

# RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE LATAS DE ALUMÍNIO EM CONTATO COM CERVEJA

Luiza Esteves<sup>1</sup>

Eric Marsalha Garcia<sup>2</sup>

Maria das Mercês Reis de Castro<sup>3</sup>

Vanessa de Freitas Cunha Lins<sup>3</sup>

## Resumo

Latas de alumínio com revestimento orgânico são usadas no Brasil como embalagem para bebidas carbonatadas (refrigerantes, cerveja), que agem como soluções eletrolíticas. Estes eletrólitos, em contato com o interior da lata metálica, iniciam o processo corrosivo do alumínio. A presença de íons metálicos pode mudar o sabor da bebida, comprometendo a qualidade do produto. Este trabalho objetiva avaliar a resistência à corrosão do alumínio em meio de cerveja usando a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE). A microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foram usadas para avaliar a superfície metálica. Dois lotes de diferentes espessuras de revestimento orgânico foram analisados para a mesma data de fabricação. A resistência do eletrólito e a resistência à transferência de carga do alumínio na cerveja variaram dependendo do lote analisado.

**Palavras-chave:** Latas de alumínio; Cerveja; Corrosão; Espectroscopia de impedância eletroquímica.

## CORROSION RESISTANCE OF ALUMINUM CANS IN CONTACT WITH BEER

### Abstract

Aluminum cans with an organic coating are used in Brazil as packaging for carbonated beverages (soft drinks, beer), which act as electrolyte solutions. These electrolytes, in contact with the inner metal can, initiate a corrosion process of aluminum. The presence of metallic ions can change the flavor of the beverage, compromising the product quality. This work aims to evaluate the corrosion resistance of aluminum in beer environment using the technique of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS). The Scanning Electron Microscopy (SEM) and the Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) were used to evaluate the metal surface. Two batches with different coating thickness were analyzed for the same date of manufacture. The electrolyte resistance and the aluminum charge transfer resistance in beer varied depending on the batch analyzed.

**Keywords:** Aluminum cans; Beer; Corrosion; Electrochemical impedance spectroscopy (EIS).

## I INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o mercado de bebidas no Brasil foi alterado pela introdução de embalagens mais modernas. Inicialmente, os recipientes para o armazenamento de bebidas carbonatadas eram fabricados com vidro. A seguir, foi introduzida a embalagem de PET (politereftalato de etileno) além das latas de aço estanhado (folha de flandres) e de alumínio.

O Brasil se situa entre os quatro maiores fabricantes de cerveja [1] do mundo, com um volume anual superior a 10 bilhões de litros. Em 2007, o faturamento bruto registrado pelas cervejarias foi de aproximadamente R\$ 20 bilhões. O setor emprega mais de 150 mil pessoas,

direta ou indiretamente. A participação da cerveja na arrecadação dos tributos indiretos é a maior entre todos os setores da economia dedicados à produção de bens de consumo: 5,1% [2].

No caso dos refrigerantes, o consumo de bebidas em latas já representa 9,85% do volume total consumido no país. Números fornecidos pela Associação Brasileira das Indústrias de Refrigerantes e Bebidas não alcoólicas (ABIR) mostram que esse percentual é ainda maior nas regiões nordeste (11,4%) e sudeste (10,7%). As vendas de refrigerantes em lata em 2011 cresceram 11,8% no nordeste e 6,2% no centro-oeste do Brasil [3].

<sup>1</sup>Mestrado, Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: luizaeq@yahoo.com.br

<sup>2</sup>Doutorado, Universidade Federal de São João Del Rey – UFSJ, São João Del Rey, MG, Brasil. E-mail: ericmgmg@hotmail.com

<sup>3</sup>Doutorado, Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

E-mail: deia@deq.ufmg.br; vlins@deq.ufmg.br

Uma maneira de se avaliar o desempenho das embalagens metálicas seria a realização do estudo de *shelf-life* [4] ou “vida de prateleira”, ou seja, vida útil da embalagem envasada com o produto em questão, nas condições reais de uso, ainda hoje a análise mais utilizada pela indústria alimentícia. Porém, o inconveniente seria a necessidade de um período de tempo longo de estudo e de grande quantidade de amostras para obtenção de resultados confiáveis. Este método é inviável para a aplicação na indústria que requer avaliação rápida do desempenho do produto [5]. Assim, outras técnicas de avaliação do desempenho das embalagens metálicas são utilizadas. A literatura relata o monitoramento de liberação de estanho e ferro induzida por corrosão da embalagem usando-se um espectrômetro de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) e um sensor eletroquímico [6].

A técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) é relativamente rápida, reprodutível, não destrutiva, confiável e pode fornecer informações acerca do mecanismo de corrosão da embalagem metálica em contato com o seu eletrólito, ou seja, o produto envasado [7-9].

A camada de verniz aplicada de forma uniforme no interior da lata é capaz de promover uma barreira para que o eletrólito não interaja com o metal base. Porém, a penetração do eletrólito na camada de verniz provoca a diminuição da resistência, e, por sua vez, um aumento da capacitância do material. A degradação da camada orgânica em contato com a bebida ocasiona um aumento das áreas ativas do metal [7].

Na literatura, é relatada a avaliação da eficácia do envernizamento de latas de bebidas, utilizando um sistema fabricado pela ZahnerElektrik (Alemanha). Os espectros de impedância na faixa de frequência de 1 kHz a 1 Hz foram obtidos para as latas tomadas como célula eletroquímica e eletrodo de trabalho ao mesmo tempo e seu conteúdo (cerveja) como eletrólito. Do espectro obtido, o ângulo de fase a 1 Hz foi tomado como indicação da atividade de corrosão (desvio de  $-90^\circ$  - normal em direção a  $0^\circ$  - crítico, indicando um comportamento ôhmico) [10]. Há relato da utilização do microscópio eletroquímico de varredura com corrente alternada (AC-SECM) para avaliação da integridade da interface sólido-líquido de latas de folha de flandres com revestimento orgânico para embalagem de alimentos [11].

Outro relato da literatura é a avaliação da proteção dos vernizes aplicados em latas de alumínio fabricadas usando-se a estampagem profunda de discos cortados de uma liga AlMg|MnI (% massa) com espessura máxima de 0,3 mm. Foram avaliados vernizes epóxi-acrílicos aplicados internamente nas latas com diferentes espessuras de camada seca de 2,8  $\mu\text{m}$ , 3,2  $\mu\text{m}$  e 4,3  $\mu\text{m}$ . Entretanto, uma solução salina foi utilizada como eletrólito em substituição à bebida carbonatada, e foi usada a técnica de impedância eletroquímica na avaliação da proteção do revestimento orgânico ao metal [12].

A literatura [6] relata, ainda, a utilização da técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) para avaliação do verniz aplicado em latas estanhadas para armazenamento de alimento. Na literatura [6], é relatada a detecção de falhas na camada do revestimento orgânico usando-se a técnica de EIE, que não foram identificadas a olho nu ou usando-se análises microscópicas. A literatura é vasta no que se refere ao estudo da corrosão e de processos de inibição da corrosão de folha de flandres [13-16]. Existem ainda numerosos estudos acerca da corrosão do alumínio em soluções contendo cloretos, presentes em diversos alimentos [17-19], e novos recobrimentos de alumínio com polímeros condutores surgem na literatura [20], mas especificamente acerca da corrosão do alumínio em contato com bebidas carbonatas, a literatura é deficiente.

Este trabalho possui importância acadêmica e tecnológica, e tem como objetivo avaliar a resistência à corrosão em meio de cerveja de latas de alumínio, para diferentes lotes da bebida, mas de mesma data de fabricação e mesmo tipo de cerveja.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a caracterização da superfície por microscopia eletrônica de varredura, foi utilizado o equipamento Quanta 200-FEG-FEI com detector de elétrons secundários, retroespalhados e espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDX) com modo alto vácuo operando entre  $10^{-6}$  e  $10^{-7}$  torr e modo baixo vácuo operando a  $10^{-2}$  torr.

As medidas de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) foram realizadas em uma cela eletroquímica de 300 mL composta por três eletrodos (Figura 1). O potenciostato utilizado foi um AUTOLAB® PGSTAT 128N controlado pelo FRA32M e analisado pelo programa Zview Versão 2.9 b com auxílio do programa Origin® 7.0.

O eletrodo de trabalho utilizado foi uma lata de alumínio comercial em uma forma quadrada de 5,0 cm  $\times$  5,0 cm. Foi utilizada uma célula eletroquímica com um bocal do tamanho da área a ser analisada, de 4,15 cm<sup>2</sup>. Foram feitas medidas em triplicata, analisando-se diferentes regiões da mesma lata. Esta célula é pressionada contra uma chapa da lata de alumínio para se evitar o

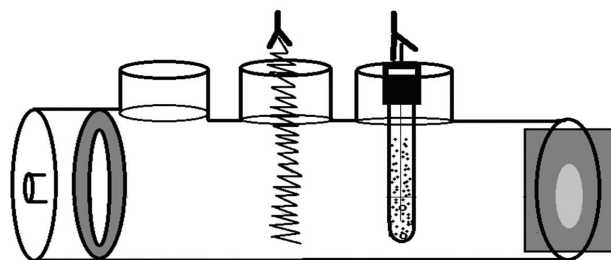
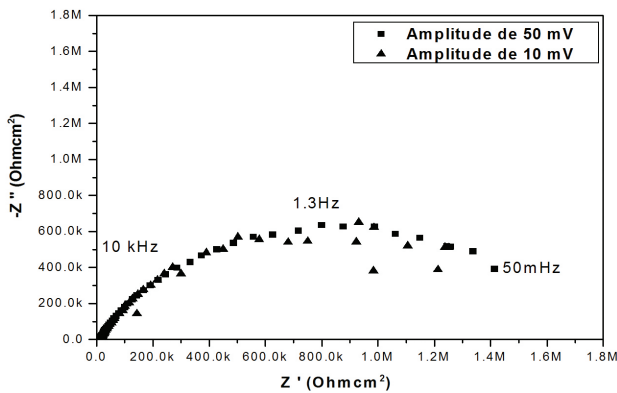
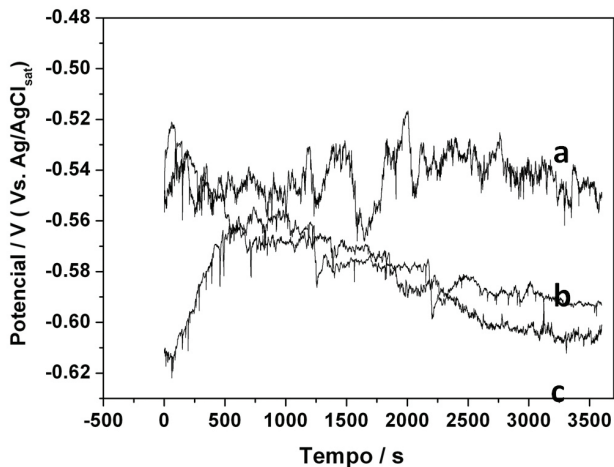


Figura 1. Esquema de célula eletroquímica de três eletrodos.

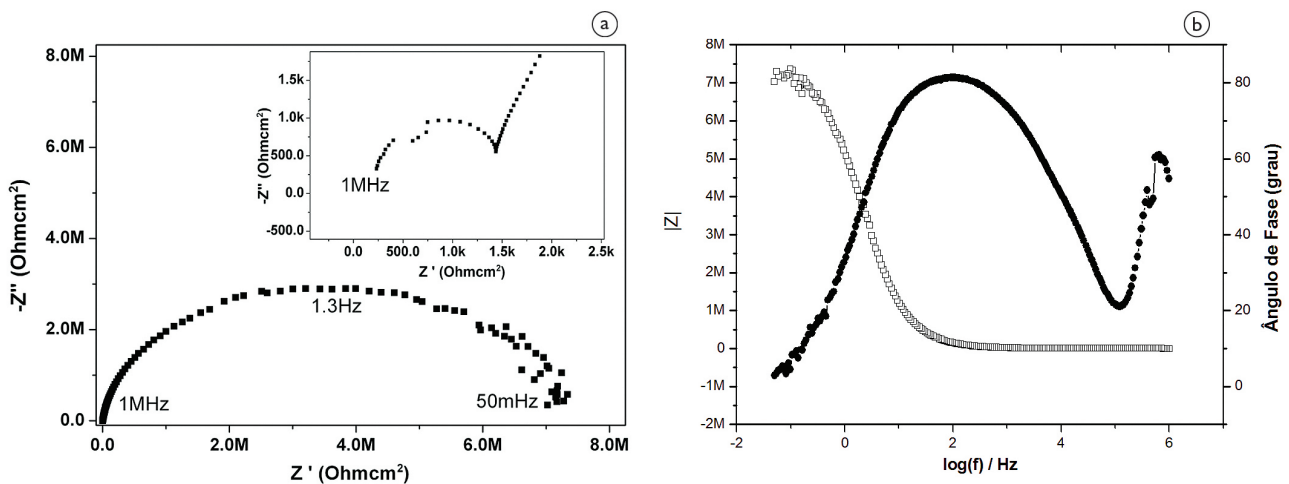
surgimento de frestas. A parte do eletrodo de trabalho que ficava em contato com o jacaré foi lixada com lixa número 600 e lavada com água destilada antes de cada experimento. O contra eletrodo utilizado foi o de platina



**Figura 2.** Diagrama de Nyquist para o alumínio em meio de cerveja, usando-se duas amplitudes de potencial: 10mV e 50mV.



**Figura 3.** Potencial de circuito aberto de diferentes regiões de latas de alumínio em meio de cerveja.



**Figura 4.** Diagrama de Nyquist (a) e Bode (b) para a lata de alumínio em meio de cerveja com tempo de imersão de 20 dias.

e o de referência foi Ag/AgCl, distante 0,5 cm do eletrodo de trabalho. Todos os experimentos foram realizados sem agitação da solução de trabalho, à temperatura de 25°C. Os experimentos de EIE foram realizados em meio eletrolítico de cerveja. Os seguintes parâmetros foram selecionados após experimentos iniciais para otimização das condições experimentais: medidas realizadas com 200 pontos, faixa de frequência de 1 MHz a 50 mHz. O tempo de imersão do alumínio no eletrólito foi de 20 dias. Foi feito um estudo eletroquímico prévio para a seleção da amplitude de perturbação a ser usada [21]. Foram testadas as amplitudes de 10 mV (Ag/AgCl), 30 mV (Ag/AgCl) e de 50mV (Ag/AgCl) e foi selecionada a amplitude de potencial de 30 mV a partir do potencial de circuito aberto estabilizado. A hipótese da linearidade foi testada e confirmada [21]. A Figura 2 apresenta o diagrama de Nyquist obtido para a lata de alumínio em meio de cerveja usando-se duas amplitudes de potencial: 10 mV e 50 mV.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

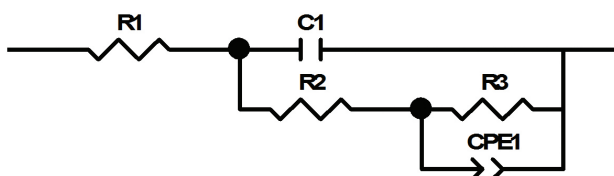
Primeiramente, foi realizada a medida do potencial de circuito aberto (PCA) por uma hora. Este procedimento foi realizado em triplicata (a, b e c), como mostrado na Figura 3.

O valor médio do potencial de circuito aberto estabilizado foi de  $-583 \pm 30$  mV (Ag/AgCl). O alumínio em meio de cerveja referente ao lote 1 (amostra a na Figura 3) apresentou um maior valor do potencial de corrosão, de  $-550$  mV (Ag/AgCl). As amostras de alumínio do lote 2 (amostras b e c da Figura 3) apresentaram valores de potencial de corrosão inferiores, de  $-593$  mV (Ag/AgCl) e  $-605$  mV (Ag/AgCl).

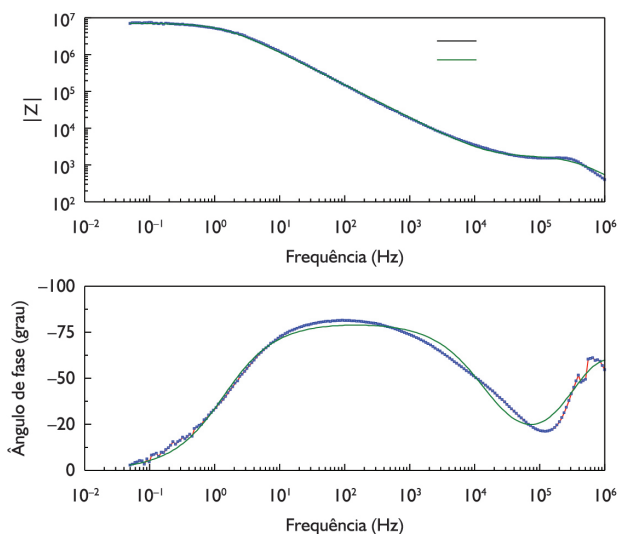
Foram observados dois comportamentos distintos para os lotes analisados. O primeiro comportamento associado ao lote 1 foi representado pelo diagrama de Nyquist (Figura 4a) e diagrama de Bode (Figura 4b). Foram obser-

vadas duas constantes de tempo, uma para frequências acima de  $10^5$  Hz. O módulo FRA32M permite medidas de impedância numa faixa de Frequência até  $10^6$  Hz. O máximo valor do ângulo de fase se aproxima de  $90^\circ$ , o que caracteriza uma impedância capacitiva [7].

O circuito equivalente que se ajustou aos dados obtidos é o apresentado na Figura 5 e o ajuste é apresentado na Figura 6. A Tabela 1 apresenta os parâmetros eletroquímicos obtidos:  $R_1$  é a resistência do eletrólito,  $C_1$  é a capacitância do revestimento já que o expoente da frequência angular ( $n$ ) é igual a 1,  $R_2$  é a resistência do revestimento ou do poro,  $CPE_1$  é a capacitância da dupla camada, e é um elemento de constante de fase e não um capacitor puro uma vez que  $n < 1$ ,  $R_3$  é a resistência à transferência de carga. O valor de  $X^2$  indica a qualidade do ajuste. Um circuito similar é reportado na literatura



**Figura 5.** Circuito equivalente ajustado aos dados de impedância do alumínio em cerveja.



**Figura 6.** Sobreposição do ajuste com os dados de impedância do alumínio em cerveja.

**Tabela 1.** Valores dos elementos do circuito equivalente ajustado às medidas de EIE do alumínio no meio de cerveja

Elemento	Valor	% Erro
$R_1$	$124,4 \Omega \cdot \text{cm}^2$	13,1
$R_2$	$1640 \Omega \cdot \text{cm}^2$	1,3
$C_1$	$3,0 \cdot 10^{-10} \text{F/cm}^2$	2,8
$R_3$	$7,1 \cdot 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$	1,0
$CPE1-T$	$2,0 \cdot 10^{-8} \text{Fs}^{(n-1)}/\text{cm}^2$	1,4
$n$	0,89	0,2
$X^2$	$1 \cdot 10^{-2}$	

no caso da análise por EIE de um aço carbono revestido com um fluorpolímero imerso durante 30 dias em solução de sulfato de sódio e para alumínio recoberto com poliéster [22].

A Figura 7 apresenta o diagrama de Nyquist e Bode para o segundo comportamento observado (referente ao lote 2) de alumínio em meio de cerveja. O circuito equivalente ajustado aos dados é mostrado na Figura 8, e a Tabela 2 apresenta os parâmetros eletroquímicos obtidos. Além dos elementos já observados no circuito apresentado na Figura 5, observou-se uma nova constante de tempo que pode estar relacionada às propriedades elétricas da camada passiva de óxido na superfície do metal ( $R_3$  e  $CPE_1$ ) [22].

A Figura 9 representa os valores da resistência à transferência de carga ( $R_{ct}$ ). Os parâmetros foram obtidos a partir das medidas de EIE no potencial de circuito aberto (PCA). Todas as amostras tiveram a mesma data de fabricação, mas foram analisados dois lotes diferentes. A resistência à transferência de carga do alumínio sofreu influência do lote analisado nos valores obtidos. O alumínio do lote 1 apresentou um valor de resistência de polarização da ordem de  $7 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}^2$  enquanto que, para as amostras do lote 2, este valor é cerca de  $4 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}^2$ .

A resistência do eletrólito variou em relação ao lote analisado, adquirindo valores na faixa de  $300 \text{ ohm} \cdot \text{cm}^2$  a  $100 \text{ ohm} \cdot \text{cm}^2$ , correspondendo a condutividade entre  $666 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$  a  $2000 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , concordando com dados de literatura [23]. Os envases correspondem à mesma data de fabricação, tendo todas as amostras ficado imersas no eletrólito por um período de 20 dias, variando-se apenas o lote de fabricação.

No lote 1 o recobrimento do Al é mais efetivo na proteção contra a corrosão se comparado com o recobrimento obtido no lote 2.

Para obter mais informações sobre o tipo de recobrimento, a Figura 10 mostra as micrografias eletrônicas de varredura obtidas da interface dos invólucros referentes ao lote 1 (Figura 10b) e lote 2 (Figura 10a). Nota-se claramente que no lote 1 o filme polimérico é mais uniforme e possui uma espessura de aproximadamente  $4,3 \mu\text{m}$  enquanto que, para a amostra do lote 2, o filme polimérico apresenta-se mais irregular além de possuir uma espessura menor (cerca de  $2,8 \mu\text{m}$ ).

Um importante efeito do revestimento no resultado de impedância é uma consequência da espessura do revestimento. Quando as propriedades protetoras do revestimento orgânico são boas como as das amostras do lote 1, a contribuição detectável é apenas a  $R_{ct}$ , e a contribuição da camada de alumina não foi identificada [22]. Uma comparação dois comportamentos eletroquímicos é apresentada na Figura 11. O ângulo de fase do pico de máximo foi maior no caso do lote 1, evidenciando um comportamento mais capacitivo [7] (Figura 11). A impedância total e a resistência do poro aumenta à medida que a espessura do revestimento aumenta [22]. Foi obser-

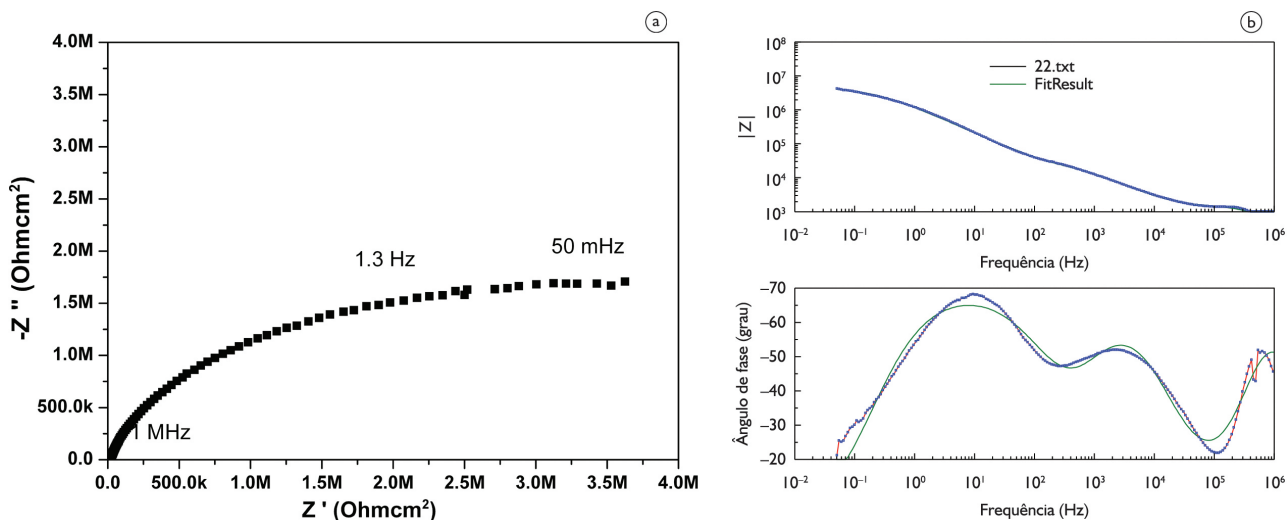


Figura 7. Diagrama de Nyquist (a) e diagrama de Bode (b) para o segundo comportamento observado do alumínio em meio de cerveja.

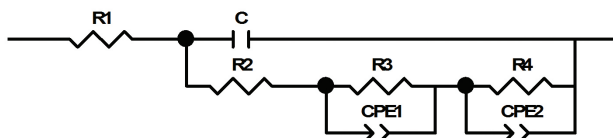


Figura 8. Circuito equivalente referente ao segundo comportamento eletroquímico observado para o alumínio em meio de cerveja.

Tabela 2. Valores dos elementos do circuito equivalente ajustado aos resultados de EIS do alumínio no meio de cerveja

Elemento	Valor	% Erro
$R_1$	183,2 $\Omega \cdot \text{cm}^2$	7,13
C	$3,5 \cdot 10^{-10} \text{ F/cm}^2$	2,91
$R_2$	1288 $\Omega \cdot \text{cm}^2$	1,36
CPE1-T	$6,2 \cdot 10^{-8} \text{ Fs}^{(\alpha-1)}/\text{cm}^2$	12,49
n	0,84	1,52
$R_3$	12065 $\Omega \cdot \text{cm}^2$	4,52
CPE2-T	$1,95 \cdot 10^{-7} \text{ Fs}^{(\alpha-1)}/\text{cm}^2$	1,26
n	0,79	0,45
$R_4$	$4,2 \cdot 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$	1,46
$X^2$	$4 \cdot 10^{-3}$	

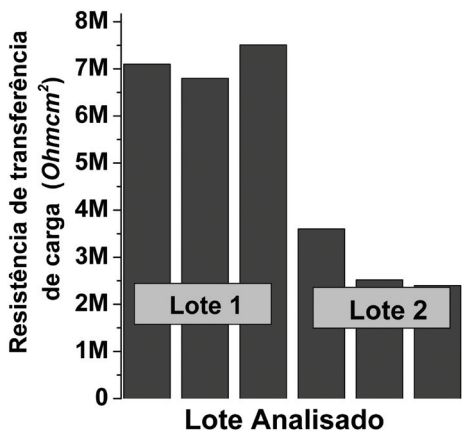


Figura 9. Análise dos valores de resistência à transferência de carga para as amostras de cerveja dos lotes 1 e 2.

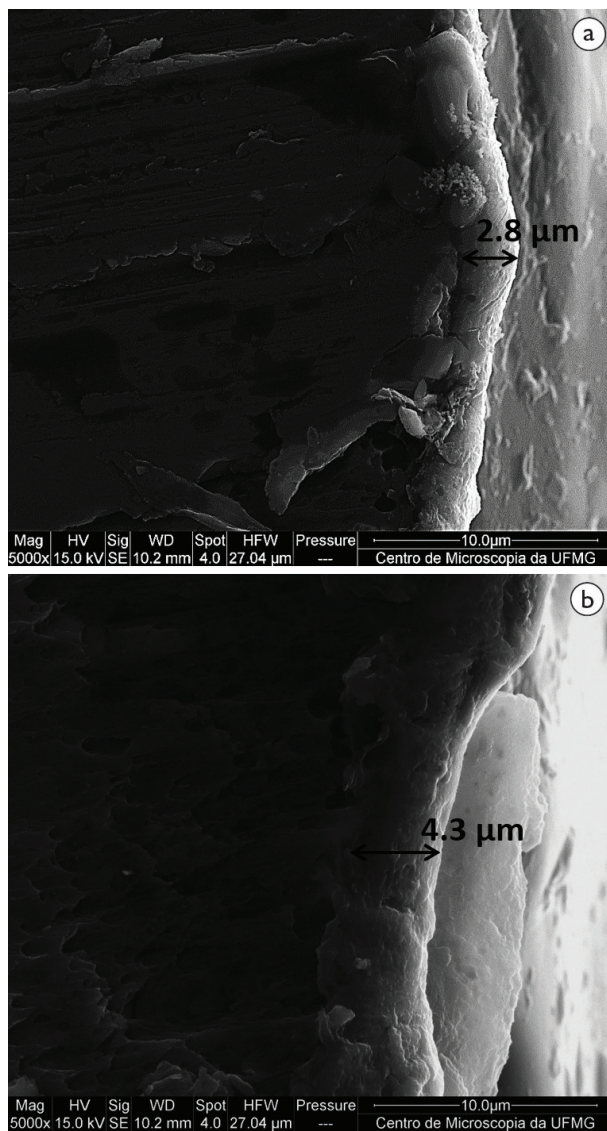


Figura 10. Micrografias eletrônicas de varredura das latas de alumínio do Lote 2 (a) e do Lote 1 (b).

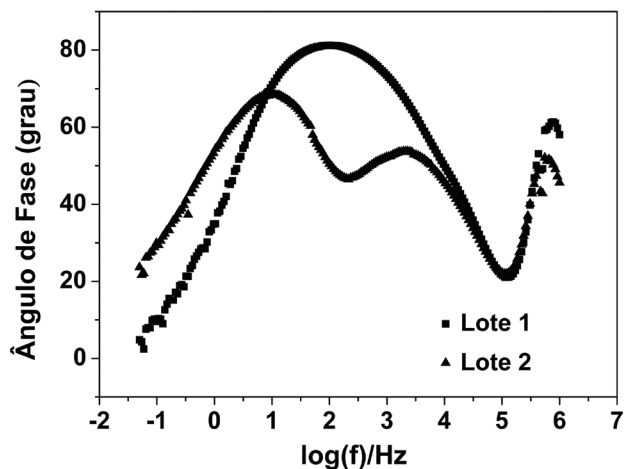


Figura 11. Diagrama de Bode para a lata de alumínio em contato com cerveja, comparando-se os lotes 1 e 2.

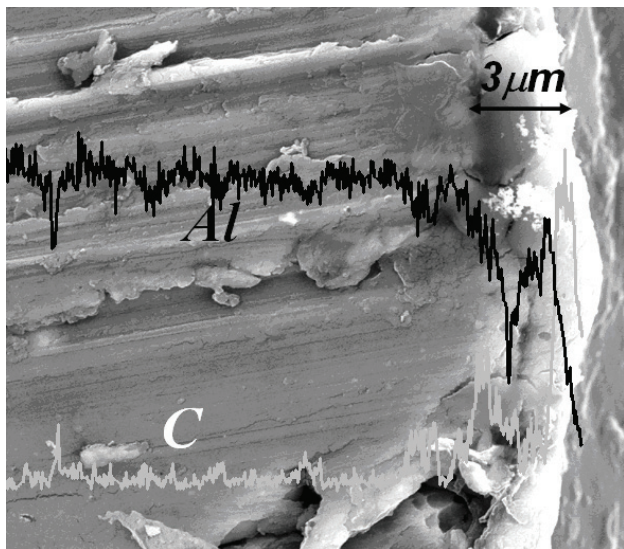


Figura 12. Espectro obtido por EDS da superfície transversal do eletrodo de trabalho referente ao lote 2.

vado um aumento da resistência de poro de  $1288 \Omega \cdot \text{cm}^2$  para  $1640 \Omega \cdot \text{cm}^2$  e da resistência à transferência de carga quando a espessura do revestimento aumentou de  $4,3 \mu\text{m}$  para  $2,8 \mu\text{m}$ .

A existência do verniz pode ser comprovada pela espectroscopia de energia dispersiva (EDS) mostrando o decaimento da concentração de alumínio ao se distanciar do substrato de alumínio e o aumento da concentração de carbono ao se aproximar do revestimento polimérico, ao realizar a medida da amostra de alumínio transversalmente, conforme mostrado na Figura 12 para a amostra de alumínio referente ao lote 2.

#### 4 CONCLUSÃO

A resistência do eletrólito de cerveja e a resistência de polarização do alumínio em contato com a cerveja, após um período de imersão de 20 dias, variaram em função do lote analisado.

As latas de alumínio do lote 2 apresentaram uma menor resistência à corrosão em meio de cerveja, evidenciada pela redução do ângulo correspondente ao máximo da curva do ângulo de fase em função da frequência, de cerca de  $80^\circ$  para valores de  $70^\circ$ , e ao surgimento de uma nova constante de tempo associada à camada de alumina. As latas de alumínio do lote 2 apresentaram, ainda, uma menor espessura do revestimento orgânico, de cerca de  $3 \mu\text{m}$ , sendo que a espessura do revestimento orgânico do lote 1 foi de  $4,3 \mu\text{m}$ , medida usando-se microscopia eletrônica de varredura acoplada à espectroscopia de energia dispersiva.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem às agências de fomento FAPEMIG, CAPES e CNPq.

#### REFERÊNCIAS

- Urban J, Dahlberg CJ, Carroll BJ, Kaminsky W. Absolute configuration of beer's bitter compounds. *Angewandte Chemie International Edition*. 2013;52(5):1553-1555. PMID:23239507 PMCID:PMC3563212. <http://dx.doi.org/10.1002/anie.201208450>
- Abralatas. [acesso em 21 out. 2012]. Disponível em: [www.abralatas.org.br](http://www.abralatas.org.br)
- Abralatas. Lata de alumínio: embalagem conquista espaço em diversos segmentos. *Revista da Lata*. 2012; 2012:19.
- Jena S, Das H. Shelf life prediction of aluminum foil laminated polyethylene packed vacuum dried coconut milk powder. *Journal of Food Engineering*. 2012;108(1):135-142. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.06.036>
- Bernardo PEM, Santos JLC, Costa NG. Influence of the lacquer and end lining compound on the shelf life of the steel beverage can. *Progress in Organic Coatings*. 2005;54(1):34-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2005.04.002>
- Xia D, Song S, Gong W, Jiang Y, Gao Z, Wang J. Detection of corrosion-induced metal release from tinplate cans using a novel electrochemical sensor and inductively coupled plasma mass spectrometer. *Journal of Food Engineering*. 2012;113(1):11-18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.05.035>

- 7 Pournaras AV, Prodromidis MI, Katsoulidis AP, Badeka AV, Georgantelis D, Kontominas MG. Evaluation of lacquered tinned cans containing octopus in brine by employing X-ray microanalysis and electrochemical impedance spectroscopy. *Journal of Food Engineering*. 2008;86(3):460-464. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.09.034>
- 8 Faria EV. Avaliação do desempenho de latas de folha-de-flandres por meio da espectroscopia de impedância eletroquímica e do acompanhamento da estocagem de palmito pupunha (*Bactrisgasipaes*) enlatado [tese de doutorado]. Campinas: UNICAMP; 2000.
- 9 Catalá R, Cabañes JM, Bastidas JM. An impedance study on the corrosion properties of lacquered tinplate cans in contact with tuna and mussels in pickled sauce. *Corrosion Science*. 1998;40(9):1455-1467. [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-938X\(98\)00050-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00050-X)
- 10 Hollaender J, Ludwig E, Hillebrandl S. Assessing protective layers on metal packaging material by electrochemical impedance spectroscopy (EIS). In: International Tin Research Institute. Proceedings of International Tinplate Conference; 1992; London, United Kingdom. Middlesex: International Tin Research Institute; 1992. p. 300-315.
- 11 Katemann BB, Inchauste CG, Castro PA, Schulte A, Calvo EJ, Schuhmann W. Precursor sites for localised corrosion on lacquered tinplates visualised by means of alternating current scanning electrochemical microscopy. *Electrochimica Acta*. 2003;48(9):1115-1121. [http://dx.doi.org/10.1016/S0013-4686\(02\)00822-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0013-4686(02)00822-8)
- 12 Grandle JA, Taylor SR. Electrochemical impedance spectroscopy of coated aluminum beverage containers: Part I - Determination of a parameter for large sample evaluation. *Corrosion: The Journal of Science and Engineering*. 1994;50(10):792-803. <http://dx.doi.org/10.5006/1.3293469>
- 13 Bastidas JM, Damborenea JJ, Gonzalez JA, Otero E, Chacon ME, Archer WI, et al. An electrochemical study on the influence of oxygen in tinplate corrosion and inhibition. *Corrosion Science*. 1990;30(2-3):171-182. [http://dx.doi.org/10.1016/0010-938X\(90\)90071-C](http://dx.doi.org/10.1016/0010-938X(90)90071-C)
- 14 Biermann MC, Sandenbergh RF, von Moltke TV. Characteristics and lacquer adhesion on dip and CDC chromium passivated tinplate. *Corrosion Science*. 2006;48(10):2925-2936. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2005.10.018>
- 15 Blunden SJ, Harris PG, Notter IM. A re-evaluation of the surface composition and morphology of the tinplate D&I cans: the limitations of electrochemical porosity tests. *Corrosion Science*. 1991;32(8):827-839. [http://dx.doi.org/10.1016/0010-938X\(91\)90027-M](http://dx.doi.org/10.1016/0010-938X(91)90027-M)
- 16 Ingo GM, Giorgi L, Zacchetti N, Azzeri N. Electrochemical and XPS studies on lacquer—low tinned steel adhesion. *Corrosion Science*. 1992;33(3):361-377. [http://dx.doi.org/10.1016/0010-938X\(92\)90066-C](http://dx.doi.org/10.1016/0010-938X(92)90066-C)
- 17 Li X, Deng S, Xie X. Experimental and theoretical study on corrosion inhibition of oxime compounds for aluminium in HCl solution. *Corrosion Science*. 2014;81:162-175. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2013.12.021>
- 18 Arrabal R, Mingo B, Pardo A, Mohedano M, Matykina E, Rodríguez I. Pitting corrosion of rheocast A356 aluminium alloy in 3.5 wt.% NaCl solution. *Corrosion Science*. 2013;73:342-355. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2013.04.023>
- 19 Murer N, Buchheit RG. Stochastic modeling of pitting corrosion in aluminum alloys. *Corrosion Science*. 2013;69:139-148. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2012.11.034>
- 20 Johansen HD, Brett CMA, Motheo AJ. Corrosion protection of aluminium alloy by cerium conversion and conducting polymer duplex coatings. *Corrosion Science*. 2012;63:342-350. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2012.06.020>
- 21 Esteves L. Resistência à corrosão de embalagens de alumínio em contato com bebidas carbonatadas. Belo Horizonte: UFMG; 2013.
- 22 Bonora PL, Deflorian F, Fedrizzi L. Electrochemical impedance spectroscopy as a tool for investigating underpainting corrosion. *Electrochimica Acta*. 1996;41(7-8):1073-1082. [http://dx.doi.org/10.1016/0013-4686\(95\)00440-8](http://dx.doi.org/10.1016/0013-4686(95)00440-8)
- 23 Moreira BG. Diferenciação de bebidas alcoólicas e não-alcoólicas no Sistema de Medição de Vazão (SMV) durante o envase. Rio de Janeiro: PUC-Rio; 2005.

Recebido em: 18 Nov. 2013

Aceito em: 09 Jun. 2014