

Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade

Versão on-line ISSN 2319-2856

Volume 16, número 8. Curitiba – PR. jan/jun - 2019

Eletrodiálise: uma tecnologia limpa para o tratamento de efluentes galvânicos

Sergio Deitos Bittencourt

Graduado em Engenharia de Controle e Automação pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS). Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Especialista em Gestão Ambiental e Desenvolvimento Sustentável pelo Centro Universitário Internacional (UNINTER). Mestre na área de Processos de Fabricação na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Doutor em Ciência e Tecnologia dos Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

RESUMO

A galvanoplastia está entre os processos industriais que mais descartam contaminantes no meio ambiente. Os efluentes gerados contêm elevada carga de metais e sais que necessitam ser tratados, para recuperação da água e concentração dos produtos químicos. Isto pode ser alcançado com o emprego das metodologias de eletrodiálise (ED) e cronopotenciometria. A eletrodiálise tem se mostrado eficiente para a recuperação da água e a concentração de eletrólitos. Neste método eletroquímico de separação por membranas, as espécies iônicas em solução são transportadas através de membranas íon-seletivas pela aplicação de um campo elétrico, o que possibilita a separação de cátions e ânions, com a vantagem de remover os metais contaminantes e, simultaneamente, recuperar a água. A cronopotenciometria possibilita a análise do transporte dos íons através das membranas. Ao final do processo as águas apresentam contaminantes e condutividade compatíveis aos da água de abastecimento e uma solução concentrada que pode ser reaproveitada nos banhos de eletrodeposição.

Palavras-chave: tecnologias limpas; eletrodiálise; cronopotenciometria.

Electrodialysis: a clean technology for the treatment of galvanic effluents

Electrodialisis: una tecnología limpia para el tratamiento de efluentes galvânicos

ABSTRACT

The metal finishing process is one of the industrial processes with the highest disposal of contaminants in the environment. The produced waste contains a high level of metals and salts and requires treatment, in order to reuse chemicals and water. This can be achieved with the use of electrodialysis (ED) and chronopotentiometric methodologies. The electrodialysis has been considered effective to water recovery and electrolyte concentration. In this electrochemical membrane separation process, the ionic species in solution are transported through ion-exchange membranes by applying an electric field, which allows the separation of cations and anions. This process has the advantage of removing metals, while recovering the water, at the same time. Chronopotentiometry makes it possible to analyze the transport of ions through the membranes. At the end of the process, the water presents contaminants and conductivity compatible with the water supply and a concentrated solution that can be reused in the electrodeposition baths.

Keywords: Clean technologies. Electrodialysis. Chronopotentiometry.

RESUMEN

La galvanoplastia está entre los procesos industriales que más desechan contaminantes en el medioambiente. Los efluentes generados contienen elevada carga de metales y sales que necesitan ser tratados, para la recuperación del agua y la concentración de los productos químicos. Eso puede ser logrado con el empleo de las metodologías de electrodiálisis (ED) y concentración de electrolitos. En ese método electroquímico de separación por membranas, las especies iónicas en solución son transportadas a través de membranas ion-selectivas por la aplicación de un campo eléctrico, lo que permite la separación de cationes y aniones, con la ventaja de remover los metales contaminantes y, al mismo tiempo, recuperar el agua. La cronopotenciometría posibilita el análisis del transporte de los iones a través de las membranas. Al finalizar el proceso, las aguas presentan contaminantes y conductividad compatibles con los del agua de consumo e una solución concentrada que puede ser reaprovechada en los baños de electrodeposición.

Palabras-clave: tecnologías limpias; electrodiálisis; cronopotenciometría.

INTRODUÇÃO

A contaminação das águas por substâncias tóxicas como metais pesados e produtos químicos, utilizados nos métodos de galvanoplastia, representa um problema socioambiental que vem recebendo a atenção de empresas e agências de proteção ambiental nos últimos anos. O descarte de efluentes contendo estas substâncias tem sido rigorosamente controlado por órgãos governamentais, com o propósito de diminuir os impactos ambientais, determinando o tratamento dos efluentes industriais a limites de concentração cada vez mais rígidos antes de sua eliminação no meio ambiente (STREIT, RODRIGUES, FERREIRA, 2014, p. 92).

Os processos galvânicos originam quantidades significativas de efluentes líquidos e emissões gasosas com elevada carga tóxica, em decorrência dos metais e sais provenientes dos banhos de eletrodeposição (DAYLAN, CILIZ, MAMMODOV, 2013, p. 1). Salienta-se a necessidade de grande volume de água, principalmente na etapa de lavagem das peças (responsável por 90% das águas consumidas no processo), em que os produtos químicos são arrastados dos banhos, contaminando as águas de lavagem (BRESAOLA, CARRARA, 2000, p. 2).

O tratamento de efluentes de maneira convencional, como por meio da coagulação e da floculação, se baseiam na transferência de fase, líquido para sólido, através da adição de produtos químicos que gera o lodo galvânico (KURNIAWAN, CHAN, LO, BABEL, 2006, p. 84). Este, por sua toxicidade, deve ser disposto em centrais licenciadas. Os métodos convencionais além do consumo de reagentes e de gerar novos resíduos, não possibilitam a reutilização da água de lavagem ou a recuperação dos componentes usados nos banhos galvânicos (BENVENUTI, 2012, p. 1). Desta forma, tecnologias limpas têm sido desenvolvidas para o tratamento dos efluentes de galvanoplastia (DAYLAN, CILIZ, MAMMODOV, 2013, p. 1).

A eletrodialise é um processo baseado na separação por membranas íon-seletivas, no qual os cátions e os ânions de uma solução são separados através da utilização de um campo elétrico. Este método possibilita a reutilização da água e dos produtos químicos utilizados no processo produtivo. Na aplicação da ED, os principais parâmetros que devem ser estudados buscando melhores condições de uso são o transporte iônico, a densidade de corrente limite, a polarização por concentração e a extração percentual (BUZZI, 2012, p. 21).

O estudo dos processos de transferência de massa na utilização da eletrodialise poderá fornecer importantes informações a respeito do entupimento das membranas por moléculas orgânicas “fouling” ou por depósitos minerais “scaling” (BERNARDES, RODRIGUES, FERREIRA, 2014, p. 17).

A cronopotenciometria é uma técnica eletroquímica que possibilita monitorar a variação do potencial em função do tempo para uma determinada corrente aplicada. Desta forma, permite a obtenção de informações adicionais com relação à transferência dos íons através das membranas e a limitação do transporte que pode ocorrer por precipitação das espécies. A forma dos cronopotenciogramas proporciona, também, o esclarecimento de

efeitos secundários causados pela polarização por concentração, tais como dissociação da água, convecção gravitacional e eletroconvecção (MARDER, 2007, p. 27).

Com o propósito de colaborar para a reutilização das águas de lavagem nos processos de galvanoplastia foi realizada extensa pesquisa bibliográfica em referência a eletrodialise e a cronopotenciometria. Se buscava elucidar sobre o transporte iônico através das membranas íon-seletivas; sobre a obtenção das densidades de corrente limite a serem aplicadas no método; sobre a exposição do cálculo de extração percentual e fenômenos como polarização por concentração e entupimento das membranas por moléculas orgânicas ou por depósitos minerais.

GALVANOPLASTIA

O médico e cientista italiano Luigi Galvani em 1780 realizou pesquisas sobre eletricidade, as quais vieram posteriormente possibilitar o desenvolvimento do método de galvanoplastia (MARTIRADONNA, 2015, p. 267). O processo é utilizado para cobertura e proteção da superfície de peças metálicas, cerâmicas e poliméricas através de métodos químicos ou eletroquímicos. A técnica fundamenta-se na deposição de fina camada metálica na superfície do material. As reações eletroquímicas envolvidas não são espontâneas, sendo necessária a aplicação de corrente elétrica para que ocorra a eletrodeposição (PEREIRA, 2008, p. 7).

Ainda, de acordo com o mesmo autor, a deposição metálica tem como objetivo aumentar a durabilidade, proteger contra a corrosão, conferir efeito decorativo e melhorar as propriedades superficiais da peça, tais como, resistência, espessura, lubrificação e condutividade (PEREIRA, 2008, p. 7).

A eletrodeposição protege as peças por meio de dois mecanismos: como barreira ou por sacrifício. O níquel, o cobre, o cromo e muitos outros metais fornecem proteção por barreira, protegendo o substrato enquanto o depósito estiver intacto. Na ocorrência de defeitos no depósito o metal base irá corroer primeiro (BENVENUTI, 2012, p. 4). O zinco e o cádmio, quando depositados sobre aço, ferro fundido ou ligas de cobre, em decorrência de serem mais reativos que estes, apresentam comportamento de sacrifício, ou seja, corroem preferencialmente ao substrato metálico (LOTO, 2012, p. 314; MARDER, 2002, p. 4)

A deposição metálica no substrato é realizada através de banhos eletroquímicos ou químicos seguidos de lavagens (enxágues). Os efluentes gerados neste procedimento podem ocasionar danos ao meio ambiente, uma vez que os banhos de eletrodeposição possuem elevados teores de metais pesados. A reutilização das águas de lavagem tem o propósito de diminuir o emprego da água de mananciais e minimizar a quantidade de efluentes despejados nas redes de esgoto ou rios (RIANI, 2008, p. 18).

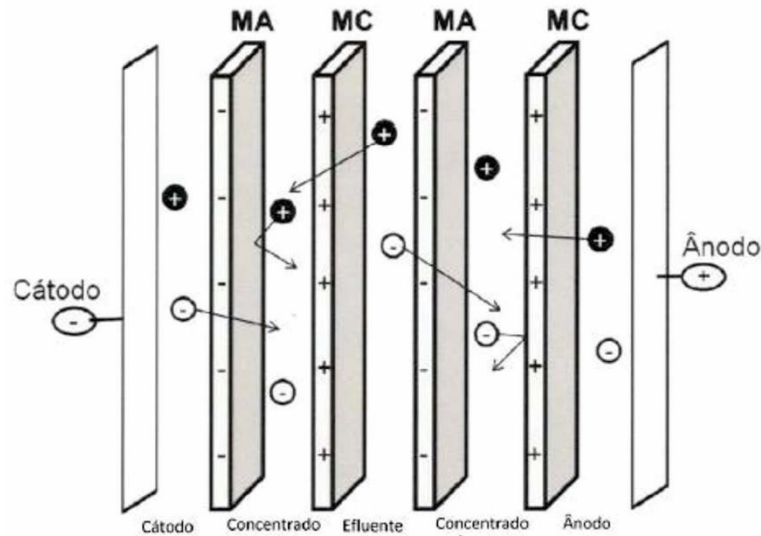
ELETRODIÁLISE (ED)

A ED é um método que utiliza membranas íon-seletivas e dois eletrodos, um positivo (ânodo) e outro negativo (cátodo) para a separação e transporte de espécies iônicas. Uma célula de eletrodiálise contendo soluções eletrolíticas, quando submetida à aplicação de uma corrente elétrica, efetua a transferência dos íons através das membranas, sendo que os cátions se deslocam em direção ao cátodo e os ânions em direção ao ânodo. Isto possibilita a obtenção de soluções mais concentradas e mais diluídas do que a inicial (BENVENUTI, 2012, p. 21). Embora o processo seja conhecido há mais de 100 anos, sua utilização se desenvolveu a partir de 1950, em paralelo ao aperfeiçoamento das membranas íon-seletivas (BERNARDES, RODRIGUES, FERREIRA, 2014, p. 12).

Na Figura 01 se apresenta um esquema amplamente utilizado nos processos de eletrodiálise (BUZZI, 2012, p. 39). Neste sistema as membranas catiônicas e aniônicas são dispostas alternadamente entre dois eletrodos posicionados nas extremidades da célula, formando compartimentos através dos quais as soluções podem circular, sendo que nesta configuração o número de compartimentos é variável (STREIT, 2011, p. 40).

Na adição de uma solução contendo espécies iônicas neste sistema e com o estabelecimento de uma corrente elétrica entre o ânodo e o cátodo, os cátions migram em direção ao cátodo e os ânions em direção ao ânodo. Deste modo, ocorrerá aumento da concentração dos íons nos compartimentos de concentração e redução nos compartimentos de diluição (BUZZI, 2012, p. 38). A solução de Na_2SO_4 é a mais utilizada nos compartimentos dos eletrodos em virtude de apresentar condutividade elétrica elevada (CHOI, MOON, 2003, p. 94).

Figura 01 - Transferência iônica em um sistema de ED



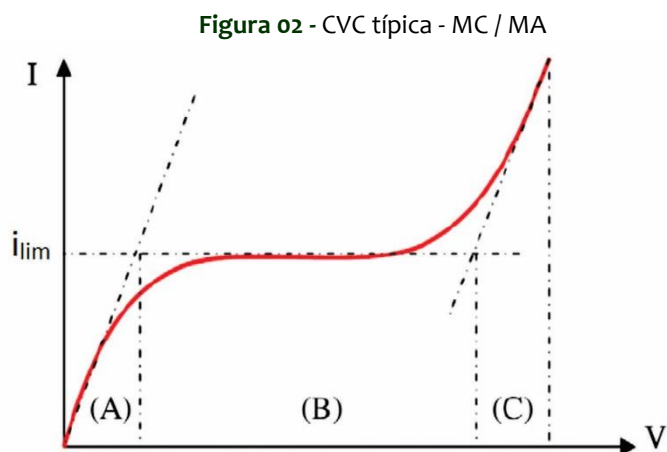
Fonte: BUZZI, 2012, p. 39.

Na Figura 01 é possível observar que as membranas íon-seletivas empregadas nos sistemas de ED possibilitam apenas o transporte de cátions ou ânions. Os cátions migram pelas membranas catiônicas (MC), mas são retidos pelas membranas aniônicas (MA). Da mesma forma, os ânions transportam-se pelas membranas aniônicas e permanecem retidos pelas membranas catiônicas (MACHADO, 2008, p. 24). De forma benéfica, a solução concentrada pode ser empregada para repor o banho de eletrodeposição e a solução diluída poderá ser reutilizada nos tanques de lavagem (MARDER, 2002, p. 37).

POLARIZAÇÃO POR CONCENTRAÇÃO E CORRENTE LIMITE

A polarização por concentração ocorre ao se aplicar uma corrente elétrica superior que uma membrana íon-seletiva é capaz de transmitir. Deste modo, quando a corrente aplicada ultrapassar a capacidade de transmissão da membrana, a concentração de íons na camada próxima à superfície da membrana cairá a zero. E, no outro lado da membrana, ocorrerá um acúmulo de íons, uma vez que estes chegarão em concentração maior do que aquela que se consegue difundir para o seio da solução (MARDER, HERRANZ, 2014, p. 27).

O valor da corrente limite (i_{lim}) pode ser determinado por meio das curvas corrente-potencial (CVC). Esta técnica relaciona a corrente elétrica aplicada (I) ao potencial da membrana (V). A Figura 02 exhibe as três regiões típicas de uma CVC para uma membrana íon-seletiva (ZERDOUMI, OULMI, BENSLIMANE, 2014, p. 43).



Fonte: ZERDOUMI, OULMI, BENSLIMANE, 2014, p. 43.

Região A - Esta região mostra uma relação linear entre corrente e potencial (região ôhmica), em que ocorre estado de quase equilíbrio na interface membrana/solução (ZERDOUMI, OULMI, BENSLIMANE, 2014, p. 42).

Região B - Nesta região a corrente varia muito pouco em relação ao potencial da membrana, formando uma região platô. Isto ocorre pela redução da concentração de íons próximos à superfície da membrana no compartimento diluído, devido ao fenômeno da polarização por concentração (MARDER, 2007, p. 23).

Região C - Esta região é caracterizada por um novo aumento de corrente, em que o aumento do potencial ocorre concomitantemente com o incremento da corrente aplicada. Isto ocorre, possivelmente, pelo transporte dos íons H^+ (por meio das membranas catiônicas) e pelos radicais de hidroxila OH^- (através das membranas aniônicas) formados pelo fenômeno da dissociação de água (BUZZI, 2012, p. 45).

Com o propósito de diminuir o consumo de energia, evitar o fenômeno da polarização por concentração e o aumento da resistência próximo à superfície das membranas é recomendável a utilização de 70 a 80% do valor da corrente limite obtido em um sistema de eletrodialise (BUZZI, 2012, p. 113).

CRONOPOTENCIOMETRIA

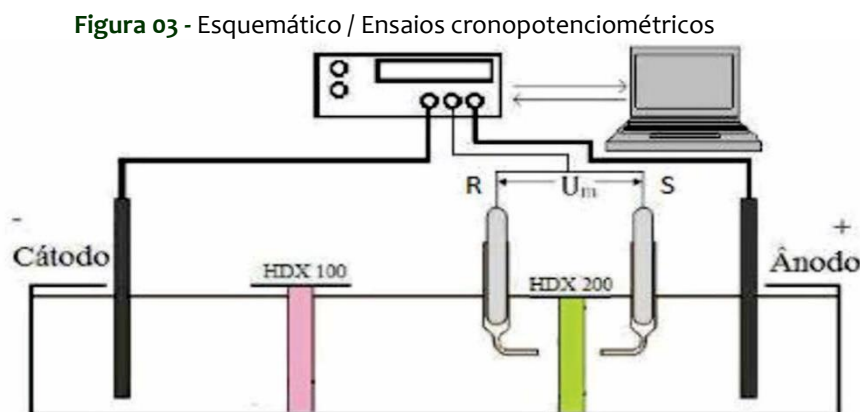
A cronopotenciometria é uma técnica de caracterização eletroquímica desenvolvida por Sand, em 1901 (BROTTO, 1989, p. 4), que permite a monitoração das variações no potencial elétrico de uma solução em relação ao tempo frente à aplicação de correntes

elétricas pré-estabelecidas. Este método tem sido utilizado para análise de fenômenos de transporte próximos à superfície das membranas de troca iônica (BUZZI, 2012, 47).

A caracterização das membranas íon-seletivas sob a aplicação de densidade de corrente é relevante para esclarecer o comportamento do transporte iônico. A cronopotenciometria fornece relevantes subsídios dos efeitos secundários ocasionados pela polarização por concentração (dissociação da água, convecção gravitacional e eletroconvecção). Possibilita verificar o entupimento das membranas por moléculas orgânicas (fouling) ou por depósitos minerais (scaling), que podem ser fatores limitantes nos sistemas de eletrodialise (MARDER, 2007, p. 27).

PRINCÍPIO DA TÉCNICA

Os cronopotenciogramas podem ser obtidos através da aplicação de pulsos de corrente elétrica entre dois eletrodos dispostos nas extremidades de uma célula eletroquímica. Deve ser utilizada no mínimo uma membrana íon-seletiva separando os compartimentos, contendo a mesma solução, com igual concentração inicial (DLUGOLECKI, ANET, METZ, NIJMEIJER, WESSLING, 2010, p. 164). O registro da diferença de potencial da membrana é obtido através de dois eletrodos de referência de Ag/AgCl imersos em capilares de Luggin. A Figura 03 mostra um esquemático para realização dos ensaios cronopotenciométricos (BUZZI, 2012, p. 64).

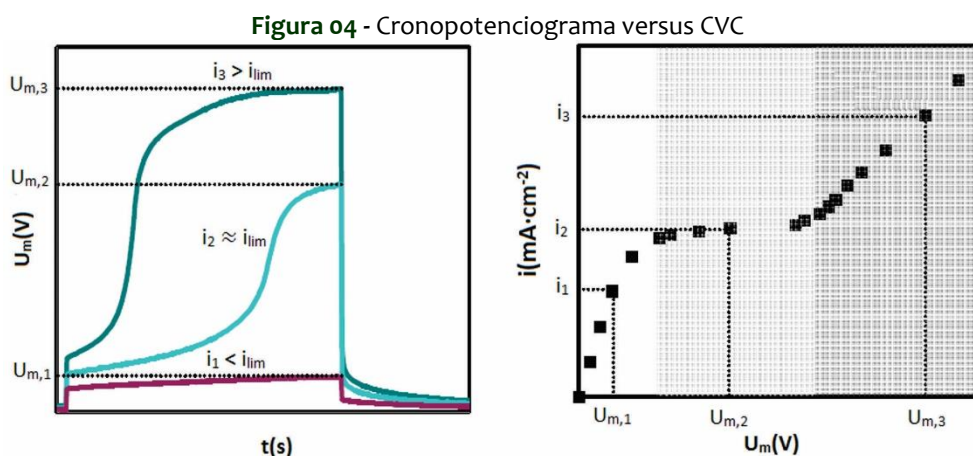


Fonte: BUZZI, 2012, p. 64.

O desenvolvimento de uma curva cronopotenciométrica é condicionado à corrente aplicada, possibilitando a ocorrência de três tipos de respostas, de acordo com os itens descritos em (a), (b) e (c) (BUZZI, 2012, p. 47).

- (a) Para densidades de corrente inferiores à corrente limite.
- (b) Para densidades de corrente de valor aproximado à corrente limite.
- (c) Para densidades de corrente superiores à corrente limite.

A Figura 04 elucida a relação entre as densidades de corrente aplicadas nas curvas cronopotenciométricas e as regiões da CVC (CALATAYUD, 2014, p. 66).



Fonte: CALATAYUD, 2014, p. 66.

Na utilização de densidades de corrente inferiores à da corrente limite ($i < i_{lim}$) as curvas cronopotenciométricas são semelhantes ao pulso de corrente da diferença de potencial entre os dois eletrodos arranjados próximos à superfície da membrana. Ao aplicar-se a corrente elétrica observa-se aumento subsequente no potencial do cronopotenciograma, que é associado à resistência ôhmica do sistema membrana/solução (PISMENSKAIA, SISTAT, HUGUET, NIKONENKO, PORCEULLY, 2004, p. 65).

Quando o pulso de corrente atinge valor aproximado da corrente limite ($i \approx i_{lim}$) ocorre um aumento brusco do potencial da membrana durante a aplicação da corrente (região platô). Isto se deve à diminuição dos íons próximos à superfície da membrana, no compartimento diluído, reduzindo o transporte de íons e elevando a resistência elétrica do

sistema membrana/solução (CALATAYUD, BUZZI, GABALDÓN, BERNARDES, TENÓRIO, 2014, p. 52).

Para densidades de corrente superiores à corrente limite ($i > i_{lim}$), o sistema torna-se inconstante em razão da força do campo elétrico e da diminuição da concentração de íons na interface membrana/solução. Nesta situação, o transporte iônico através das membranas pode, outra vez, ser aumentado em consequência de novos fenômenos de transferência iônica. Destes, os mais relevantes são a convecção gravitacional e a eletroconvecção (CALATAYUD, 2014, p. 65).

FENÔMENOS CRONOPOTENCIOMÉTRICOS PARA USO EM ED

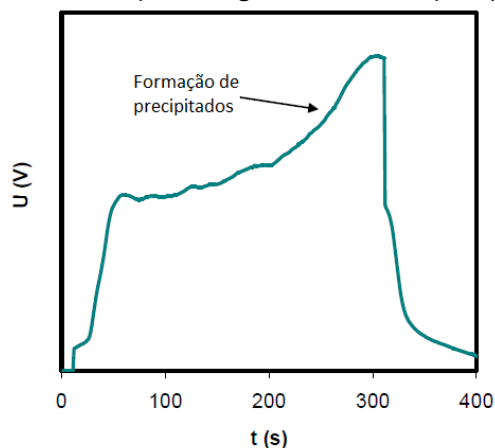
Os fenômenos avaliados através da técnica de cronopotenciometria ocorrem na aplicação de densidades de corrente superiores à corrente limite (região sobrelimite) em uma célula eletroquímica (MARDER, HERRANZ, 2014, p. 33).

PRECIPITAÇÃO EM MEMBRANAS ÍON-SELETIVAS

Com o propósito de constatar a viabilidade técnica dos sistemas de ED, se faz necessário conhecer o mecanismo de transferência de massa que prevalece em cada situação. Para a determinação deste mecanismo é imprescindível uma verificação minuciosa da resposta cronopotenciométrica das membranas íon-seletivas (DLUGOLECKI, ANET, METZ, NIJMEIJER, WESSLING, 2010, p. 164).

O gráfico da Figura 05 mostra a curva cronopotenciométrica ao ocorrer formação de precipitado na superfície da membrana catiônica. Isto origina aumento da resistência elétrica da membrana em razão das dificuldades de transporte dos íons. A elevação da resistência é verificada pelo acréscimo do potencial (V) em função do tempo (s) no cronopotenciograma (CALATAYUD, 2014, p. 183).

Figura 05 - Cronopotenciograma revelando precipitado



Fonte: CALATAYUD, 2014, p. 183.

O aumento do potencial observado na Figura 06 é creditado a um acréscimo na resistência da membrana catiônica em razão da formação de precipitado. Este pode ocorrer em decorrência da dissociação da água em íons H^+ e OH^- , o que determina mudanças do pH dos eletrólitos próximos à face das membranas e o depósito de hidróxidos metálicos nas membranas (MARDER, 2007, p. 35).

A formação de precipitados na superfície da membrana catiônica é fator limitante para a ED. Isto obstrui os poros da membrana, provocando acréscimo da resistência e do consumo energético do sistema, diminuindo a capacidade de transferência dos íons e a vida útil das membranas (BUZZI, 2012, p. 128).

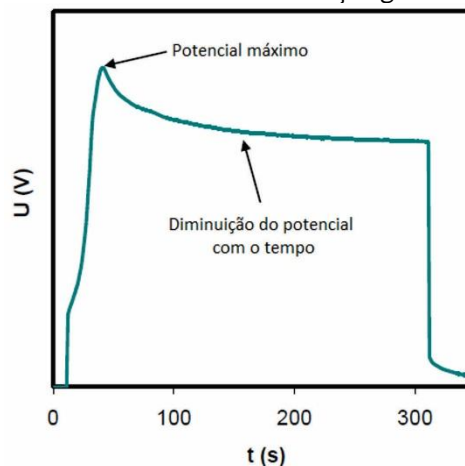
CONVECÇÃO GRAVITACIONAL

Em sistemas empregando membranas íon-seletivas, quando ocorre a polarização por concentração, se formam gradientes de concentração próximos à superfície da membrana. A concentração dos íons na camada limite de difusão (camada próxima à face da membrana) é menor quando comparada à concentração no seio da solução. Isto proporciona uma elevação na resistência e pode inferir a formação de gradientes de temperatura próximos à membrana. Em razão da formação de gradientes de concentração e temperatura, existe a probabilidade de formar-se um gradiente de densidade entre o seio da solução e a superfície da membrana. Esta distribuição não uniforme da densidade da solução poderá causar a convecção gravitacional. O aparecimento deste fenômeno pode

ocasionar a destruição parcial da camada limite de difusão aumentando, desta forma, o fluxo das espécies iônicas em direção à superfície da membrana (MARDER, 2007, p. 25).

A curva apresentada na Figura 06 é usualmente desenvolvida quando a convecção gravitacional é o principal mecanismo de transferência de massa, para densidades de corrente superiores à da corrente limite. Estas curvas mostram, inicialmente, um potencial máximo formado no instante em que é aplicado um pulso de corrente maior do que a corrente limite ($i > i_{lim}$) e quando são formados intensos gradientes de concentração próximos da superfície da membrana. Em etapa posterior, uma diferença de densidade se forma entre a camada próxima à superfície da membrana e o seio da solução. Com a ativação da convecção gravitacional se provoca a diminuição da espessura da camada limite de difusão. Este fenômeno se verifica nas curvas cronopotenciométricas como uma redução progressiva do potencial (V) em função do tempo (s) (CALATAYUD, 2014, p. 182).

Figura 06 - Mecanismo de convecção gravitacional



Fonte: CALATAYUD, 2014, p. 183.

ELETROCONVECÇÃO

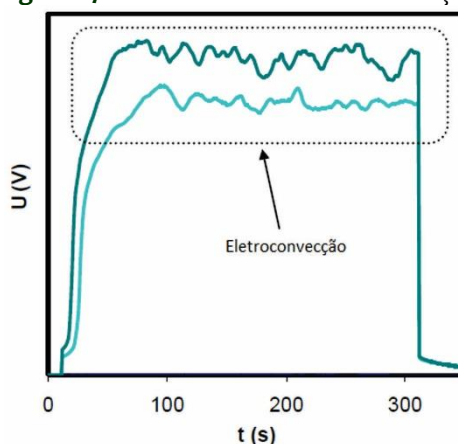
O principal mecanismo de transferência de massa em densidades de corrente superiores à i_{lim} para soluções diluídas é a eletroconvecção. Na aplicação de um campo elétrico excessivamente elevado, no interior da camada limite de difusão surge uma região que se caracteriza por um desvio da eletroneutralidade do eletrólito (NIKONENKO, PISMENSKAYA, BELOVA, SISTAT, HUGUET, POURCELLY, LARCHET, 2010, p. 114).

O aumento do potencial nesta região estabelece uma diferença de pressão, produzindo uma transferência de massa por convecção. O deslocamento destas cargas

arranjadas de modo não uniforme, sob o efeito do campo elétrico, gera um par de vórtices capaz de ocasionar a mistura da solução na região de polarização por concentração. Nesta condição, ocorre a destruição parcial da camada limite de difusão, derivando-se um aumento do fluxo das espécies iônicas do seio da solução em direção à superfície da membrana (MARDER, 2007, p. 27).

As curvas cronopotenciométricas mostradas na Figura 07 são características de sistemas onde a eletroconvecção é o principal fenômeno de transferência de massa, para densidades de corrente superiores à i_{lim} . Este mecanismo desenvolve vórtices que ocasionam distorções na camada limite de difusão, produzindo flutuações na medida da voltagem das membranas. As oscilações no potencial (V) com o tempo (s) registradas nos cronopotenciogramas mostram a predominância da eletroconvecção (CALATAYUD, 2014, p. 182).

Figura 07 - Mecanismo de eletroconvecção



Fonte: CALATAYUD, 2014, p. 182.

APLICAÇÕES E PARÂMETROS DA ELETRODIÁLISE

A metodologia da eletrodialise foi inicialmente utilizada em escala industrial para obtenção de água potável a partir da dessalinização da água salobra. Esta tecnologia pode ser usada, também, para concentrar soluções iônicas e separar espécies iônicas das não iônicas. A evolução do processo possibilitou seu emprego nos processos industriais de alimentos, químicos, medicamentos e no tratamento de efluentes (STRATHMANN, 2010, p. 268).

A concentração, a condutividade e o pH são os requisitos fundamentais para o monitoramento das soluções empregadas na técnica de ED. Entretanto, também devem ser controlados o potencial da célula e a corrente aplicada para a avaliação do sistema de eletrodialise. A análise dos processos de transferência de massa poderá fornecer subsídios essenciais em relação ao entupimento das membranas por moléculas orgânicas “fouling” ou por depósitos minerais “scaling”. É indispensável a verificação das condições dos processos eletroquímicos, como a polarização por concentração e a corrente limite. A eficiência do método é principalmente caracterizada pela extração percentual do sistema (MARDER, HERRANZ, 2014, p. 25).

A extração percentual determina a quantidade de massa ou a concentração de íons transportados do compartimento do efluente para o concentrado em um sistema de ED. Este dado pode ser calculado através da Equação 01 (BENVENUTI, 2012, p. 22).

$$Ep (\%) = [(C_i - C_f) / C_i] \times 100 \quad (\text{Equação 01})$$

Onde: Ep (%) = Extração percentual (%); C_i = Concentração inicial de íons no compartimento do efluente ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$); C_f = Concentração final de íons no compartimento do efluente ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$).

Uma planta de eletrodialise pode ser utilizada de maneira vantajosa, quando empregada no tratamento de efluentes de processos industriais, como no método de galvanoplastia, pois permite a recuperação e a reutilização da água e das substâncias químicas presentes (BERNARDES, RODRIGUES, FERREIRA, 2014, p. 21).

A reutilização das águas de lavagem tem a finalidade de minimizar a demanda da água de mananciais e diminuir a quantidade de efluentes lançados nas redes públicas de esgoto ou rios. A eletrodialise possibilita a remoção de contaminantes dos efluentes de galvanoplastia, produzindo ao final do processo água de lavagem no compartimento diluído, com condutividade compatível ao da água de abastecimento, que permite sua reutilização no processo. No compartimento concentrado é gerada uma solução que pode ser reaproveitada nos banhos de eletrodeposição (BUZZI, 2012, p. 51).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tratamento de efluentes de maneira convencional, como por coagulação e floculação geram o lodo galvânico, que por sua toxicidade determina custo adicional, pois deve ser disposto em centrais licenciadas.

A eletrodialise é um processo útil para a remoção de contaminantes dos efluentes de galvanoplastia. As águas de lavagem ao final do processo apresentam contaminantes e condutividade compatíveis ao da água de abastecimento. Este método possibilita a obtenção de uma solução concentrada que pode ser reaproveitada nos banhos de eletrodeposição.

A partir das curvas corrente-potencial (CVC) é possível a verificação da corrente elétrica limite que uma membrana íon-seletiva é capaz de transmitir. De forma que não venha a ocorrer precipitação sobre as membranas, usualmente, é utilizado 80% do valor encontrado (80% de i_{lim}).

A técnica eletroquímica de cronopotenciometria permite a verificação dos mecanismos de transferência de massa predominantes em sistemas de eletrodialise, com a utilização de diferentes densidades de corrente, o que possibilita a verificação de fatores limitantes em sistemas de ED.

O método de ED apresenta elevada eficiência, principalmente em termos de extração percentual de contaminantes, sendo indispensável o controle da corrente limite do sistema.

A eletrodialise reduz o emprego da água de mananciais. Ainda, o efluente de galvanoplastia não é lançado no meio ambiente (redes de esgoto ou rios), pois a técnica permite a recuperação e a reutilização da água e das substâncias químicas presentes.

REFERÊNCIAS

BENVENUTI, T. Avaliação da eletrodialise no tratamento de efluentes de processos de eletrodeposição de níquel. 115 f. Porto Alegre, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BERNARDES, A. M., RODRIGUES, M. A. S.; FERREIRA, J. Z. General aspects of electro dialysis. *Electrodialysis and water reuse: topics in mining, metallurgy and materials engineering*. Springer, 2014, p. 11-23.

BRESAOLA-JÚNIOR, R.; CARRARA, S. M. C. M. Reuso de águas residuárias geradas em processos de galvanoplastia. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre - RS, 2000, p. 1-6.

BROTTO, M. E. Comportamento eletroquímico do sistema $\text{Eu}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$ em meio propiônico estudado pela cronopotenciometria cíclica. 161 f. São Paulo, 1989. Dissertação (Mestrado em Química). Universidade de São Paulo.

BUZZI, D. C. Aplicação da eletrodialise no tratamento da drenagem ácida de minas visando a recuperação de ácido sulfúrico. 137 f. São Paulo, 2012. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CALATAYUD, M. C. M. Study of the transport of heavy metal ions through cation exchange membranes applied to the treatment of industrial effluents. 266 f. València, 2014. Thesis (Doctoral en Ingeniería y Producción Industrial). Universitat Politècnica de València.

CALATAYUD, M. C. M.; BUZZI, D. C.; GABALDÓN, G. M.; BERNARDES, A. M.; TENÓRIO, J. A. S.; HERRANZ, P. V. Ion transport through homogeneous and heterogeneous ion-exchange membranes in single salt and multicomponent electrolyte solutions. *Journal of Membrane Science*, v. 466, p. 45-57, 2014.

CHOI, J-H.; MOON, S-H. Structural change of ion-exchange membrane surfaces under high electric fields and its effects on membrane properties. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 265, p. 93-100, 2003.

DAYLAN, B.; CILIZ, N.; MAMMODOV, A. Hazardous process chemical and water consumption reduction through cleaner production application for a zinc electroplating industry in Istanbul. *Resources, Conservation and Recycling*, Istanbul, v. 81, p. 1-7, 2013.

DLUGOLECKI, P.; ANET, B.; METZ, S. J.; NIJMEIJER, K.; WESSLING, M. Transport limitations in ion exchange membranes at low salt concentrations. *Journal of Membrane Science*, v. 346, p. 163-171, 2010.

KURNIAWAN, T. A.; CHAN, G. Y. S.; LO, W-H.; BABEL, S. Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chemical Engineering Journal*, v. 118, p. 83-98, 2006.

LOTO, C. A. Electrodeposition of zinc from acid based solutions: a review and experimental study. *Asian Journal of Applied Sciences*, v. 5, p. 314-326, 2012.

MACHADO, M. B. Avaliação do processo de eletrodialise reversa no tratamento de efluentes de refinaria de petróleo. 177 f. Porto Alegre, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MARDER, L. Emprego da técnica de eletrodialise no tratamento de soluções aquosas contendo cádmio e cianeto. 136 f. Porto Alegre, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MARDER, L. Estudo do transporte de íons metálicos através de uma membrana íon-seletiva catiônica a partir da cronopotenciometria. 159 f. Porto Alegre, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MARDER, L.; HERRANZ, V. P. Electrodialysis control parameters. *Electrodialysis and water reuse: topics in mining, metallurgy and materials Engineering*, Springer, 2014, p. 25-39.

MARTIRADONNA, L. Bioelectronics: Soft implants for long-term use. *Nature Materials*, v. 14, p. 267, 2015.

NIKONENKO, V. V.; PISMENSKAYA, N. D.; BELOVA, E. I.; SISTAT, P.; HUGUET, P.; POURCELLY, G.; LARCHET, C. Intensive current transfer in membrane systems: modeling, mechanisms and application in electrodialysis. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 160, p. 101-123, 2010.

PEREIRA, F. V. Remoção de íons de zinco (II) de efluentes derivados de processos de galvanoplastia utilizando rejeitos de fibras vegetais modificadas quimicamente. 113 f. Ouro Preto, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Ouro Preto.

PISMENSKAIA, N.; SISTAT, P.; HUGUET, P.; NIKONENKO, V.; POURCELLY, G. Chronopotentiometry applied to the study of ion transfer through anion exchange membranes. *Journal of Membrane Science*, v. 228, p. 65-76, 2004.

RIANI, J. C. Utilização de resinas de troca iônica em efluentes de galvanoplastia. 121 f. São Paulo, 2008. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

STRATHMANN, H. Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications. *Desalination*, v. 264, p. 268-288, 2010.

STREIT, K. F. Estudo da aplicação de processos de separação com membranas no tratamento de efluentes de curtume: nanofiltração e eletrodialise. 182 f. Porto Alegre, 2011. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

STREIT, K. F.; RODRIGUES, M. A. S.; FERREIRA, J. Z. Electrodialysis treatment of tannery wastewater. *Electrodialysis and water reuse: topics in mining, metallurgy and materials engineering*. Springer, 2014, p. 91-99.

ZERDOUMI, R.; OULMI, K.; BENSLIMANE, S. Electrochemical characterization of the CMX cation exchange membrane in buffered solutions: effect on concentration polarization and counterions transport properties. *Desalination*, v. 340, p. 42-48, 2014.