +150 mV acima deste mesmo potencial. Todas as medidas foram realizadas em solução aerada em estado estático. A solução utilizada foi 3,5% NaCl de pH 7, preparada com água deionizada a temperatura ambiente.

A taxa de corrosão TC foi calculada a partir das equações 2 e 3 de acordo com a norma ASTM G102 [12].

$$EW = \sum I / (ni f i / w_i) \quad (2)$$

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.

$$TC = (k \times i_{corr} \times EW) / \rho \quad (3)$$

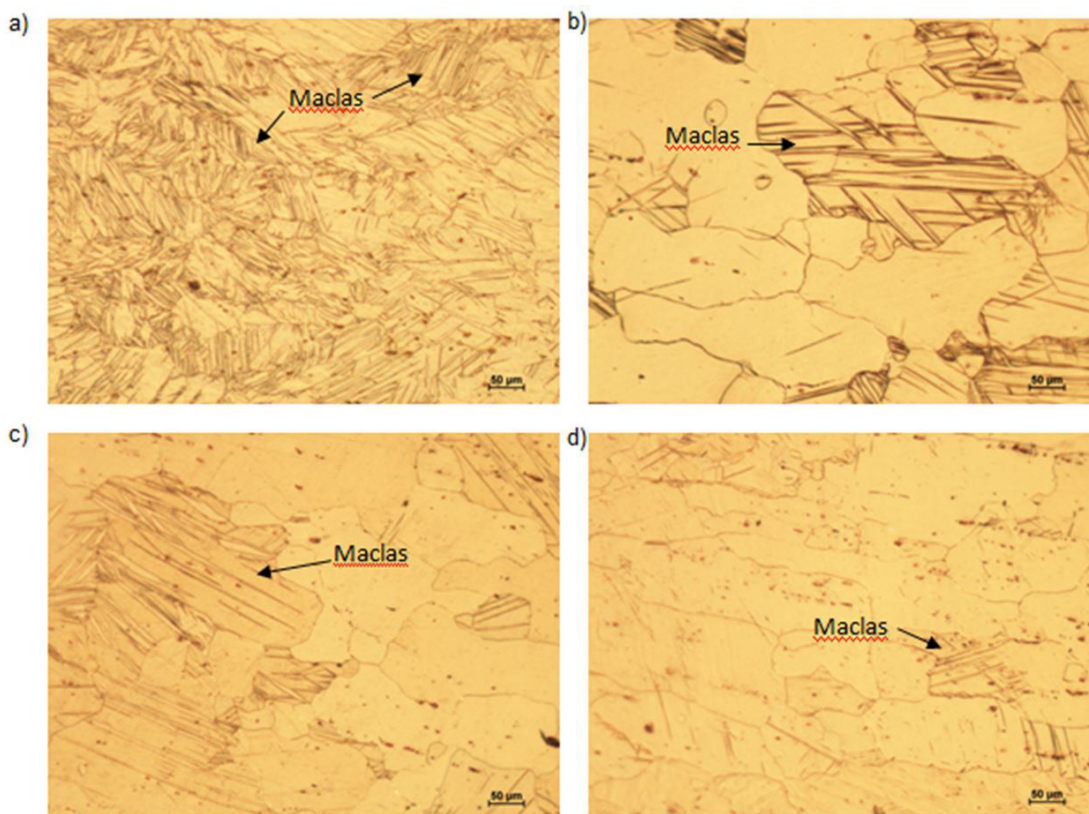
Onde  $k$  é 0,00327 para obter valores em mm/ano,  $i_{corr}$  a densidade de corrosão, e  $\rho$  a densidade da liga.

### 3 RESULTADOS

A Figura 1 apresenta a evolução da microestrutura da liga com relação aos tratamentos térmicos realizados. O tamanho de grão medido para cada amostra assim como os valores de microdureza estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 2.** Propriedades Mecânicas da chapa da Liga AZ31

<b>Limite de Resistência (Mpa)</b>	270
<b>Limite de Escoamento (Mpa)</b>	180
<b>Alongamento (%)</b>	15

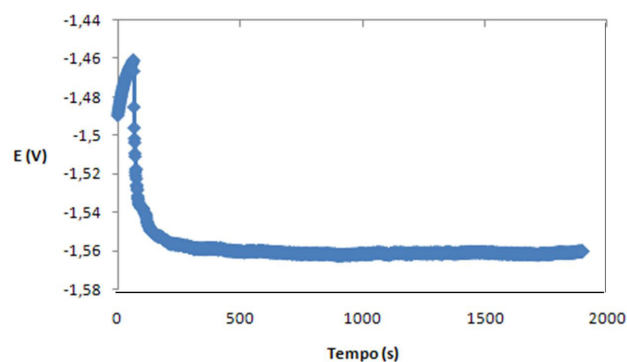


**Figura 1.** Micrografias da seção longitudinal da liga de magnésio AZ31 (Aumento de 100x); a) Amostra 1 solubilizada por 24h a 440 °C; b) Amostra 2 solubilizada e envelhecida por 4h a 220 °C; c) Amostra 3 solubilizada e envelhecida por 6h a 220 °C; d) Amostra 4 solubilizada e envelhecida por 12h a 220 °C.

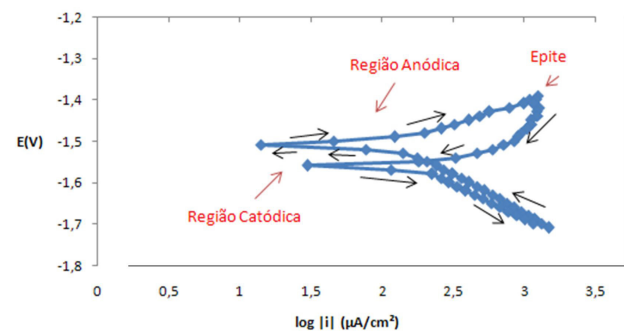
Na figura 2 é mostrado o potencial em circuito aberto (Open Circuit Potential - Ocp) para a amostra 2. Pode ser observado um aumento do potencial em circuito aberto nos primeiros segundos e depois o decaimento exponencial do potencial até ficar constante com o tempo de imersão em solução indicando que o processo corrosivo atingiu o estado estacionário. Foram encontrados resultados similares de potencial em circuito aberto vs. tempo para as outras amostras. A partir deste potencial em circuito aberto foram realizados os ensaios de curvas de polarização cíclicas.

**Tabela 3.** Evolução da Microdureza e Tamanho de Grão da Liga Tratada Termicamente

	Microdureza (HV)	Tamanho de Grão ( $\mu\text{m}$ )
<b>Amostra 2</b>	31,42 +/- 4,22	12,09 +/- 2,92
<b>Amostra 3</b>	33,40 +/- 7,11	12,25 +/- 2,46
<b>Amostra 4</b>	37,55 +/- 5,73	26,39 +/- 7,47



**Figura 2.** Medida do Potencial em Circuito aberto versus Tempo da amostra 2 imersa em solução de NaCl 3,5%.



**Figura 3.** Curva de Polarização Cíclica da amostra 2 imersa em solução de NaCl 3,5%.

**Tabela 4.** Parâmetros de Corrosão para Amostras da Liga AZ31

	Ocp (mV)	Ecorr (mV)	Epíte (mV)	TC (mm/ano)	icorr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
<b>Amostra 1</b>	-1555,00	-1482,00	-1400,00	3,18	1,38E+02
<b>Amostra 2</b>	-1556,00	-1505,00	-1390,00	2,56	1,11E+02
<b>Amostra 3</b>	-1561,00	-1511,00	-1400,00	1,86	8,06E+01
<b>Amostra 4</b>	-1560,00	-1470,00	-1360,00	1,01	4,41E+01

Na figura 3 é mostra a curva de polarização cíclica para a amostra 2. Os comportamentos das curvas de polarização das outras amostras foram também similares ao da amostra 2.

A partir dos dados obtidos pelo gráfico do Ocp e das curvas de polarização obteve-se pela extrapolação de Tafel os parâmetros de corrosão apresentados na Tabela 4.

## 4 DISCUSSÃO

Na Figura 1a é observada, após o tratamento de solubilização a 440 °C por 24 horas, uma solução sólida supersaturada com grande presença de maclas que podem ter sido induzidas pelo próprio tratamento térmico [13]. Como a composição da liga AZ31 é semelhante à AZ91, é relatado que o processo de precipitação do AZ31 envelhecido é semelhante à liga AZ91 e o precipitado predominante é a fase  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  [10,14]. De acordo com o diagrama de fase deste sistema [15] provavelmente os constituintes são formados por meio dos tratamentos realizados, entretanto estes precipitados são muito finos e em proporções pequenas impossibilitando identificá-los por meio de microscopia óptica. Wan et al. [10], usando tratamentos térmicos similares conseguiram visualizar estas estruturas apenas através de SEM devido as dimensões de tais fases.

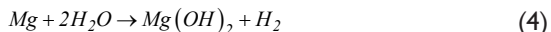
As Figuras 1b-1d apresentam as microestruturas da liga de magnésio AZ31 envelhecida, que foram mantidas a 220 °C por 4, 6 e 12 h, respectivamente. Nestas micrografias é observada a presença de maclas, porém mais dispersas na matriz, e o aumento do tamanho de grão na amostra envelhecida a 220° em função do tempo de envelhecimento.

Devido as dimensões da fase  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ , ela não pode ser detecta. Mesmo assim o aumento da microdureza da liga (tabela 3) em função do tempo de envelhecimento pode estar correlacionado com uma maior presença desta fase. Ainda de acordo com Wan et al. [10] durante o processo de envelhecimento, o  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  inicialmente precipita no contorno de grão. Com o aumento do tempo de envelhecimento, a fração volumétrica da precipitação continua a aumentar e a precipitação ocorre do interior dos grãos até os contornos. Além disso, de acordo com a literatura [16] a fase  $\beta$  melhora a resistência mecânica e a dureza da liga.

De acordo com os estudos anteriores [6,7,9,17], a presença de fase  $\beta$  aumenta a diferença de potencial que é responsável pela geração de células galvânicas locais, favorecendo a corrosão. Diferentes reações podem estar



envolvidas na corrosão das ligas de magnésio. A reação geral pode ser expressa pela equação 4 [6]:



Contudo, esta reação não explica todos os estágios envolvidos no fenômeno da corrosão deste metal. A suscetibilidade à corrosão das ligas de magnésio está associada à natureza do filme de óxido naturalmente formado presente nas suas superfícies e também relacionado aos elementos de liga catódicos presentes em sua matriz. Na liga Mg-Al-Zn o Al e Zn são os principais elementos catódicos que determinam a corrosão das ligas.

Com relação ao potencial em circuito aberto apresentado na Figura 2, todas as amostras apresentaram perfil praticamente idênticos, demonstrando no início do monitoramento um deslocamento para valores mais negativos de potencial tendendo à estabilização após 30 minutos de exposição à solução de 3,5% de NaCl.

A curva de polarização cíclica mostrada na Figura 3 representa a relação entre o potencial de eletrodo aplicado e a corrente correspondente medida no potenciostato. Esta curva de polarização não é mais representativa de apenas uma única reação, mas sim do efeito global de todas as reações que ocorrem simultaneamente sobre o eletrodo [18]. Devido ao perfil das curvas terem sido semelhantes, apenas uma delas foi utilizada para representar as demais. Contudo, a Tabela 4 apresenta os valores para cada amostra obtidos através dessas curvas.

Observa-se pela Figura 3 que as amostras apresentaram tendência a corrosão por pite, pois após a inversão do potencial a corrente de corrosão diminuiu. As regiões anódicas e catódicas, assim como o ponto onde se identifica o Epite estão indicados na curva.

Avaliando a Tabela 4, percebe-se que não houve considerável variação entre os valores de  $E_{\text{corr}}$  para cada amostra. Logo, os tratamentos térmicos realizados não influenciaram na resistência a corrosão da liga. Na mesma tabela, pode ser visto que a densidade de corrente de corrosão decresce com o aumento do tempo de envelhecimento da liga. Isto tem correlação com os valores apresentados de taxa de corrosão, que também diminui com o aumento do tempo do tratamento térmico.

## REFERÊNCIA

- 1 Thirumalaikumarasamy D, Shanmugam K, Balasubramanian V. Comparison of the corrosion behaviour of AZ31B magnesium alloy under immersion test and potentiodynamic polarization test in NaCl solution. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2014 [acesso em 12 dec. 2018];2:1-49. Disponível em: [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213956714000139](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213956714000139).
- 2 Revie RW. *Uhlig's corrosion handbook*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 2000.
- 3 Cao FH, Len VH, Zhang Z, Zhang VH, Zhang X. Corrosion behavior of magnesium and its alloy in NaCl solution. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2007 [acesso em 12 dec. 2018];43:837-843. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1023193507070142>.

## 5 CONCLUSÃO

- Na análise da microestrutura observou-se a presença de maclas em todas as amostras estudadas, havendo presença mais acentuada na amostra solubilizada por 24 horas a 440 °C. Não foi possível evidenciar a presença da fase  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  por microscopia ótica.
- Houve aumento do tamanho de grão na amostra envelhecida a 220° por 12 horas com relação às amostras envelhecidas por 4 e 6 horas.
- A medida de microdureza apresentou valores similares nas amostras envelhecidas a 220 °C por 4 e 6 horas. Houve um pequeno aumento na microdureza da amostra envelhecida por 12 horas na mesma temperatura. A presença da fase  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  pode causar aumento da dureza da liga de magnésio.
- Todas as amostras apresentaram tendência a corroer por meio de pite.
- Houve correlação entre os valores  $O_{\text{cp}}$  e  $E_{\text{corr}}$  medidos para cada amostra, não ocorrendo variação significativa entre si, o que indica que os tratamentos térmicos realizados não interferiram na resistência a corrosão da liga.
- Observou que a taxa de corrosão diminuiu com o aumento do tempo de envelhecimento. Este decréscimo deve-se a diminuição da densidade de corrosão com o aumento dos tempos de envelhecimento das amostras estudadas.

## Agradecimentos

Agradeço imensamente a todos que participaram dos desafios advindos da realização deste trabalho e por tudo que tenho conquistado até então.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da UFF (PPGEM-UFF).

À CAPES pela concessão de bolsa de estudos (2017-2018).

- 4 Chang YL, Qin TW, Wang HM, Zhang Z, editors. Comparison of corrosion behaviors of AZ31, AZ91, AM60 and ZK60 magnesium alloys. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2009 [acesso em 12 dec. 2018]: 19:517-524. Disponível em: [www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1003632608603052](http://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1003632608603052).
- 5 Agarwal S, Curtin J, Duffy B, Jaiswa LS. Biodegradable magnesium alloys for orthopaedic applications: A review on corrosion, biocompatibility and surface modifications. Materials Science and Engineering C. 2016 [acesso em 13 dec. 2018];68:948-963. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642517300506>.
- 6 Esmaily M, Svensson JE, Fajardo S, Birbilis N, Frankel GS, Virtanen S, et al. Fundamentals and advances in magnesium alloy corrosion. Progress in Materials Science. 2017 [acesso em 13 dec. 2018];89:92-193. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642517300506>.
- 7 Tan L, Dong J, Chen J, Yang K. Development of magnesium alloys for biomedical applications: structure, process to property relationship. Materials Technology. 2018 [acesso em 13 dec. 2018];33:235-243. <http://dx.doi.org/10.1080/10667857.2017.1405890>.
- 8 Ghoneim AA, Fekry AM, Ameer MA. Electrochemical behavior of magnesium alloys as biodegradable materials in Hank's solution. Electrochimica Acta. 2010 [acesso em 13 dec. 2018];55:6028-6035. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001346861000753X>
- 9 Pinela VM, Oliveira LA, Oliveira MCL, Antunes RA. Study of the Corrosion Process of AZ91D Magnesium Alloy during the First Hours of Immersion in 3.5 wt.% NaCl Solution. International Journal of Corrosion. 2018 [acesso em 13 dec. 2018];2018. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/ijc/2018/8785154/>
- 10 Wan D, Wang J, Wang G, Lin L, Feng Z, Yang G. Precipitation and responding damping behavior of heat-treated AZ31 magnesium alloy. Chin Shu Hsueh Pao. 2009 [acesso em 12 dec. 2018];22:1-6. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1006719108600630>.
- 11 Tsao LC. Stress-corrosion cracking susceptibility of AZ31 alloy after varied heat-treatment in 3.5 wt.% NaCl solution. International Journal of Materials Research. 2010 [acesso em 12 dec. 2018];101:9. Disponível em: <https://www.hanser-elibrary.com/doi/abs/10.3139/146.110394>.
- 12 American Society for Testing and Materials. ASTM G102 – 89: Standard practice for calculation of corrosion rate and related information from electrochemical measurements. ASTM International: West Conshohocken
- 13 Singh IB, Singh M, Das S. A comparative corrosion behavior of Mg, AZ31 and AZ91 alloys in 3.5%. J. Magnesium Alloy. 2015 [acesso em 12 dec. 2018];3:141-147. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221395671500016X>.
- 14 Stráská J, Janečka M, Čížek J, Stráská J, Hadzima B. Microstructure stability of ultra-fine grained magnesium alloy AZ31 processed by extrusion and equal-channel angular pressing (EX-ECAP). Materials Characterization. 2014 [acesso em 12 dec. 2018];94:69-79. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044580314001570>.
- 15 ASM Handbook committee. Alloy Phase Diagrams, ASM International, 2016.
- 16 Wang C, Deng K, Nie K, Shang S, Liang W. Competition behavior of the strengthening effects in as-extruded AZ91 matrix: Influence of pre-existed Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> phase. Materials Science and Engineering A. 2016 [acesso em 12 dec. 2018];A656:102-110. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509316300235>.
- 17 Song GL, Atrens A, Dargusch M. Influence of microstructure on the corrosion of diecast AZ91D. Corrosion Science. 1999 [acesso em 12 dec. 2018];41:249-273. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X98001218>.
- 18 Kleiner S, Uggowitzer PJ. Mechanical Anisotropy of Extruded Mg - 6% Al - 1% Zn Alloy. Materials Science and Engineering A. 2004 [acesso em 12 dec. 2018];379:258-263. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509304001893>

Recebido em: 15 Dez. 2018

Aceito em: 27 Fev. 2019