



137 - APLICAÇÃO DO MÉTODO ESTATÍSTICO DCCR NA REMOÇÃO DE CORANTES EM EFLUENTE TÊXTIL POR PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO

Fabiola Tomassoni⁽¹⁾

⁽¹⁾Engenheira Ambiental pela Faculdade União das Américas - UNIAMÉRICA. Mestre em Engenharia em Energia na Agricultura pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Doutora em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e Pós-doutoranda pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – CTC – UFSC.

Elisângela Edila Schneider⁽²⁾

⁽²⁾Engenheira Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Mestre e Doutora em Engenharia Química no Programa de Engenharia Química (PEQ) da COPPE/UFRJ. Atuou profissionalmente na Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE) e no Centro Brasileiro de Pesquisas da *General Electric*. Atualmente é pós-doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química na Universidade Federal de Santa Catarina (PósENQ/UFSC).

Cristiane Lisboa Giroletti⁽³⁾

⁽³⁾Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Universidade do Oeste de Santa Catarina (UNIOESC), Mestre em Engenharia Ambiental e Doutoranda em Engenharia Ambiental no Programa Pós-Graduação em Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Flávio Rubens Lapoli⁽⁴⁾

⁽⁴⁾Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo (USP). Professor adjunto no departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Maria Eliza Nagel Hassemer⁽⁵⁾

⁽⁵⁾Doutora em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Professora adjunta no departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Endereço⁽¹⁾: Campus Universitário UFSC/CTC. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Laboratório de Reuso de Água. Bairro Trindade - CEP 88040-900. Florianópolis - Santa Catarina. - Brasil - Tel: (48) 3721-7750 - e-mail: fabiola_tomassoni@hotmail.com

RESUMO

O presente trabalho avaliou a otimização do processo de eletrocoagulação através do método estatístico delineamento composto central rotacional (DCCR) aplicado em efluente têxtil sintético, a fim de se investigar o efeito da intensidade de corrente e do pH com relação à remoção dos corantes. A indústria têxtil se caracteriza pelo alto consumo de água e, conseqüentemente, pelos expressivos volumes de efluentes gerados. Os efluentes líquidos provenientes da indústria têxtil podem causar danos aos corpos receptores, representando um fator de risco sério à saúde, por apresentarem substâncias potencialmente tóxicas como os corantes. Em geral, o tratamento convencional destes efluentes não degrada/remove totalmente seus poluentes. Neste contexto, a eletrocoagulação foi investigada com o intuito de otimizar os parâmetros operacionais para remoção dos corantes *Levafix Brilliant Red* e *Remazol Preto B* 133%. Os resultados do processo de eletrocoagulação revelaram o potencial da aplicação do processo com valores de intensidade de corrente de 33A e pH inicial de 3, atingindo uma remoção de cor na ordem de 85%. O tempo de eletrólise estabelecido em 30 minutos contribuiu para a efetividade do processo no tratamento do efluente têxtil sintético e demonstrou capacidade para aplicação em efluentes em escala real.

PALAVRAS-CHAVE: Efluente têxtil, eletrocoagulação, DCCR.

INTRODUÇÃO

As indústrias têxteis representam uma parcela de grande importância na economia brasileira, ocupando lugar de destaque na economia nacional. Forte gerador de empregos e grande volume de produção e exportação, o valor da

produção da cadeia têxtil em 2017 foi cerca de R\$45 bilhões (ABIT, 2018). No entanto, o setor têxtil é um dos maiores consumidores de água, atingindo volumes entre 200 e 400 litros por quilograma de tecido acabado. Consequentemente, estas indústrias geram grandes volumes de efluentes, os quais, quando não corretamente tratados, podem causar sérios problemas de contaminação ambiental (HOLKAR et al., 2016).

O efluente têxtil é caracterizado por ser altamente colorido devido à presença de resíduos de corantes que não se fixam nas fibras durante o processo de tingimento. Estes efluentes podem apresentar alta complexidade e variabilidade de acordo com o tipo de atividade e processo industrial. Em geral, cerca de 90% dos produtos químicos utilizados no beneficiamento têxtil são eliminados após cumprirem seus objetivos e 20% dos corantes não são fixados à fibra durante o processo de tingimento (CARDOSO, 2012). Com o elevado consumo de água, o baixo aproveitamento dos insumos e a geração de efluentes com elevada carga orgânica, essa atividade se tornou um potencial poluidor do meio ambiente (KARTHIKEYAN et al., 2017).

Efeitos deletérios causados pelos corantes e seus insumos provocam poluição visual, alterações em ciclos biológicos, afetando principalmente processos de fotossíntese, penetração da radiação solar e, consequentemente, a solubilidade dos gases. Sua descarga nos corpos receptores potencializa os riscos à saúde das pessoas, os quais estão associados à entrada de componentes tóxicos nas cadeias alimentares de animais e seres humanos, podendo ser carcinogênicos e/ou mutagênicos (KUMAR et al., 2017).

Os processos convencionais de tratamento de efluentes, em geral, não são capazes de degradar/remover as estruturas moleculares complexas dos corantes, principalmente os corantes reativos, devido à sua estabilidade e difícil biodegradabilidade. Dependendo do processo utilizado, o seu tratamento pode gerar subprodutos mais nocivos do que o poluente original, entre outros inconvenientes como a geração de grandes quantidades de lodos contaminados. Devido a estas implicações ambientais, novas tecnologias têm sido buscadas para a degradação ou imobilização destes compostos, além da adequação dos efluentes tratados perante a legislação para lançamento no corpo receptor e reuso da água na própria indústria.

Dentre as novas tecnologias para o tratamento de efluentes, destaca-se a utilização da eletrocoagulação. Atualmente essa técnica é considerada versátil, de fácil operação e sem custos com reagentes químicos, sendo ambientalmente benigna (SEIFROTOVÁ et al., 2009; HOLKAR et al., 2016; SONG et al., 2017). A eletrocoagulação consiste em reações de oxidação, com a dissolução de ferro (Fe) ou alumínio (Al) anódicos e consequente produção de hidróxidos metálicos gelatinosos (pela hidrólise da água no cátodo) que desestabilizam e agregam as partículas, promovendo a adsorção dos contaminantes dissolvidos e a sua precipitação (MELO et al., 2008; SILVA et al., 2015; QI; YOU; REN, 2017). A técnica é baseada no processo de oxirredução gerado por uma corrente elétrica contínua, que promove a formação de flocos e consequentemente a geração de um efluente com elevada qualidade (CHEN, 2004; SEIFROTOVÁ et al., 2009).

Contudo, a eletrocoagulação é um processo complexo, que envolve fenômenos físicos, químicos e mecanismos que operam simultaneamente para remoção dos poluentes. Para liberar o agente coagulante que ajuda na formação dos flocos, uma diferença de potencial elétrica é aplicada nos eletrodos, para formação de complexos monoméricos e/ou poliméricos de hidróxidos metálicos (dependente do pH), que são responsáveis pela formação dos flocos (BENSADOK et al., 2007; GOLDR, et al., 2011). Portanto, a eficiência do processo da eletrocoagulação está diretamente relacionada à otimização do pH e da intensidade de corrente elétrica aplicada. Estes dois parâmetros determinam a efetividade do processo na remoção de poluentes e seus custos operacionais (GIORDANO; FILHO, 2000; GARCIA et al., 2015).

De acordo com MOLLAH et al. (2001), esses parâmetros operacionais são importantes na eletrocoagulação, afetando não apenas o tempo de resposta do processo, mas também influenciando fortemente o modo dominante de separação e remoção de poluentes. O efeito do pH é importante no processo, pois a máxima eficiência de remoção de poluentes ocorre no pH ótimo para determinado efluente, podendo variar dependendo das suas características (CAÑIZARES et al., 2005; KHANDEGAR; SAROHA, 2013). O mesmo acontece com a intensidade de corrente, responsável pela quantidade de coagulante liberada, e pelo tamanho e crescimento dos flocos no processo (HAKIZIMANA et al., 2017).

Devido às limitações de remoção da cor presente em efluentes têxteis via processos de tratamento convencionais, o processo de eletrocoagulação apresenta-se como uma excelente técnica, pois controlando a intensidade de corrente e o pH, consegue-se gerar o coagulante *in situ* e na quantidade mínima que leva à máxima eficiência de remoção.

OBJETIVO

O presente trabalho objetivou otimizar o processo de eletrocoagulação através do método estatístico delineamento composto central rotacional, considerando como principais parâmetros o pH inicial e a intensidade de corrente em função da remoção dos corantes do efluente têxtil.

METODOLOGIA

• Efluente Sintético

O efluente sintético foi preparado conforme a metodologia de Mo et al. (2007), utilizando 25% da concentração original proposta pelos autores, cuja composição está detalhada na Tabela 1. Na Figura 1 estão apresentadas as estruturas químicas dos corantes têxteis utilizados: a) *Levafix Brilliant Red* e b) *Remazol Preto B 133%*. As concentrações dos reagentes basearam-se na quantidade média encontrada em efluente têxtil industrial.

Tabela 1: Composição do efluente têxtil sintético.

| COMPOSIÇÃO | CONCENTRAÇÃO (g.L ⁻¹) |
|---|-----------------------------------|
| <i>Levafix Brilliant Red</i> | 0,020 |
| <i>Remazol Preto B 133%</i> | 0,020 |
| Cloreto de sódio (NaCl) | 2,000 |
| Álcool Polivinílico | 0,125 |
| Sulfato de sódio (Na ₂ SO ₄) | 0,188 |

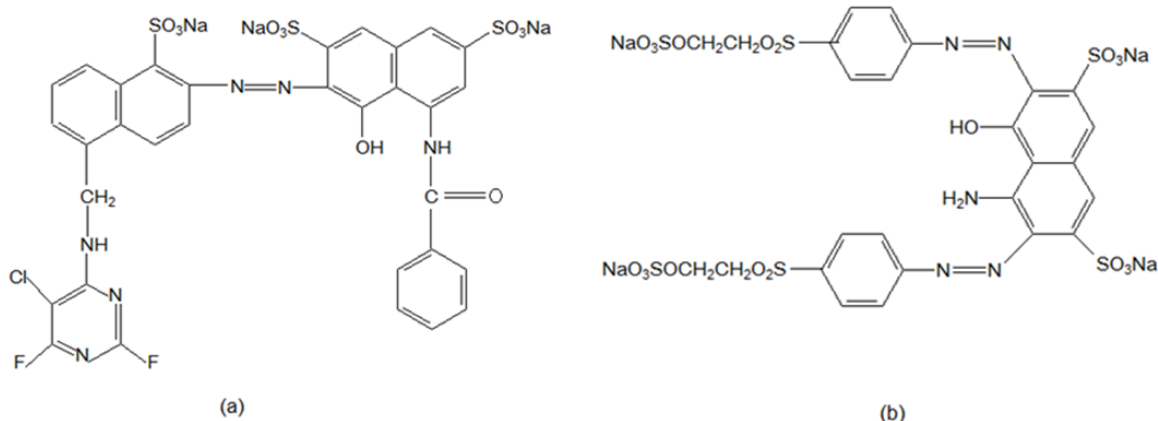


Figura 1: Estrutura química dos corantes: a) *Levafix Brilliant Red*; b) *Remazol Preto B 133%*.

• Sistema Reacional

Os experimentos foram realizados em um reator de eletrocoagulação de bancada, com volume útil de 1 L, constituído por um béquer de vidro como célula eletroquímica e equipado com dois pares de eletrodos de placas planas de alumínio (ânodo e cátodo), no formato retangular, com dimensões de 16 cm x 0,5 cm x 0,2 cm. A intensidade de corrente contínua aplicada foi controlada através da fonte de alimentação digital ajustável (modelo PS - 1001) com variação de corrente de 0 - 10 A e tensão de 0 - 30 V. O conjunto de eletrodos inseridos verticalmente no reator ficou parcialmente imerso na solução, obtendo como área efetiva 0,6435 m² e arranjado dentro da célula eletrolítica de modo monopolar paralelo. A representação esquemática do reator de eletrocoagulação é apresentada na Figura 2.

Para promover a homogeneidade do efluente durante o tempo de eletrólise, o reator recebeu um sistema de agitação, o qual operou com velocidade de agitação de 200 rpm, sendo desligada após cessar a aplicação da corrente. Este valor foi selecionado com base em alguns estudos da literatura (Kobyta et al., 2003; Can et al., 2006; Aoudj et al., 2010).

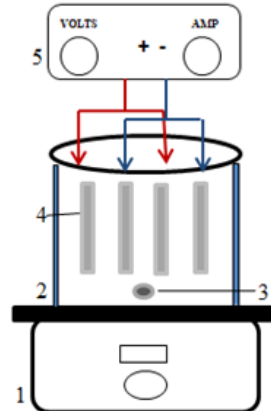


Figura 2: Representação esquemática do reator de eletrocoagulação monopolar paralelo:
1- Agitador magnético; 2- Célula eletroquímica; 3- Barra magnética; 4- Eletrodos de Alumínio; 5- Fonte de alimentação.

- **Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR)**

O delineamento composto central rotacional (DRRC) consiste na obtenção de um modelo matemático representativo em termos dos principais parâmetros que descrevem certos fenômenos, dentro de certo nível de confiança, utilizando o mínimo possível de experimentos. Desta forma, permite-se o uso de métodos estatísticos na análise dos dados obtidos, resultando em objetividade científica nas conclusões (CALADO; MONTGOMERY, 2003).

De modo a obter melhores condições operacionais do reator de eletrocoagulação, foram analisadas duas variáveis do processo, sendo elas: pH inicial da solução (X_1) e intensidade de corrente (X_2) e como variável dependente (resposta) a remoção dos corantes. Os valores das variáveis independentes foram definidos com base em estudos encontrados na literatura (CHANG et al., 2007; CAÑIZARES et al., 2007; MARTÍNEZ-HUITLE; BRILLAS, 2009; SECULA; CRETESCU; PRETESCU, 2011).

No DCCR foram utilizados quatro ensaios com pontos fatoriais (+1 e -1), quatro ensaios com os pontos axiais (+1,41 e -1,41) e quatro ensaios com os pontos centrais (0), totalizando 12 ensaios (executados em duplicata). A matriz do delineamento experimental da eletrocoagulação está representada na Tabela 2. O tempo de eletrólise foi determinado em função da remoção dos corantes no efluente através de ensaios preliminares que demonstraram remoção dos corantes na ordem de 80% após 30 minutos. Após a aplicação do processo de eletrocoagulação, as amostras foram mantidas em repouso por 60 minutos para sedimentação dos flocos, sendo posteriormente analisadas.

Como variável dependente do planejamento, a concentração dos corantes no efluente foi avaliada por espectrofotometria através da leitura da absorbância, utilizando espectrofotômetro (Hach, modelo DR/5000) no comprimento de onda de maior absorção do efluente na faixa do visível. Nas condições experimentais pode-se aplicar a lei de Lambert-Beer entre as concentrações dos corantes e a absorbância das soluções.

Posteriormente, a análise estatística dos resultados de todos os ensaios da matriz foi realizada por meio do programa *Statistica*® (Statsoft, Inc.), que possibilitou a obtenção do modelo matemático quadrático relacionando à remoção dos corantes com as variáveis testadas: intensidade de corrente e pH. A representação gráfica do modelo, com auxílio do gráfico de superfície de resposta, orientou a determinação da região ótima de operação da eletrocoagulação.

Tabela 2: Matriz do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR).

| | Ensaio | X ₁ | Intensidade de corrente (A) | X ₂ | pH |
|------------------|--------|----------------|-----------------------------|----------------|-----|
| Pontos Fatoriais | 1 | 1 | 43 | 1 | 3,5 |
| | 2 | 1 | 43 | -1 | 2,5 |
| | 3 | -1 | 23 | 1 | 3,5 |
| | 4 | -1 | 23 | -1 | 2,5 |
| Pontos Centrais | 5 | 0 | 33 | 0 | 3,0 |
| | 6 | 0 | 33 | 0 | 3,0 |
| | 7 | 0 | 33 | 0 | 3,0 |
| | 8 | 0 | 33 | 0 | 3,0 |
| Pontos Axiais | 9 | 1,41 | 53 | 0 | 3,0 |
| | 10 | -1,41 | 13 | 0 | 3,0 |
| | 11 | 0 | 33 | -1,41 | 4,0 |
| | 12 | 0 | 33 | -1,41 | 2,0 |

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O efluente sintético utilizado no experimento apresentou pH inicial de 7,0 e condutividade de 5,0 mS.cm⁻¹, sendo essas características semelhantes às de um efluente têxtil real após tratamento biológico. Na Figura 3 são apresentados os espectros de absorção do efluente sintético e de seus corantes constituintes. Pode-se observar que o espectro do efluente sintético é a soma dos espectros dos corantes *Levafix Brilliant Red* e *Remazol Preto B 133%*, formando assim uma curva com superposição de bandas de absorção.

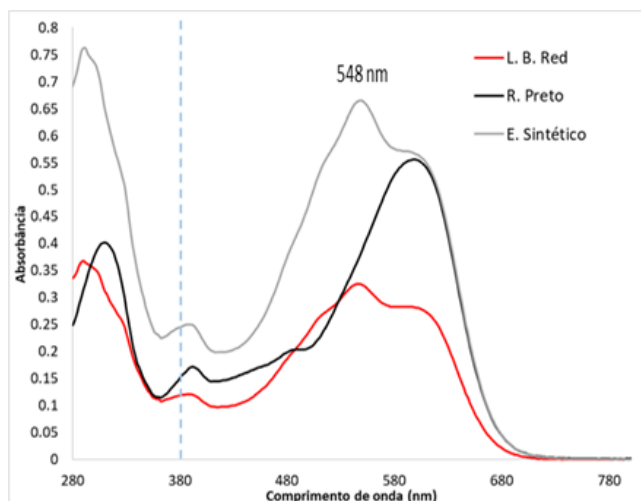


Figura 3: Espectros de absorção dos corantes *Levafix Brilliant Red* (-), *Remazol Preto B 133%* (-) e efluente sintético (-).

As absorções nos comprimentos de onda na região UV, correspondem aos grupos azo conjugados com anéis de benzeno e naftaleno. Já as absorções nos comprimentos de onda na região visível, correspondem aos grupos cromóforos hiperconjugados, responsáveis pela cor dos corantes (SILVERSTEIN, WEBBER, KIEMLE, 2007). A absorbância máxima na região do visível encontrada na varredura foi alcançada em 548 nm e esta foi utilizada para leitura da cor do efluente.

Os corantes do tipo azo são amplamente utilizados na indústria têxtil, pois apresentam boa relação de custo e facilidade de síntese, estando entre as mais importantes classes de corantes orgânicos com mais de três mil

corantes conhecidos. Por serem instáveis, são comumente mutáveis, com potencial cancerígeno e alta solubilidade em água, estes compostos livres no meio aquático são conhecidos como xenobióticos e podem propiciar a formação de compostos exógenos ao meio, acarretando alterações no sistema, prejudicando a fauna e a flora. Portanto, torna-se essencial um tratamento adequado para as águas residuais que contenham essa classe de corantes (HAQUE; SMITH; WONG, 2015).

As respostas de remoção dos corantes obtidas por meio do delineamento composto central rotacional e suas interações são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Matriz de resultados do DCCR do processo de eletrocoagulação.

| | Variáveis independentes | | Variável dependente |
|------------------|-----------------------------|-----|--------------------------|
| | Intensidade de corrente (A) | pH | Remoção dos corantes (%) |
| Ensaio 1 | 43 | 3,5 | 72,0 ± 1,7 |
| Ensaio 2 | 43 | 2,5 | 75,1 ± 1,5 |
| Ensaio 3 | 23 | 3,5 | 70,7 ± 1,6 |
| Ensaio 4 | 23 | 2,5 | 73,9 ± 0,9 |
| Ensaio 5 | 33 | 3,0 | 81,8 ± 1,5 |
| Ensaio 6 | 33 | 3,0 | 83,6 ± 0,3 |
| Ensaio 7 | 33 | 3,0 | 85,3 ± 0,7 |
| Ensaio 8 | 33 | 3,0 | 83,9 ± 0,9 |
| Ensaio 9 | 53 | 3,0 | 78,5 ± 1,2 |
| Ensaio 10 | 13 | 3,0 | 64,6 ± 0,9 |
| Ensaio 11 | 33 | 4,0 | 72,4 ± 2,3 |
| Ensaio 12 | 33 | 2,0 | 71,7 ± 1,8 |

Observa-se pela Tabela 3, que as melhores configurações para remoção dos corantes ocorreram nos ensaios 6, 7 e 8, com intensidade de corrente de 33 A e pH inicial de 3,0. Já o pior desempenho foi observado nos ensaios 3 e 10, onde a aplicação da intensidade de corrente foi de 23 e 13 A e o pH inicial de 3,5 e 3,0, respectivamente. CAN e colaboradores (2003) obtiveram uma taxa de remoção da cor de aproximadamente 97%, com pH ótimo igual a 3, concluindo que valores de pH entre 3 e 5 estimulam a formação de hidróxidos, porém valores de pH abaixo de 3 acabam retardando a formação dos flocos. O mesmo comportamento foi observado com a intensidade de corrente, em que valores altos deste parâmetro aumentam a velocidade de dissolução do ânodo, aumentando o número de flocos e, conseqüentemente, fornecendo maior remoção de poluentes.

Para validar o ajuste do modelo proposto com os resultados obtidos, realizou-se o teste da análise de variância (ANOVA) do modelo previsto para a remoção dos corantes (%), por meio do gráfico de Pareto, ilustrado na Figura 4. O gráfico de Pareto apresenta a significância dos resultados, com 95% de confiança, representado pela linha vermelha ($p = 0,05$). A extensão horizontal das barras fornece os resultados dos efeitos das variáveis lineares (L), quadráticas (Q) e da interação linear entre as variáveis independentes. Nota-se, na Figura 4, que os termos quadráticos das variáveis analisadas, pH inicial e intensidade de corrente, apresentaram, respectivamente, maior significância estatística, com sinal do efeito negativo para remoção dos corantes. Ou seja, à medida que houve um incremento nos valores de pH observou-se um decréscimo na eficiência de remoção dos corantes no efluente. Já a variável intensidade de corrente, em termos lineares, mostrou-se significativa para o mesmo intervalo e com sinal do efeito positivo, indicando aumento na remoção da concentração dos corantes. A interação entre as variáveis (1L by 2L) e pH (L), não apontaram significância estatística.

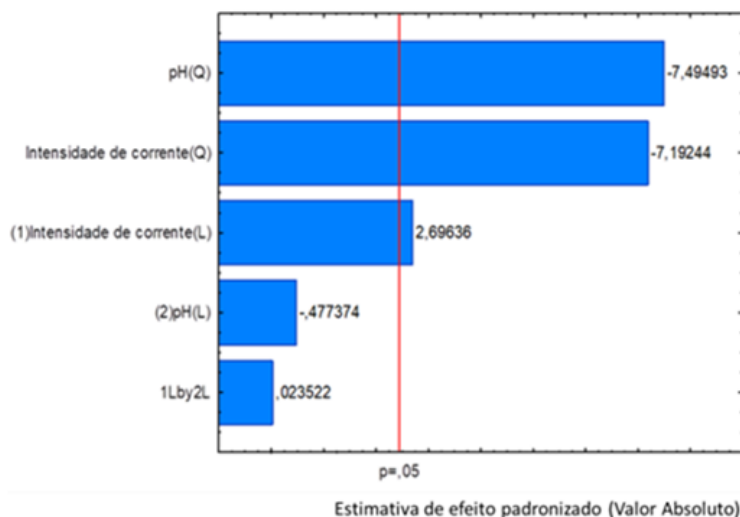


Figura 4: Gráfico de Pareto para remoção dos corantes do efluente têxtil sintético. L - Termos Lineares; Q- Termos Quadráticos; 1L by 2L- Interação entre intensidade de corrente e pH em termos lineares.

No estudo realizado por SECULA et al. (2011) na remoção do corante índigo carmim a partir de solução aquosa por eletrocoagulação, os autores obtiveram um aumento da descoloração do efluente de 49,2% para 98,9% após a aplicação do dobro da intensidade de corrente de 5,46 A para 10 A com 3 horas de eletrocoagulação. Isso se deve ao fato de que, com valores maiores de intensidade de corrente, a taxa de dissolução anódica aumenta de acordo com a lei de Faraday e os hidróxidos de alumínio resultantes produzem mais flocos, aumentando assim o processo de coagulação (GUO et al., 2006). Entretanto, a aplicação de corrente acima da intensidade ótima não resulta no aumento na eficiência de remoção, pois existe uma quantidade suficiente de flocos de hidróxidos metálicos disponíveis para sedimentação (KHANDEGAR; SAROHA, 2013).

Com base no gráfico de Pareto, realizou-se novamente o teste ANOVA (conforme Tabela 4), mantendo as variáveis significativas, a fim de averiguar sua significância na remoção dos corantes.

Tabela 4: Teste da análise de variância e coeficiente de regressão do modelo previsto para remoção dos corantes ao nível de significância de 95% ($p < 0,05$). SM- Soma Quadrática; GL- Grau de Liberdade; QM – Quadrados Médios; CR- Coeficiente de Regressão; L- Termos Lineares; Q- Termos Quadráticos.

| Efluente têxtil Sintético ($\lambda = 548 \text{ nm}$) | SM | GL | QM | F (Cal) |
|---|---------------|-------------|------------------|----------------|
| Regressão | 1.404,5 | 9 | 156,0 | - |
| Resíduos | 106,4 | 1 | 106,4 | 0,68 |
| Total | 1.514,3 | 11 | - | - |
| | CR | Erro | Valor (t) | p-valor |
| Média | 95,50 | 1,91 | 49,91 | 0,00 |
| Intensidade de corrente (A) (L) | -7,29 | 2,70 | -2,69 | 0,03 |
| Intensidade de corrente (A) (Q) | -21,75 | 3,02 | -7,19 | 0,00 |
| pH (L) | 1,29 | 2,70 | -0,47 | 0,64 |
| pH (Q) | -22,67 | 3,02 | -7,49 | 0,00 |

Os p -valores das variáveis, intensidade de corrente e pH, mostraram-se significativos ao nível de 95% de confiança nos termos lineares e quadráticos para intensidade de corrente e apenas quadráticos para pH. O teste F foi utilizado para investigar se o modelo proposto indicava evidência estatística suficiente da relação dependente entre as variáveis de entrada e a resposta em % de remoção dos corantes. O valor do teste F

calculado deve ser maior que o valor do teste F tabelado para que o modelo seja significativo, ou seja, válido estatisticamente. O valor obtido para F_{cal} foi de 13,19, valor este maior que F_{Tab} (2; 9; 0,05) de 5,71. Isto é, a regressão obtida ajustou os pontos experimentais de forma satisfatória, validando o modelo para o intervalo de confiança de 95%.

Considerando apenas os termos significativos, o modelo de remoção dos corantes no comprimento de onda em que ocorre a maior absorção (548 nm) pode ser escrito de acordo com a equação 1. Os valores dos coeficientes foram arredondados na segunda casa decimal.

$$\% \text{ Remoção dos corantes (em 548 nm)} = 95,50 - 7,29 x_1 - 21,76 x_1^2 - 22,67 x_2^2 \quad \text{equação (1)}$$

Onde: x_1 é a intensidade de corrente (A); e x_2 é o valor de pH.

De acordo com a equação 1, verificou-se que as duas variáveis independentes foram consideradas significativas de algum modo, sendo favorável ou não na remoção dos corantes. Nota-se que as variáveis intensidade de corrente e pH quadráticas (Q), influenciam os parâmetros em proporções inversas (valor negativo do coeficiente de regressão), ou seja, quanto maior o seu nível, menor é a eficiência de remoção. O gráfico de superfície de resposta e o perfil de contorno obtidos pela equação 1 podem ser observados na Figura 5.

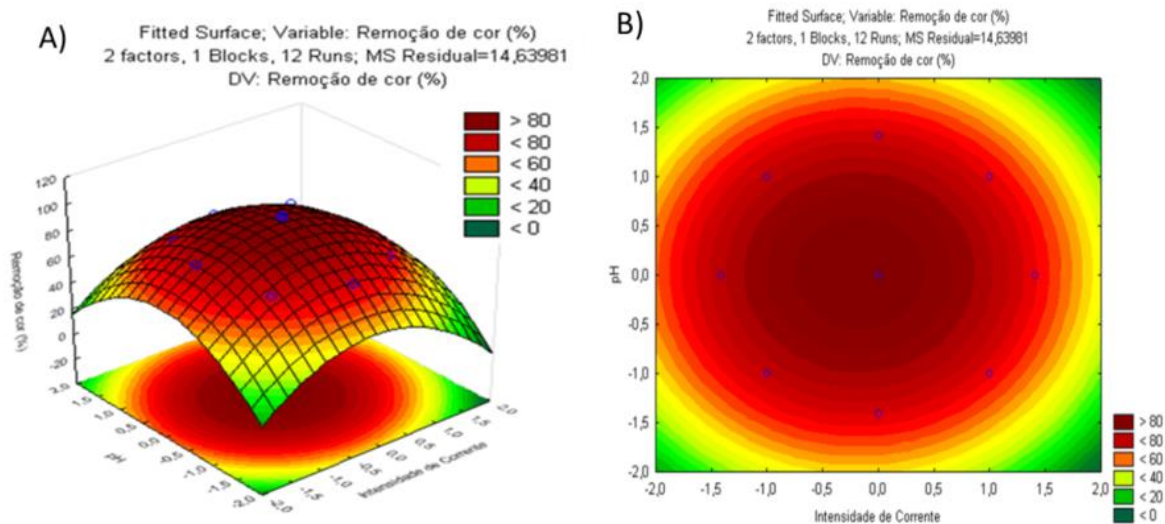


Figura 5: Perfil de contorno (A) e superfície de resposta (B) em relação à remoção dos corantes do efluente têxtil sintético por eletrocoagulação.

CHANG et al. (2007) investigaram a descoloração e mineralização de uma solução de corante azo tratado por eletrocoagulação e constataram que para valores de pH menores, não há necessidade de intensidades de correntes altas, podendo atingir valores de descoloração acima de 90% em corantes destes grupos. Além disso, valores de intensidade de correntes maiores, apresentam aumento no consumo de energia e consequentemente, aumento no custo do processo (DANESHVAR; OLADEGARAGOZE; DJAFARZADEH, 2006).

A partir do modelo obtido no planejamento de experimentos, possibilitou-se o entendimento de que as maiores eficiências na remoção dos corantes são observadas quando a solução é submetida à intensidades de corrente elétrica e valores de pH inicial próximos ao ponto central, ou seja, intensidades de corrente próximos a 33 A e de pH inicial de 3,0.

CAN et al. (2003) constataram em seus estudos que valores baixos de pH inicial retardam a formação de $Al(OH)_3$ e estimulam a formação de espécies hidroxipoliméricas que reagem com as moléculas dos corantes, resultando em sua precipitação. De acordo com MÁRTÍNEZ-HUITLE e BRILLAS (2009), o processo de



precipitação dos corantes é responsável pela alta eficiência da descoloração através da adsorção das espécies poliméricas dos corantes nos flocos.

Os resultados obtidos apontam o processo de eletrocoagulação como promissor no tratamento de efluentes da indústria têxtil, podendo contribuir para o tratamento do efluente industrial sem causar agressão ou destruição do meio ambiente. A eficiência máxima de remoção dos corantes foi de 85% com valor de cor verdadeira no efluente final de 71 mg Pt.L⁻¹. A partir da otimização dos parâmetros operacionais investigados no planejamento fatorial experimental utilizado (DCCR) percebeu-se adequação das condições e padrões de lançamento de efluentes para cor verdadeira em até 75 mg Pt.L⁻¹, valor base exigido na legislação pertinente Resolução n° 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (2005).

CONCLUSÃO/ RECOMENDAÇÃO

A eletrocoagulação é um processo eficiente para descoloração de efluentes têxteis. O pH inicial da solução, a intensidade de corrente e o tempo de eletrólise são variáveis importantes que afetam a eficiência de descoloração. Desta maneira, estes parâmetros devem ser levados em consideração na definição das condições operacionais ótimas do processo.

A efetividade do processo de eletrocoagulação para remoção dos corantes em efluente têxtil é comprovada pelos bons índices de remoção dos corantes. As melhores condições operacionais com intensidade de corrente de 33 A e pH inicial 3, promoveram remoção dos corantes em até 85,3%, se adequando as condições e padrões de lançamento de efluentes para cor (Resolução CONAMA 357/2005). Além disso, a ausência da necessidade de correção do pH das amostras eletrocoaguladas para posterior descarte constitui-se como fator positivo do processo, já que no final da eletrocoagulação o pH do efluente ficou próximo da neutralidade.

O DCCR mostrou-se uma ferramenta simples e prática para planejar os experimentos e possibilitou a avaliação do efeito das variáveis independentes (intensidade de corrente e pH) e suas interações, na remoção dos corantes do efluente. Além disso, também proporcionou o desenvolvimento do modelo matemático que poderá ser útil para a realização de previsões quanto à remoção dos corantes do efluente têxtil no intervalo de valores das variáveis independentes estudadas.

Os resultados obtidos apontam o processo de eletrocoagulação como promissor no tratamento de efluentes da indústria têxtil, evidenciado que a aplicação da eletrocoagulação é apta ao tratamento de efluentes com corantes tipos azo, comprovando ter grande potencial em promover a remoção da cor. Deste modo a eletrocoagulação pode contribuir para o tratamento do efluente industrial sem causar agressão ou destruição do meio ambiente.

Sugere-se para o desenvolvimento de trabalhos futuros o estudo de outras variáveis independentes como: material do eletrodo, configuração de reatores e tempo de eletrólise.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AOUDJ, S., KHELIFA, A., DROUCHE, N., HECINI, M., HAMITOUCHE, H. *Electrocoagulation process applied to wastewater containig dyes from textile industry. Chemical Engineering and Processing*, n.49, p.1176-1182, 2010.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTEL E CONFECÇÃO (ABIT). *Perfil do Setor – Dados Gerais do setor referentes a 2017*. São Paulo. ABIT, 2018.
3. BENSADOK, K., BENAMMAR, S., LAPICQUE, F., NEZZAL, G. *Electrocoagulation of cutting oil emulsions using aluminum plate electrodes. Journal of Hazardous Materials*, v.152, p. 423-430, 2007.
4. CAN, O.T., BAYRAMOGLU, M., KOBYA, M. *Decolorization of reactive dye solutions by electrocoagulation using aluminum electrodes. Industrial e Engineering Chemistry Research*, v.42, p. 3391-3396, 2003.
5. CAN, O.T., KOBYA, M., DEMIRBAS, E., BAYRAMOGLU, M. *Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. Chemosphere*, v.62, p.181-187, 2006.



6. CAÑIZARES, P., CARMONA, M., LOBATO, J., MARTINEZ, F., RODRIGO, M.A. *Electrodissolution of aluminum electrodes in electrocoagulation process. Industrial Engineering Chemistry Research*, v.44, p.4178-4185, 2005.
7. CHANG, E.E., HSING, H.J., KO, C.S., CHIANG, P.C. *Decolorization, mineralization and toxicity reduction of acid orange 6 by iron-sacrificed plates in the electrocoagulation process. Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, v.82, p.488-495, 2007.
8. CHEN, G. *Electrochemical technologies in wastewater treatment. Separation and Purification Technology*, v.38, p.11-41, 2004.
9. CALADO, V., MONTGOMERY, D.C. *Planejamento de Experimentos usando o Statistica. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais LTDA.* p.260, 2003.
10. CARDOSO, N. F. Adsorção de corantes têxteis utilizando biossorvente alternativos. Porto Alegre, 2012. Tese de doutorado-Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
11. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resoluções do CONAMA: 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, n.357, de 17/08/2005, Brasília, SEMA, 2005.
12. DANESHVAR, N., OLADGARAGOZE, A., DJAFARZADEH, N. *Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: An investigation of the effect of operational parameters. Journal of Hazardous Materials*, v.129, p.116-122, 2006.
13. GARCIA, A.G., MIRANDA, V.M., CIENFUEGOS, I.G.M., SANCHEZ, P.T.A., JUAREZ, M.C., HERNANDEZ, I.L. *Industrial wastewater treatment by electrocoagulation-electrooxidation process powered by solar cells. Fuel*, v.149, p.46-54, 2015.
14. GIORDANO, G., FILHO, O.B. *O Processo Eletrolítico Aplicado ao Saneamento Ambiental de Balneários. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre, RS, 2000.*
15. GOLDBERGER, A.K., CHANDA, A.K., SAMANTA, A.N., RAY, S. *Removal of hexavalent chromium by electrochemical reduction-precipitation: Investigation of process performance and reaction stoichiometry. Separation and Purification Technology*, v.76, n.3, p.345-350, 2011.
16. GUO, Z., ZHANG, G., FANG, J., DOU, X. *Enhanced chromium recovery from tanning wastewater. Journal of Cleaner Production*, v.14, p.75-79, 2006.
17. HOLKAR, C.R., JADHAV, A.J., PINJARI, D.V., MAHAMUNI, N.M., PANDIT, A.B. *A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches. Journal of Environmental Management*, v.182, p.351-366, 2016.
18. HAQUE, M.M., SMITH, W., WONG, D.K.Y. *Conducting polypyrrole films as a potential tool for electrochemical treatment of azo dyes in textile wastewaters. Journal of Hazardous Materials*, v.283, p.164-170, 2015.
19. KARTHIKEYAN, N., SIVARANJANI, T., DHANAVEL, S., GUPTA, V.K., NARAYANAN, V., STEPHEN, A. *Visible light degradation of textile effluent by electrodeposited multiphase CuInSe2 semiconductor photocatalysts. Journal of Molecular Liquids*, v.227, p.194-201, 2017.
20. KHANDEGAR, V., SAROHA, A.K. *Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent – A review. Journal of Environmental Management*, v.128, p.949-963, 2013.
21. KOBAYASHI, M., CAN, O., BAYRAMOGLU, M. *Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. Journal of Hazardous Materials*, p.163-178, 2003.
22. KUMAR, M.A., VIGNESHWARAN, G., PRIYA, M.E., SEENUVASAN, M., KUMAR, V.V., ANURADHA, D., SIVANESAN, S. *Concocted bacterial consortium for the detoxification and mineralization of azoic-cum-sulfonic textile mill effluents. Journal of Water Process Engineering*, v.16, p.199-205, 2017.
23. MARTÍNEZ-HUITLÉ, C., BRILLAS, E. *Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review. Applied Catalysis B: Environmental*, v.87, p.105-145, 2009.
24. MELO, A.R. *Uso integrado e eficiente da água nas indústrias têxteis catarinenses.* p.161, 2008.
25. MO, J., HWANG, J.E., JEGAL, J., KIM, J. *Pretreatment of a dyeing wastewater using chemical coagulants. Dyes and Pigments*, v.72, p.240-245, 2007.
26. MOLLAH, M.Y.A., SCHENNACH, R., PARGA, J.R., COCKE, D.L. *Electrocoagulation (EC)-Science and applications. Journal of Hazardous Materials*, v.84, p.29-41, 2001.



27. QI, Z., YOU, S., REN, N. *Wireless Electrocoagulation in Water Treatment Based on Bipolar Electrochemistry*. *Electrochimica Acta*, v.229, p.96-101, 2017.
28. SANTOS, E.G., ALSINA, O.L.S., SILVA, F.L.H.S. *Desempenho de biomassas na adsorção de hidrocarbonetos leves em efluentes aquosos*. *Química Nova*, v.30, n.2, 2007.
29. SECULA, M.S., CRETESCU, I., PRETESCU, S. *An experimental study of indigo carmine removal from aqueous solution by electrocoagulation*. *Desalination*, v.277, p.277-235, 2011.
30. SEIFRTOVÁ, M., NOVÁKOVÁ, L., LINO, C., PENA, A., SOLICH, P. *An overview of analytical methodologies for the determination of antibiotics in environmental Waters*. *Analytica Chimica Acta*, v.649, p.158-179, 2009.
31. SILVA, J.R.P., MERÇON, F., SILVA, L.F., CERQUIRA, A.A., XIMANGO, P.B., MARQUES, M.R.C. *Evaluation of electrocoagulation as pre-treatment of oil emulsions, followed by reverse osmosis*. *Journal of Water Process Engineering*, v.8, p.126-135, 2015.
32. SILVERSTEIN, R.M., WEBER, F.X., KIEMLE, D.J. *Identificação espectrométrica de compostos orgânicos*. Tradução: Ricardo Bicca de Alencastro. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
33. SONG, P., YANG, Z., ZENG, G., YANG, X., XU, H., WANG, C., XU, R., XIONG, W., AHMAD, K. *Electrocoagulation treatment of arsenic in wastewaters: A comprehensive review*. *Chemical Engineering Journal*, 2017.