

Tratamento de efluente proveniente de serigrafia via eletrocoagulação
Treatment of affluent derived from serigraphy by electrocoagulation

Recebimento dos originais: 15/10/2018

Aceitação para publicação: 10/12/2018

Jonathan David de Abreu

Graduado em Engenharia Sanitária pela Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Instituição: Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Endereço: R. Getúlio Vargas, 2822 – Bela Vista, Ibirama - SC, Brasil

E-mail: davide_abreu@hotmail.com

Camila Adam

Graduanda em Ciências Contábeis pela Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Instituição: Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Endereço: R. Getúlio Vargas, 2822 – Bela Vista, Ibirama - SC, Brasil

E-mail: adam.camila11@gmail.com

Ana Flavia Costa

Graduada em Engenharia Sanitária pela Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Instituição: Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Endereço: R. Getúlio Vargas, 2822 – Bela Vista, Ibirama - SC, Brasil

E-mail: anaflavia.c20@gmail.com

Sérgio Marian

Mestre em Contabilidade pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Instituição: Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Endereço: R. Getúlio Vargas, 2822 – Bela Vista, Ibirama - SC, Brasil

E-mail: sergio.marian@udesc.br

Luciano André Deitos Koslowski

Doutor em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Instituição: Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Endereço: R. Getúlio Vargas, 2822 – Bela Vista, Ibirama - SC, Brasil

E-mail: luciano.koslowski@udesc.br

RESUMO

O desenvolvimento industrial recente tem dificultado o tratamento de efluentes por processos já disseminados, induzindo a novas pesquisas nesta área. Na indústria serigráfica a remoção de cor é um problema grave, devido aos processos tradicionais aplicados como coagulação, flotação e sedimentação apresentarem eficiência de 40% a 90% no processo de tratamento. Processos de oxidação avançado tem sido estudados na remoção de compostos orgânicos estáveis em efluentes industriais. A presente pesquisa experimental apresentou como proposta a utilização de um reator eletroquímico constituído de um sistema bipolar com celas em paralelo, contendo eletrodos de diferentes materiais. Os eletrodos foram conectados em uma fonte do tipo conversor de corrente Alternada/corrente Contínua (CA/CC). A avaliação do desempenho do sistema foi realizada por meio da caracterização do efluente bruto proveniente de uma indústria de serigrafia, de forma a

verificar sua qualidade em relação aos seguintes parâmetros: turbidez, pH e sólidos sedimentáveis. As condições empregadas no sistema foram: concentração do eletrólito (10 g.L^{-1} e 4 g.L^{-1}), voltagem (20 V e 30 V), tempo de operação (120 minutos), e na ausência ou presença de agitação. Os dados obtidos foram quantitativos e avaliados comparativamente com as resoluções 357 e 430 do CONAMA. Os resultados sugerem que a melhor condição operacional indica uma remoção de 96% de turbidez do efluente, operando a uma voltagem de 30 V, sob agitação, tempo de reação de 120 minutos e concentração de eletrólito de 4 g.L^{-1} .

Palavras-chave: Eletrocoagulação; Efluente químico; Tratamento de efluentes.

ABSTRACT

Recent industrial development has made difficult the treatment of effluents by already disseminated processes and new research is mandatory. The removal of color in serigraphy is a serious concern due to traditional processes such as coagulation, flotation and sedimentation which have a 40 – 90% success in treatment. Advanced oxidation processes remove stable organic compounds. Experimental research has revealed the use of an electro-chemical reactor made of a bipolar system with parallel cells containing electrodes made of different materials. Electrodes were connected to a convertor alternate Current/continuous Current (CA/CC). Monitoring of the system's performance occurred by characterization of the crude effluent derived from a serigraphy industry to verify its quality with regard to the following parameters: turbidity, pH and sedimentary solids. The system's conditions were concentration of the electrolyte (10 g.L^{-1} e 4 g.L^{-1}), voltage (20 V and 30 V), operation time (120 minutes) and the absence and presence of agitation according to a statistical factorial planning. Data were quantitative and evaluated comparatively, following CONAMA norms 357 and 430. Results showed that the best operational condition demonstrated a 96% removal of turbidity from the effluent, at a voltage of 30 V, under agitation, reaction time of 120 minutes and electrolyte concentration of 4 g.L^{-1} .

Keywords: Electro-coagulation; Chemical effluent; Treatment of effluents.

1 INTRODUÇÃO

O intenso desenvolvimento industrial tem provocado mudanças relevantes nos sistemas de tratamento de efluentes, o que tem motivado cada vez mais insistentes estudos nesta área a fim de minimizar a ação de poluentes e descargas residuais provenientes da indústria nos rios. A remoção de resíduos orgânicos dentro da indústria hoje se faz necessária em parte pelo rigor das legislações ambientais e pela busca de certificados que garantam o produto com qualidade boa e que não impacte em prejuízos em termos ambientais.

Neste sentido, o elevado crescimento da demanda por bens, o investimento em tecnologias de produção resultou em um contrapeso a geração de resíduos sólidos e de resíduos líquidos. Não obstante, a necessidade de inovação ou melhora da qualidade de produtos de grandes empresas, denota na geração de resíduos de maior complexidade, tanto para o tratamento quanto a disposição

final. Assim, as tecnologias para tratamento também precisam inovar, e com isto muitos métodos alternativos para tratamento são desenvolvidos.

O processo de eletrocoagulação tem atraído substancial atenção no tratamento de efluentes industriais devido a sua versatilidade e compatibilidade ambiental. Neste contexto, consiste em método simples, com as seguintes vantagens: menor tempo de retenção, redução ou ausência da adição de substâncias químicas, rápida sedimentação dos flocos e redução na formação de lodo[1].

Na eletrocoagulação, a passagem da corrente elétrica é a responsável pelas diversas reações que ocorrem no efluente a ser tratado: a oxidação de compostos, a substituição iônica entre os eletrólitos inorgânicos e os sais orgânicos, com a consequente redução da concentração da matéria orgânica dissolvida na solução e a desestabilização das partículas coloidais[2].

Nesse processo de eletrocoagulação, íons são produzidos no processo e envolve as seguintes etapas: (a) formação do coagulante pela oxidação eletrolítica do eletrodo de sacrifício, ou seja, o eletrodo que perde elétrons; (b) desestabilização dos contaminantes, suspensão das partículas e quebra de emulsões; (c) agregação das fases desestabilizadas para formar flocos. Neste contexto, a água sofre eletrólise em reação paralela, gerando pequenas bolhas de oxigênio no ânodo e bolhas de hidrogênio no cátodo. As bolhas formadas atraem particularmente as partículas floculadas e, por meio de flutuação natural, os poluentes floculados flutam até a superfície. A eletrofloculação é a combinação dos processos de eletrocoagulação e eletroflotação, já que o primeiro consiste na geração de íons metálicos para a posterior formação do agente coagulante e a eletroflotação, na geração dos gases hidrogênio e oxigênio pela eletrólise da água[3].

O aumento da densidade de corrente (A/cm^2) depende efetivamente do aumento da intensidade da corrente, da natureza do eletrodo e do eletrólito, influencia no processo de eletrocoagulação. O aumento na intensidade de corrente provoca um aumento da migração de cátions da solução para o cátodo com a deposição de ânion e aumento da migração de ânions da solução para o ânodo com a respectiva deposição de cátions para a solução. Desta forma gera-se um aumento da taxa da reação e serve para caracterizar a cinética de equilíbrio pela elevação da densidade de corrente. A resposta para dinâmica reacional é o aumento na porcentagem (%) de remoção de DQO (Demanda Química de Oxigênio) por kwh, e consequente aumento na eficiência no processo de tratamento[4].

A condutividade dos eletrólitos, outro fator que influi diretamente na eletrocoagulação, varia bastante com as concentrações. A comparação das condutâncias de diferentes eletrólitos é mais significativa quando se toma em consideração a concentração. O aumento da concentração do eletrólito na solução promove um aumento da condutividade na solução até atingir um ponto máximo, onde a partir deste ponto ocorrerá uma diminuição desta concentração. Esse aumento da

concentração do eletrólito e resulta em aumento da velocidade de reação e aumento da densidade de corrente permitindo uma oxidação mais rápida. Na comparação de condutividades molares de diferentes eletrólitos, deve-se considerar condutividades molares de soluções nas quais as quantidades de substância que perfazem um mol apresentem mesmo número de cargas. [4]

Os resultados sugerem aumento da condutividade molar à medida que a concentração diminui, tendendo a um valor máximo, conhecido como condutividade molar limite designada pelo símbolo Λ_{∞} [4]. Neste caso, destacam-se a presença de alguns eletrólitos como o cloreto de sódio (NaCl) ou cloreto de potássio (KCl) contribuindo no aumento da condutividade molar em toda faixa de concentrações consideradas (eletrólitos fortes). O efluente submetido ao tratamento sob agitação promove um aumento na migração de cátions e ânions da solução para o eletrólito, provocando um aumento na velocidade de reação e conseqüentemente de oxidação de matéria. Quanto maior essa agitação, maior será a velocidade da reação[4].

No presente estudo, a eficiência do tratamento foi mensurada por meio dos seguintes parâmetros: turbidez, sólidos suspensos e pH mensurados ao final da eletrocoagulação com a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA N° 357, de 17 de março de 2005, que “Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências”[5] e a Resolução do CONAMA N° 430 de 13 de maio de 2011, que “Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n° 357” [6]. A Resolução 357/2005 estabelece padrões para cada classe de rio. Sabendo-se que o rio selecionado para destinação do efluente é o Rio Hercílio, da cidade de Ibirama, de classe 2, conforme portaria n° 024/1979 que estabelece classificação dos cursos de água do Estado de Santa Catarina, deve-se respeitar a turbidez de 100 UNT[5]. O Artigo 16 da segunda resolução, estabelece que o pH deve compreender uma faixa de 5 a 9 e os materiais sedimentáveis devem ser limitados a concentração de 1 mL.L^{-1} em teste de 1 hora em cone Inhoff para seu lançamento[6].

No processo eletroquímico, os poluentes são degradados por qualquer um dos processos de oxidação direta ou indireta. O processo de eletrocoagulação ocorre por meio de reações eletrolíticas na superfície do eletrodo, que dissolvem o ânodo de forma contínua, gerando íons [7,8]. Os íons são hidrolisados imediatamente ao hidróxido polimérico metálico correspondente ao material de confecção do eletrodo, exercendo o fenômeno da coagulação por permitir a combinação dos cátions com as partículas negativas carregadas e desestabilizá-las[7, 8]. No primeiro caso a reação anódica da oxidação permite a adsorção dos poluentes na superfície do ânodo e seguida transferência de elétrons. No processo de oxidação indireta, oxidantes fortes como o íon hipoclorito, cloro, ozônio

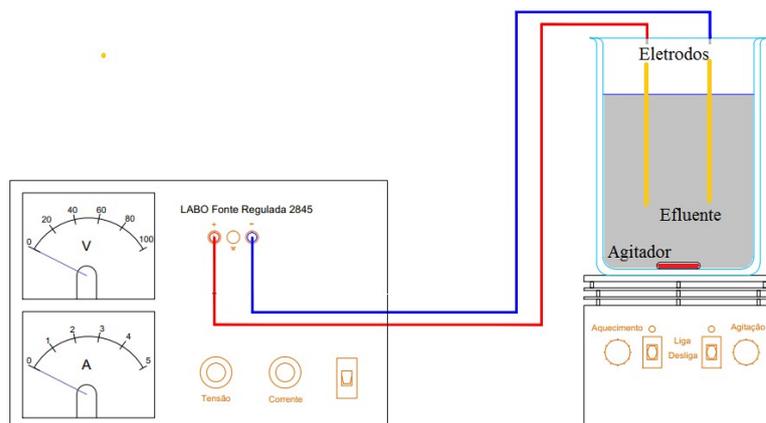
(O₃) e peróxido de hidrogênio são gerados no processo eletroquímico, sendo os poluentes degradados na solução pela reação de oxidação e redução com esse oxidante gerado[2,9].

2 METODOLOGIA

A proposta do presente estudo foi a de avaliar experimentalmente a eficiência do processo de remoção de cor do efluente proveniente de serigrafia. A análise da redução de cor do efluente foi realizada utilizando um turbidímetro portátil (HANNA HI 93703), sendo retiradas alíquotas de 10 mL para a análise. Nesse sentido, foi empregado o tempo de 2 horas para a reação de eletrocoagulação. Os seguintes eletrodos metálicos foram utilizados neste estudo: zinco e latão com área de 24,8 cm².

O método de eletrocoagulação foi realizado empregando uma fonte estabilizadora de corrente contínua (HD 109 marca Hidrodidática), com faixa de voltagem de 0 a 100 Volts, e entradas de corrente de 3 A e 5 A.

Figura 1 – Reator eletroquímico empregado no experimento.



O pH das soluções analisadas foi determinada em peagâmetro digital (HI3221 HANNA) e o teste de sólidos sedimentáveis realizados em cone de Imhoff (Laborglass).

3 RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos durante a realização dos ensaios de redução de cor do efluente proveniente de uma empresa de serigrafia. Com o objetivo de avaliar a redução de sólidos totais presentes no efluente, fez-se necessário analisar a turbidez no decorrer do processo de agitação constante e que a mesma apresentou pouca redução. A dificuldade em reduzir a turbidez foi evidenciada pela formação de lodo proveniente do processo de oxidação do efluente de serigrafia sendo portanto necessário o aumento da intensidade de corrente, apontando uma redução na resistência a oxidação conforme sumarizado na Tabela 1.

Tabela 1 – Avaliação da turbidez em relação as variáveis do processo.

| Experimento | Corrente | Voltagem e | Eletrólito (NaCl) | Eletrólito | Agitação | pH Inicial | Turbidez 0 | Turbidez 20' | Turbidez 40' | Turbidez 60' | Turbidez 90' | Turbidez 120' | Turbidez Final (após) |
|-------------|----------|------------|-------------------|------------|----------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-----------------------|
| 1 | 30v | e | 4g | Zinc | Sim | 12,5 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 100 | 100 | 532 |
| | 3A | | | o | | 4 | 0 > | > | > | > | 0 > | 0 > | |
| 2 | 30v | e | - | Zinc | Sim | 12,1 | 460 | 460 | 460 | 460 | 460 | 460 | 70 |
| | 3A | | | o | | | | | | | | | |
| 3 | 20V | e | 4g | Zinc | Sim | 12,1 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 66 |
| | 5A | | | o | | | | | | | | | |
| 4 | 30v | e | 4g | Zinc | Não | 12,1 | 93 | 86 | (1) | (1) | (1) | (1) | (1) |
| | 3A | | | o | | 2 | | | | | | | |
| 5 | 20V | e | - | Zinc | Sim | 11,5 | 102 | 102 | 102 | 102 | 102 | 102 | 84 |
| | 5A | | | o | | 7 | | | | | | | |
| 6 | 20V | e | - | Latã | Sim | 12,0 | 103 | 103 | 103 | 103 | 103 | 103 | 77 |
| | 5A | | | o | | 3 | | | | | | | |
| 7 | 30V | e | - | Latã | Sim | 1,8 | 268 | 270 | 302 | 331 | 331 | 331 | 331 |
| | 3A | | | o | | | | | | | | | |
| 8 | 20V | e | 4g | Latã | Sim | 2 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 9.75 |
| | 5A | | | o | | | | | | | | | |
| 9 | 30v | e | 4g | Latã | Sim | 2 | 474 | 474 | 474 | 474 | 474 | 474 | 59 |
| | 3A | | | o | | | | | | | | | |
| 10 | 30v | e | 4g | Latã | Não | 2,04 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 100 | 100 | 136 |
| | 3A | | | o | | | 0 > | > | > | > | 0 > | 0 > | |

Não disponível

Os resultados obtidos para o parâmetro turbidez não atendem as diretrizes da resolução Conama 357 (< 5 NTU). Portanto, observa-se que a degradação do eletrodo de zinco não foi significativa, resultando em uma redução máxima de 46,8% no experimento 1, fato justificado pelo eletrodo de zinco apresentar baixo potencial padrão de redução.

Nos ensaios 8, 9 e 10 foi observada redução de cor na ordem de 96.1%, 87.55% e 86.4% respectivamente, sendo significativa a degradação do eletrodo de latão. A análise vislumbra resultados acima do estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 e CONAMA 430/2011. Comparativamente com os padrões de pH supracitados, os experimentos 2, 3, 5 e 6 apresentam

concordância com os limites estabelecidos com relação ao descarte destinado a um corpo hídrico classe 2. Sugere-se que um aumento na concentração de eletrólito associada a uma diminuição da distância dos eletrodos, resulta em aumento na taxa de oxidação e conseqüentemente na redução de cor. A adição de eletrólito e o conseqüente aumento da condutividade remete a redução do consumo de energia, por reduzir a resistência entre os eletrodos e contribui significativamente no aumento do valor da corrente para um mesmo potencial aplicado[10]. Deve-se enfatizar o fato da redução da distância entre os eletrodos potencializar a condutividade elétrica reduzindo substancialmente a resistência de transporte da matéria orgânica no eletrodo onde ocorre a oxidação.

Os testes destinados a avaliação de sólidos sedimentáveis foi desenvolvida empregando cone de Imhoff, pelo período de tempo de 1 hora avaliando a leitura final da turbidez conforme sumarizado na Tabela 2.

Tabela 2 – Análise dos Sólidos Sedimentáveis.

| Experimentos | Sólidos Sedimentáveis |
|---------------------|------------------------------|
| 1 | 0 mL.L ⁻¹ |
| 2 | 0 mL.L ⁻¹ |
| 3 | 0 mL.L ⁻¹ |
| 4 | 0 mL.L ⁻¹ |
| 5 | 0 mL.L ⁻¹ |
| 6 | 0,2 mL.L ⁻¹ |
| 7 | 0,6 mL.L ⁻¹ |
| 8 | 0 mL.L ⁻¹ |
| 9 | 0 mL.L ⁻¹ |
| 10 | 0 mL.L ⁻¹ |

Os dados da tabela 2 expressam valores de sólidos sedimentáveis abaixo do padrão exigido pela CONAMA 430 de 2011 para todos os experimentos realizados. Com base nos resultados finais dos testes realizados, elaborou-se um comparativo dos parâmetros em estudo (turbidez, pH e sólidos sedimentáveis) conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados comparativos referentes aos ensaios com maior redução de cor.

| Experimento | Turbidez (UNT) | Final Sólidos (mL.L⁻¹) | Sedimentáveis pH |
|--------------------|---------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------|
| 2 | 70 | 0 | 12.10* |
| 3 | 66 | 0 | 12.10* |
| 5 | 84 | 0 | 11.57* |
| 6 | 77 | 0.2 | 12.03* |
| 8 | 9.75 | 0 | 2.00* |
| 9 | 59 | 0 | 2.00* |

• Parâmetro não atende a Resolução Conama 357/2005.

A análise de dados da Tabela 3 ressalta que nenhum dos testes realizados atingiu os padrões exigidos pela legislação brasileira para disposição de efluentes em corpos hídricos, porém, em 60% dos casos, a proposta para atender os limites estabelecidos, seria a aplicação de uma maior voltagem proveniente da fonte estabilizadora e diminuição da distância entre os eletrodos. A grande dificuldade obtida com relação ao pH das amostras, foi a variação da concentração e a variedade dos tipos de efluentes utilizados na indústria de serigrafia.

4 CONCLUSÃO

A presente pesquisa desenvolvida em caráter experimental evidenciou o processo de eletrocoagulação aplicada ao tratamento de efluente serigráfico como alternativa eficaz na remoção de cor do efluente. Os resultados dos ensaios de turbidez apontam valores iniciais constantes, mas apresentando redução de 60% na cor do efluente após a etapa de sedimentação. Os ensaios experimentais 1, 4, 7 e 10 não atendem ao disposto à Resolução Conama 357/2005. O processo de tratamento via eletrocoagulação empregando zinco metálico como eletrodo apontou baixa eficiência no tratamento, entretanto destaca-se a excelente eficiência no tratamento empregando eletrodos de latão (96,1%) na presença de eletrólito (NaCl) e aumento da intensidade de corrente elétrica (5A). A análise de dados do parâmetro pH indica resultados não satisfatórios em todos os casos, sendo necessário realizar a correção do pH elevado (11.57-12.10) com solução ácida e pH baixo (2.0). Neste sentido, sugere-se desenvolver uma investigação com outras matérias metálicas (alumínio e ferro) com o objetivo de tornar o processo de tratamento do efluente gráfico mais eficiente.

REFERÊNCIAS

BOUAMRA, F., DROUCHE, N., AHMED, D. S., LOUNICI, H. (2012). Treatment of water loaded with orthophosphate by electrocoagulation. *Procedia engineering*, 33, 155-162.

DEL MONEGO, M. L. C. (2007). Degradação eletroquímica de corantes e efluentes da indústria têxtil (Doctoral dissertation, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba).

MENESES, J. D., VASCONCELOS, R. D. F., FERNANDES, T. D. F., ARAÚJO, G. T. D. (2012). Tratamento do efluente do biodiesel utilizando a eletrocoagulação/flotação: investigação dos parâmetros operacionais. *Química Nova*, 35(2), 235-240.

DENARO, A.R. Fundamentos de eletroquímica. 1ª edição, Edgard Blücher, São Paulo, SP. 1974.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE [CONAMA]. Resolução CONAMA 357 de 17 de março de 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>>.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE [CONAMA]. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>.

DROUCHE, N., AOUJ, S., HECINI, M., GHAF FOUR, N., LOUNICI, H., MAMERI, N. (2009). Study on the treatment of photovoltaic wastewater using electrocoagulation: Fluoride removal with aluminium electrodes—Characteristics of products. *Journal of Hazardous Materials*, 169(1-3), 65-69.

JOTIN, R., IBRAHIM, S., HALIMOON, N. (2012). Electro coagulation for removal of chemical oxygen demand in sanitary landfill leachate. *International Journal of Environmental Sciences*, 3(2), 921.

LEE, S. Y., GAGNON, G. A. (2014). Review of the factors relevant to the design and operation of an electrocoagulation system for wastewater treatment. *Environmental reviews*, 22(4), 421-429.

LEE, S. Y., GAGNON, G. A. (2016). Growth and structure of flocs following electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, 163, 162-168.