

APLICAÇÃO DA CRONOPOTENCIOMETRIA PARA AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE DE ÍONS DE REJEITO DE ELETRODEPOSIÇÃO DE COBRE ATRAVÉS DE UMA MEMBRANA SELETIVA*

Tatiana Scarazzato¹
Victoria Beatriz Rontal Moisés²
Zehbour Panossian³
Jorge Alberto Soares Tenório⁴
Denise Croce Romano Espinosa⁵

Resumo

Neste trabalho, a cronopotenciometria foi utilizada para estudar o transporte de íons de um rejeito de um processo de deposição de cobre isento de cianeto através de membranas heterogêneas. Para tanto, utilizou-se um galvanostato e fez-se o registro da diferença de potencial através da membrana por meio de dois eletrodos de referência. Os resultados indicam que o transporte dos íons sofre interferências devido às reações de oxirredução da água. Além disso, a resistividade do ácido orgânico pode causar um aumento da resistência elétrica do sistema. Verificou-se, também, que o valor de densidade de corrente limite pode variar em função da espessura da camada limite de difusão.

Palavras-chave: Rejeito de eletrodeposição; Banho de cobre; Cronopotenciometria; Técnicas de separação por membrana.

APPLICATION OF CHRONOPOTENTIOMETRY FOR EVALUATING THE TRANSPORT OF IONS OF COPPER PLATING WASTEWATER THROUGH A SELECTIVE MEMBRANE

Abstract

In this work, chronopotentiometry was used to study the transport of ions from a wastewater of a cyanide-free copper plating bath through a heterogeneous membrane. A galvanostat was used and the potential difference across the membrane was recorded by means of two reference electrodes. The results indicate that the transport of the ions is influenced by the redox reactions of water. The resistivity of the organic acid may cause a rise in electrical resistance of the system, and the limiting current density varies depending on the thickness of the diffusion boundary layer.

Keywords: Electroplating wastewater; Copper plating bath; Chronopotentiometry; Membrane separation techniques.

- ¹ *Engenheira mecânica, mestre em ciências, doutoranda do Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, Brasil.*
- ² *Graduanda em engenharia de materiais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, Brasil.*
- ³ *Bacharel em física, doutora em físico-química, pesquisadora no Laboratório de Corrosão e Proteção, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, São Paulo, Brasil.*
- ⁴ *Engenheiro Metalurgista, doutor em engenharia metalúrgica, professor titular, Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, Brasil.*
- ⁵ *Engenheira metalurgista, doutora em engenharia metalúrgica, professora associada, Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a indústria de eletrodeposição enfrenta dois desafios. Um deles refere-se ao consumo de água por unidade de produção. Nas indústrias de eletrodeposição, a água é uma das principais matérias-primas em muitos dos processos, sendo que cerca de 90% do volume de água é consumido nas etapas de lavagem das peças [1]. O segundo fator refere-se à substituição das matérias-primas compostas por cianeto. Essa substituição é uma das principais medidas de redução de contaminantes, proposta no conceito de produção mais limpa [2].

Aliados a estes fatos, é crescente a preocupação com a questão da geração e disposição dos resíduos sólidos no Brasil. Desde a criação da política nacional de resíduos sólidos (PNRS), estimula-se a hierarquia: não-geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final de resíduos [3].

Algumas matérias-primas livres de cianeto já são desenvolvidas e comercializadas no exterior. No Brasil, um exemplo é o banho toque alcalino de cobre à base do ácido hidroxietano difosfônico (HEDP), desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), a partir de um banho comercial importado [4].

O desenvolvimento de novos banhos cria um obstáculo aos métodos tradicionais de tratamentos de efluentes, uma vez que a composição dos rejeitos é alterada. Isso estimula adaptações e melhorias nos processos comumente utilizados.

Como alternativa, as técnicas de separação por membranas mostram-se importantes, à medida que possibilitam reduzir o volume de resíduos gerados e de consumo de água. Dentre essas técnicas, a eletrodialise utiliza uma diferença de potencial elétrico como força motriz para promover a separação de íons entre soluções com o auxílio de membranas íon-seletivas [5]. As principais vantagens dos processos de separação por membrana são: não necessitam de mudança de fase, podem ser operados a temperatura ambiente, não necessitam de adição de reagentes químicos e possuem operação relativamente simples [6].

Um dos aspectos mais importantes a ser considerado em um sistema de eletrodialise é o consumo de energia. Para fazer a separação iônica, é necessário transpor as barreiras energéticas impostas pela própria solução, pela membrana, entre outras [5].

Segundo McGovern e colaboradores [7], a densidade de corrente limite influencia diretamente o consumo energético. Além disso, os autores citam a queda ôhmica de soluções diluídas como um fator importante que pode aumentar o consumo de energia de sistemas de eletrodialise.

Atualmente, a cronopotenciometria tem sido utilizada para investigar os fenômenos associados ao transporte de íons através de membranas de troca iônica [8-10]. Por meio da cronopotenciometria, é possível avaliar, por exemplo, a densidade de corrente limite do sistema, a interferência das reações que ocorrem na superfície dos eletrodos, a queda ôhmica da solução sob estudo, entre outros.

1.1 Cronopotenciometria

A cronopotenciometria é uma técnica clássica da eletroquímica que mede a resposta em termos de uma diferença de potencial elétrico de um sistema, ao submetê-lo a uma corrente elétrica contínua ou alternada [10]. Em sistemas solução-membrana-solução, a cronopotenciometria é utilizada aplicando-se uma corrente elétrica entre dois eletrodos previamente posicionados nas extremidades do sistema. O potencial elétrico em função do tempo de aplicação da corrente é registrado para

construção de curvas do tipo potencial *versus* tempo [11]. Uma curva característica obtida por cronopotenciometria é apresentada na Figura 1.

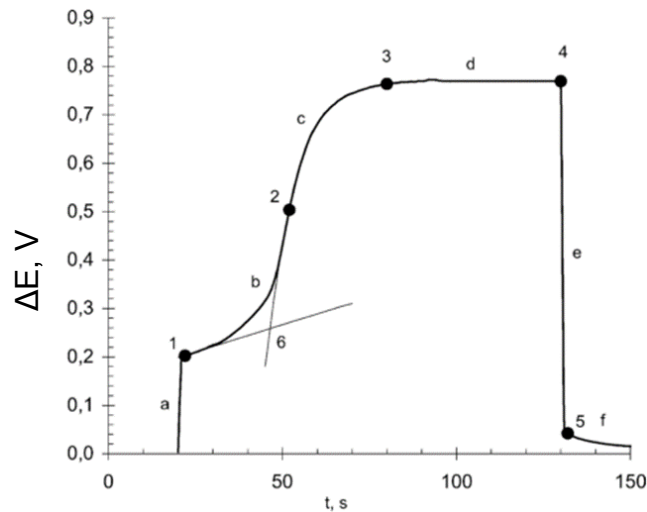


Figura 1. Curva característica obtida por ensaios cronopotenciométricos [10].

A curva apresentada na Figura 1 apresenta regiões típicas que correspondem às interações entre os íons e as membranas. A região (a) corresponde à queda ôhmica do sistema. A região (b) é atribuída aos gradientes de concentração. A região (c) corresponde ao momento em que não há mais íons na camada limite da membrana e um aumento de potencial brusco é verificado. A região (d) corresponde ao surgimento de fenômenos de eletroconvecção e à interferência dos produtos das reações dos eletrodos. A região (e) refere-se à cessação da corrente e, por fim, a região (f) descreve a relaxação do sistema [10,11].

Algumas das aplicações da cronopotenciometria em sistemas solução-membrana-solução são, por exemplo, o estudo da densidade de corrente limite e a determinação da espessura da camada de difusão [11].

Os dados obtidos a partir das curvas cronopotenciométricas permitem a construção de uma curva potencial-corrente, conhecida como curvas CVC (current-voltage curves), ou curva de polarização. Uma CVC típica é caracterizada por três regiões [12]. A primeira região é regida pela lei ôhmica. A segunda região caracteriza-se por um platô, devido ao estabelecimento de uma corrente limite e causado pela redução da quantidade de íons na camada adjacente à superfície da membrana. Na terceira região observa-se outro aumento da corrente, desta vez acima da corrente limite estabelecida. O valor da densidade de corrente limite é determinado pela intersecção das curvas tangentes à primeira e à segunda regiões [12].

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo empregar a cronopotenciometria para avaliar o transporte de íons presentes em um rejeito de um processo de deposição de cobre isento de cianeto através de membranas de troca iônica heterogêneas. Para tanto, serão avaliados dois parâmetros relacionados à eficiência do processo de eletrodialise. São eles: resistência elétrica e densidade de corrente limite.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As soluções de trabalho simulam o rejeito de um processo de eletrodeposição de um banho de cobre a base de HEDP. Tais soluções foram preparadas a partir da diluição do banho de cobre, em proporção de 1:100. As composições do banho de cobre e da solução de trabalho produzida a partir deste estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Composição do banho de cobre a base de HEDP [1] e da solução de trabalho utilizada.

	Concentração (mg.L ⁻¹) (banho de cobre)	Concentração (mg.L ⁻¹) (solução de trabalho)
Íons Cu ²⁺	4500 mg.L ⁻¹	45,0 mg.L ⁻¹
Ácido hidroxietano difosfônico	105000 mg.L ⁻¹	1050,0 mg.L ⁻¹
Cloreto de potássio	7000 mg.L ⁻¹	70,0 mg.L ⁻¹

As membranas íon-seletivas empregadas nos ensaios foram fornecidas pela empresa Hidrodex. Tratam-se de membranas comerciais heterogêneas, sendo uma catiônica (HDX100) e uma aniônica (HDX200).

Os ensaios cronopotenciométricos foram realizados utilizando-se uma configuração experimental composta por dois compartimentos, entre os quais as membranas foram posicionadas. Cada compartimento possuía volume de 130 mL. Ambos os compartimentos foram alimentados com a solução de trabalho proveniente do banho de cobre. A área da membrana sob investigação foi estabelecida em 12,6 cm². Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente.

Um potenciostato/galvanostato foi utilizado para a aplicação de valores gradativos de corrente contínua de diferentes valores entre o eletrodo de trabalho e o contraeletrodo. A resposta da diferença de potencial através da membrana em estudo foi registrada por meio de dois eletrodos de referência de calomelano saturado. A montagem experimental empregada é apresentada na Figura 2.

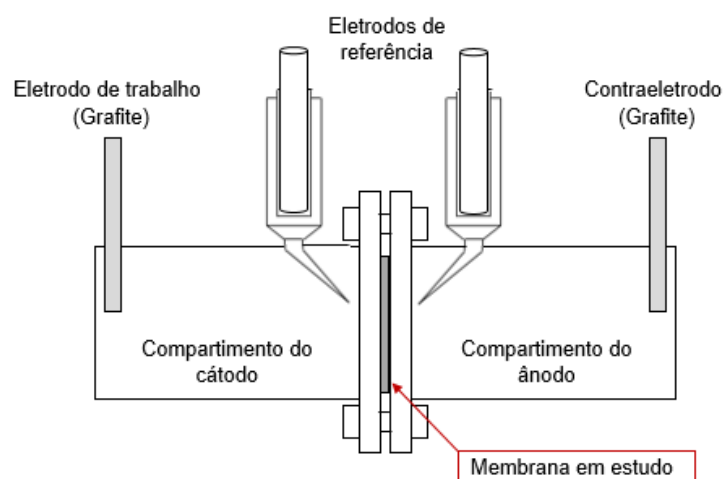


Figura 2. Montagem experimental do sistema solução-membrana de dois compartimentos.

Cada densidade de corrente contínua foi aplicada ao sistema por um período de 180 s. Após transcorrido esse período, a corrente era interrompida e o sistema permanecia em repouso por 120 s. Os dados registrados permitiram a construção de curvas do tipo potencial *versus* tempo, ou curvas cronopotenciométricas, e de curvas do tipo potencial *versus* densidade de corrente, ou curvas corrente-potencial.

A avaliação dos resultados foi realizada através da interpretação das curvas obtidas, considerando dois dos principais parâmetros relacionados à eficiência do processo de eletrodialise: a resistência elétrica e a densidade de corrente limite. A resistência elétrica do sistema solução-membrana foi determinada pelo coeficiente angular da reta correspondente à região ôhmica nas curvas corrente-potencial. A densidade de corrente limite também foi determinada a partir da construção das curvas corrente-potencial, pela intersecção das retas correspondentes à primeira e à segunda regiões, discutidas no item 1.1. As curvas cronopotenciométricas também foram utilizadas para obter informações sobre o transporte por difusão dos íons, sobre a resistência ôhmica da solução em estudo e sobre a influência das reações nos eletrodos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta as curvas cronopotenciométricas obtidas para o sistema solução-membrana sob análise, composto pela solução simulando o rejeito do banho de cobre em concentração 1%, cuja composição foi apresentada na Tabela 1, e pela membrana catiônica, HDX100.

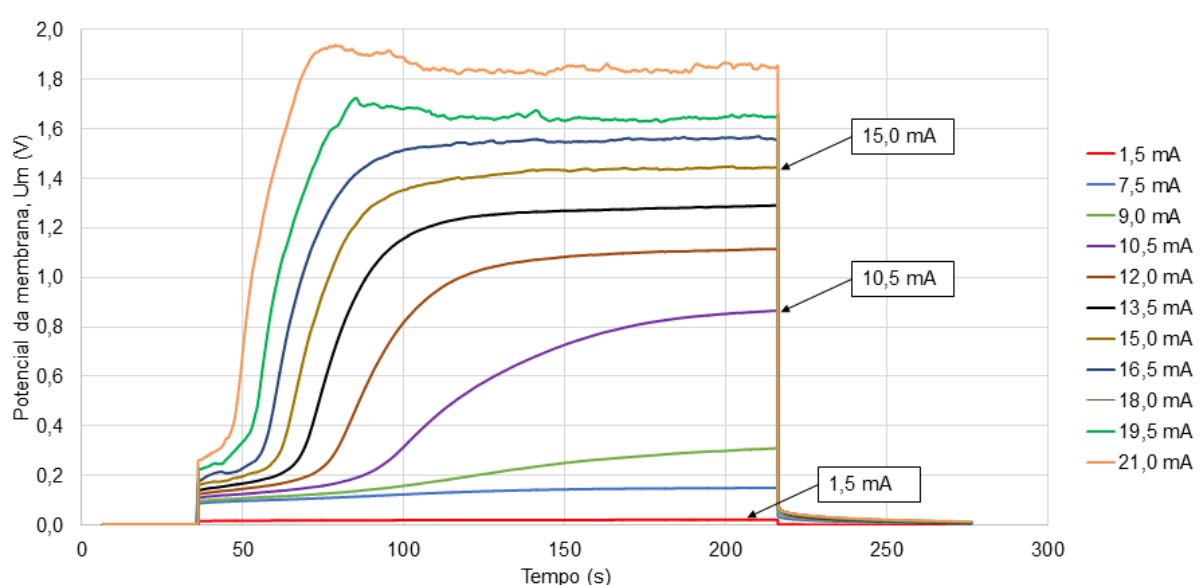


Figura 3. Curvas cronopotenciométricas obtidas para o sistema contendo o rejeito sintético do banho de cobre em concentração 1% e a membrana catiônica HDX100.

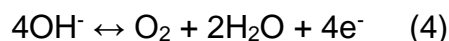
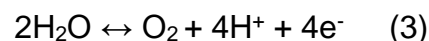
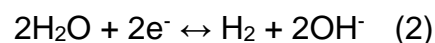
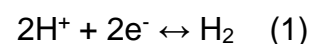
Na Figura 3, o eixo das abscissas representa o tempo de aplicação da corrente elétrica, em segundos, e o eixo das ordenadas representa o potencial registrado entre dois eletrodos de referência. Esse potencial é denominado potencial da membrana (U_m), em V. Através da Figura 3, observa-se que, em valores de corrente iguais ou inferiores a 9,0 mA, as curvas cronopotenciométricas apresentam apenas a região que corresponde à transposição da queda ôhmica. As curvas são características da leitura de potencial efetuada pela aplicação de uma corrente instantânea entre dois eletrodos. Esse comportamento indica que, nesta região, o sistema obedece à Lei de Ohm, que a densidade de corrente limite não foi atingida e que não houve esgotamento dos íons K^+ na camada adjacente à superfície da membrana.

Quando aplicados valores de corrente superiores a 10,5 mA, nota-se que as curvas passam a apresentar um ponto de inflexão atribuído à ausência de íons K^+ na

camada adjacente à superfície da membrana. O esgotamento dos íons é caracterizado pelo aumento acentuado do potencial de membrana registrado.

Ressalta-se que, no sistema composto pela membrana catiônica, HDX100, os íons sob investigação são predominantemente os cátions K^+ . Por se tratar de uma solução originada a partir de um banho toque de cobre contendo complexante, os íons Cu^{2+} estão presentes em forma de complexos aniônicos [13]. Portanto, estes complexos são repelidos da matriz da membrana catiônica.

Em valores de corrente superiores a 15,0 mA, surgem instabilidades nas curvas, principalmente após transcorridos 60 s. Essas instabilidades estão relacionadas à interferência dos produtos das reações dos eletrodos no transporte iônico através da membrana. Sabe-se que, pelo fato de os eletrodos utilizados serem inertes, as principais reações que podem ocorrer no catodo e no anodo são a geração de hidrogênio (Equação 1 ou Equação 2) e de oxigênio (Equação 3 ou Equação 4), respectivamente.



Para avaliar a interferência dos produtos das reações de oxirredução da água, partiu-se da Equação de Nernst, calculando-se o potencial de eletrodo em função do pH para uma dada reação. Dessa forma, o potencial de eletrodo da reação de formação de hidrogênio é dado pela Equação 5.

$$E_{H^+/H_2} = -0,059 \cdot pH \quad (5)$$

Da mesma forma, o potencial de eletrodo da reação de formação de oxigênio foi calculado por meio da Equação 6.

$$E_{OH^-/H_2O} = 1,223 - 0,059 \cdot pH \quad (6)$$

Nas Equações 5 e 6 (a 25 °C), o pH utilizado para o cálculo deve ser o pH do volume da solução que está próximo à interface do eletrodo. Para efeito de simplificação, considerou-se que a solução é homogênea e, portanto, possui o mesmo pH em todo o seu volume. O pH da solução de trabalho foi determinado através de medição direta, e o valor registrado foi de 10,3. Aplicando-se as Equações de Nernst simplificadas (Equações 5 e 6), observou-se que a reação de formação de hidrogênio é iniciada na interface cátodo-solução em valor de potencial $E = -0,6077$ V, SHE, e que a reação de formação de oxigênio é iniciada na interface ânodo-solução em $E = +0,615$ V, SHE.

Na Figura 3, a partir da aplicação de correntes da ordem de 10,5 mA, as curvas começam a apresentar a região em que ocorrem interferências dos produtos das reações de formação de hidrogênio ou de oxigênio, conforme mostrado na curva teórica apresentada na Figura 1. Sendo assim, pode-se sugerir que, a partir de 10,5 mA, um potencial (SHE) medido entre a membrana e o eletrodo de referência posicionado no compartimento do ânodo deve atingir valores superiores a $E = +0,615$ V, SHE. Nessa situação, os íons H^+ , produtos da Equação 3, passam a interferir no transporte dos cátions K^+ pela membrana catiônica. Essa interferência é

mais evidente a partir da aplicação de correntes superiores a 15 mA, quando as curvas (Figura 3) passam a apresentar maior instabilidade na região seguinte ao ponto de inflexão.

A Figura 4 apresenta as curvas cronopotenciométricas obtidas para o mesmo sistema, porém utilizando-se a membrana aniônica, HDX200.

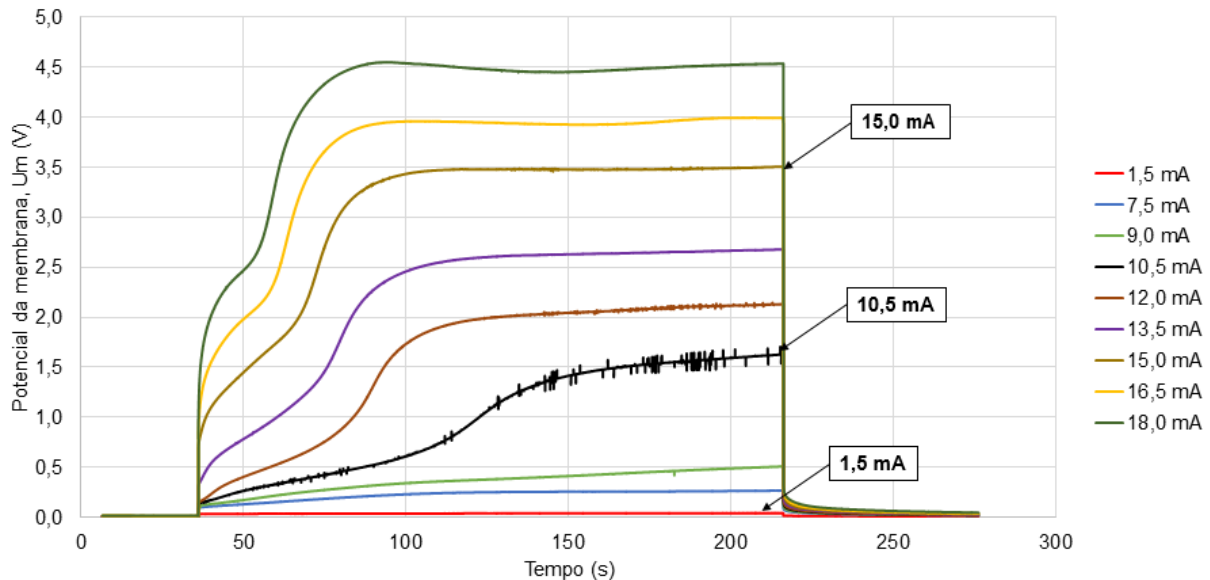


Figura 4. Curvas cronopotenciométricas obtidas para o sistema contendo o rejeito sintético do banho de cobre em concentração 1% e a membrana aniônica HDX200.

No sistema composto pela membrana aniônica, HDX200, os íons sob estudo são os ânions cloreto (Cl^-) e os complexos $\text{Cu}(\text{HEDP})^x$. As curvas cronopotenciométricas obtidas para a membrana aniônica, HDX200, possuem aspecto similar às curvas referentes à membrana catiônica, HDX100. Observa-se, na Figura 4, que para valores de corrente iguais ou inferiores a 9,0 mA, as curvas apresentam como principal característica a transposição da barreira relacionada à queda ôhmica da solução. Assim como os resultados obtidos para a membrana catiônica, a região entre 1,5 mA a 9,0 mA não atinge a densidade de corrente limite, ou seja, o sistema obedece à Lei de Ohm e não há esgotamento dos ânions na camada adjacente à superfície da membrana. A partir de 10,5 mA as curvas passam a apresentar um aumento do potencial registrado e um ponto de inflexão característico do esgotamento dos íons. Nota-se, ainda, que em valores de corrente superiores a 12 mA, a região anterior ao ponto de inflexão apresenta coeficiente angular maior quando comparada à mesma região do sistema utilizando a membrana catiônica. Esse comportamento pode indicar que a queda ôhmica dos ânions através da membrana aniônica é mais acentuada do que a queda ôhmica dos cátions através da membrana catiônica, sugerindo que a queda ôhmica relacionada ao ácido hidroxietano difosfônico é um fator importante no sistema estudado e não pode ser desprezada.

No sistema utilizando a membrana aniônica (Figura 4), observa-se que a partir da aplicação de correntes da ordem de 10,5 mA, surgem nas curvas a região que corresponde às interferências dos produtos das reações de formação do hidrogênio ou do oxigênio. Na Figura 4, por se tratar de uma membrana aniônica, é provável que essa interferência seja causada pelo grupo OH^- . Portanto, pode-se sugerir que a partir da aplicação de 10,5 mA, um potencial registrado entre a membrana e o eletrodo de referência posicionado no compartimento do cátodo deve atingir o valor

de $E = -0,6077$ V, SHE. Nessa situação, o grupo OH^- , produto da formação de hidrogênio passa a interferir no transporte dos demais ânions pela membrana HDX200.

A partir das curvas cronopotenciométricas apresentadas nas Figuras 3 e 4, foram construídas curvas corrente-potencial para os dois sistemas estudados: rejeito sintético do banho de cobre em contato com a membrana catiônica e rejeito sintético do banho de cobre em contato com a membrana aniônica, conforme Figura 5.

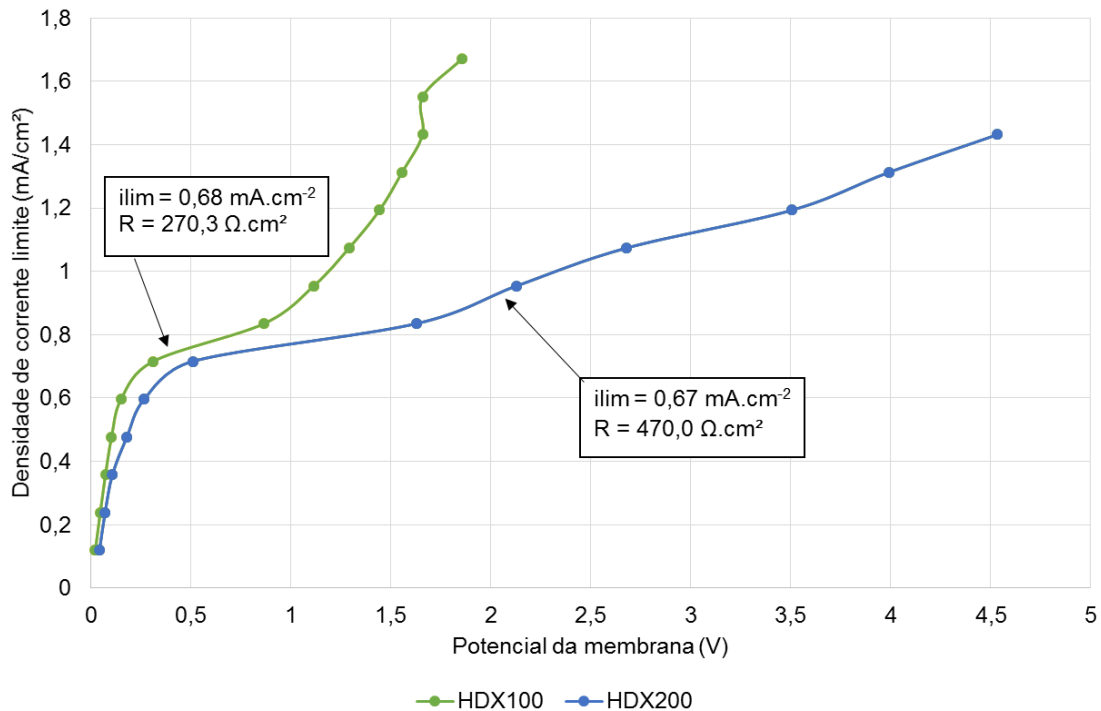


Figura 5. Curva corrente-voltagem para o rejeito sintético do banho de cobre utilizando a membrana catiônica, HDX100, e a membrana aniônica, HDX200.

Por meio do inverso do coeficiente angular das curvas apresentadas na Figura 5, foi determinado o valor da resistência elétrica dos sistemas solução-membrana estudados com as duas membranas de troca iônica por meio da Equação 7.

$$R = \frac{U}{i} = \frac{1}{tg \alpha}$$

A resistência elétrica determinada para o sistema utilizando a membrana aniônica foi 56% superior à resistência elétrica do sistema utilizando a membrana catiônica, provavelmente devido à maior resistividade do ácido orgânico em relação a um sal dissociado.

A densidade de corrente limite que pode ser aplicada ao sistema também pode ser determinada a partir da interseção entre a região ôhmica e a região que caracteriza o transporte por difusão, para as duas curvas. Percebe-se que, apesar de transportar íons distintos, o valor da densidade de corrente limite dos dois sistemas mostrou-se similar. Esse comportamento pode ser explicado através da análise da Equação 8.

$$i_{lim} = \frac{C_0 \cdot D \cdot z_j \cdot F}{\delta(t_m^j - t_s^j)}$$

Na Equação 7, C_0 é a concentração do banho, D é o coeficiente de difusão aparente do banho, z_j é a valência do íon sob investigação, F é a constante de Faraday, δ é a espessura da camada de difusão e t_m^j e t_s^j são os números de transporte do íon sob estudo na membrana e na solução, respectivamente. Assume-se que, para os dois sistemas solução-membrana, os valores de C_0 , D , F e δ são semelhantes, pois ambos contêm o mesmo rejeito sintético. Portanto, o resultado obtido sugere que, apesar de possuírem números de valência e números de transporte diferentes entre si, a combinação destes valores foi determinante para a obtenção da densidade de corrente limite.

Pode-se notar, ainda, que a região indicativa do transporte iônico por difusão é mais evidente no sistema composto pela membrana aniônica, o que sugere que o transporte por difusão dos complexos aniônicos ocorre em uma faixa de corrente maior se comparado ao dos cátions livres.

Outro fator importante a ser considerado é a espessura da camada limite de difusão. Em um estudo prévio [14], os autores obtiveram um valor de densidade de corrente limite de $2,1 \text{ mA.cm}^{-2}$ para o mesmo rejeito sintético, porém utilizando uma agitação contínua da solução nos compartimentos. Essa diferença pode ser explicada pela diminuição da espessura da camada de difusão, causada pela turbulência gerada no sistema. A influência da agitação da solução é mais evidenciada em soluções diluídas e em soluções com queda ôhmica aparente, como é o caso do rejeito sintético estudado.

4 CONCLUSÃO

A cronopotenciometria foi utilizada para avaliar a interação entre os íons presentes em um rejeito sintético proveniente de um banho de cobre e um par de membranas de troca iônica heterogêneas. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que os sistemas estudados satisfazem à Lei de Ohm quando aplicados valores de corrente de até 9,0 mA, nas condições estudadas. A partir desse valor, o sistema contendo a membrana catiônica passa a sofrer interferências causadas pelo H^+ , produto da reação de formação do oxigênio no lado anódico e o sistema composto pela membrana aniônica passa a sofrer interferências causadas pelo grupo hidroxila, produto da formação do hidrogênio no lado catódico. A resistência elétrica imposta pelo sistema e a densidade de corrente limite foram determinadas a partir das curvas corrente-potencial. A resistência elétrica do sistema utilizando a membrana aniônica é cerca de 56% superior à resistência elétrica do sistema utilizando a membrana catiônica. Um dos fatores que pode interferir neste aumento é a resistividade do ácido orgânico. O valor de densidade de corrente limite varia em função da espessura da camada limite de difusão. Para os sistemas nas condições estudadas, a densidade de corrente limite foi estabelecida em $0,67 \text{ A.cm}^{-2}$. A partir da separação dos íons com aplicação das técnicas utilizando membranas, uma das possíveis alternativas é a recuperação destes compostos para reutilização no fluxo produtivo e, simultaneamente, reuso da água tratada.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), à Fundação de Apoio ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (FIPT), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp processos nº 2012/51871-9 e

nº 2014/13351-9) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - Universal MCTI/CNPq Nº 14/2013).

REFERÊNCIAS

- 1 Carrara, S.; Junior, R. Técnicas de tratamento para o reuso de águas residuárias de processos de galvanoplastia. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 1998. São Carlos. Acesso em: 10 mar. 2015. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/brasil/ii-069.pdf>>.
- 2 Santos, M.S.; Yamanaka, H.T.; Pacheco, C.E.M.. Bijuterias. São Paulo: CETESB, 2005. 54p. Série P+L. Disponível em: < <http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em 13 mar 2015.
- 3 Ministério do Meio Ambiente. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <www.mma.gov.br/politica-de-residuos-solidos>. Acesso em: 17 fev 2015.
- 4 Vargas, C. Estudo da eletrodeposição do cobre a partir de banhos alcalinos isentos de cianetos. 2008, 221 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- 5 Strathmann, H. Ion-exchange membrane separation processes. Amsterdã: Elsevier, 2004.
- 6 Barbosa, I. L. Avaliação de processos de separação por membrana para geração de águas de reuso em um centro comercial. 2009, 124 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- 7 McGovern, R.K.; Zubair, S.M.; Lienhard V, J.H. The cost effectiveness of electrodialysis for diverse salinity applications, Desalination. 2014; 348: 57-65.
- 8 Larchet, C.; Nouri, S.; Nikonenko, V.; Application of chronopotentiometry to study the diffusion layer thickness adjacent to an ion-exchange membrane under natural convection. Desalination, 2006; 200: 146-148.
- 9 Marder, L.; Ortega, E. M. N., Pérez-Herranz, V.; Bernardes, A. M.; Ferreira, J. Z. Evaluation of transition metals transport properties through a cation-exchange membrane by chronopotentiometry. Journal of membrane Science, 2006; 284: 267-275.
- 10 Pismenskaia, N. S.; Huguet, P. P.; Nikonenko, V.; Pourcelly, G. Chronopotentiometry applied to the study of ion transfer through anion exchange membranes Journal of Membrane Science, 2004; 228: 65–76.
- 11 Marder, L. Estudo do transporte de íons metálicos através de uma membrana íon-seletiva catiônica a partir da cronopotenciometria. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, 2007.
- 12 Chamoulaud, G.; Bélanger, D. Modification of ion-exchange membrane used for separation of protons and metallic cations and characterization of the membrane by current–voltage curves. Journal of Colloid and Interface Science, 2005; 281: 179–187.
- 13 Scarazzato, T. ; Buzzi, D. C. ; Bernardes, A. M. ; Tenório, J. A. S.; Espinosa, D. C. R. . Effect of pH on the formation and transport of Cu(HEDP) complexes through permselective membranes in an electrodialysis system for metal plating wastewater treatment. In: 4th Industrial and Hazardous Waste Management, 2014, Crete. Crete 2014: 4th Industrial and Hazardous Waste Management, 2014.
- 14 Scarazzato, T.; Buzzi, D.C.; Espinosa, D.C.R.; Tenório, J.A.S. Aplicação de curvas corrente-voltagem para determinação da densidade de corrente limite de uma célula de eletrodialise para tratamento de efluente contendo HEDP. In: 20º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2012 p. 9404-9410.