

# Utilização da técnica de eletrofloculação para o tratamento de efluentes têxteis: uma revisão

Using the electroflocculation technique for the textile wastewater treatment: a review

Leandro Fleck, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fleckmissal@gmail.com

Maria Hermínia Ferreira Tavares, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, mhstavar@gmail.com

Eduardo Eynng, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, eduardoeyng@utfpr.edu.br



**Resumo:** Nos últimos anos, o desenvolvimento de atividades industriais tem provocado inúmeros impactos aos recursos naturais. A indústria têxtil gera elevada quantidade de efluente, devido à grande utilização de água em seu processo produtivo, que, quando não corretamente tratado, deteriora a qualidade da água do curso hídrico receptor. Diante das formas tradicionais de tratamento de efluentes, a eletrofloculação surge como uma técnica inovadora. Tal processo constitui na passagem de corrente elétrica através de uma célula eletrolítica, originando dois processos distintos: eletrocoagulação e eletroflotação. O presente artigo tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica acerca da utilização da técnica de eletrofloculação para o tratamento de efluentes industriais, com enfoque ao efluente têxtil. A forte coloração é a característica predominante em efluentes têxteis, como consequência da utilização de corantes para o tingimento do tecido. Devido a sua toxicidade e baixa biodegradabilidade, a presença de corantes causa inúmeros impactos aos seres vivos, o que justifica a busca por métodos alternativos para remoção desses constituintes. Estudos demonstram que a eficiência do processo de eletrofloculação para o tratamento de efluentes industriais é dependente de fatores como condutividade elétrica, distância dos eletrodos de sacrifício e pH do meio reacional. Os principais critérios utilizados para determinar a eficiência do processo eletroquímico correspondem à redução dos parâmetros DQO, cor e turbidez. A maior redução é observada para o parâmetro turbidez, com remoções superiores a 90%. Pelos resultados alcançados é possível inferir que a eletrofloculação mostra-se um método alternativo e eficiente para o tratamento de efluentes industriais.

**Palavras-chave:** Corantes Têxteis; Indústrias Têxteis; Eletrodos de Sacrifício.

**Abstract:** In recent years, the industrial activities development has caused numerous impacts to the natural resources. The textile industry generates large amounts of effluent due to the wide use of water at its production process, and when it isn't properly treated, it damages the water quality of the receptor hydric course. Against the traditional forms of effluents treatment, the electroflocculation emerges as an innovative technique. That process consists of electric current the passage through an electrolytic cell, originating two distinct processes: electrocoagulation and electroflotation. This article intends to present a bibliographic review about the use of the electroflocculation technique for industrial wastewater treatment, focusing the textile effluent. The strong staining is the predominant feature at textile effluents, because the dyes use in dyeing fabric. Due its toxicity and low biodegradability, the presence of dyes causes numerous impacts to living beings, which justifies the research for alternative methods to remove these constituents. Some studies prove that the efficiency at the electroflocculation process on the industrial effluents treatment depends on factors as the electric conductivity, the distance between sacrificial electrodes and the pH of the reaction environment. The main criterions used to determine the electrochemical process efficiency is the reduction of the parameters COD, the color and the turbidity. The greatest reduction is observed from the turbidity parameter, with removals greater than 90%. With the results achieved it can be inferred that the electroflocculation shows itself like an alternative and efficient method for the industrial effluents treatment.

**Keywords:** Textile Dyes; Textile Industries; Sacrificial Electrodes.

Nos últimos anos, é possível observar o forte crescimento econômico nacional, principalmente devido ao desenvolvimento de atividades industriais. A indústria têxtil é uma importante atividade econômica responsável por esse desenvolvimento (BAËTA *et al.*, 2012; CERQUEIRA *et al.*, 2009).

Dentre as atividades industriais geradoras de efluentes líquidos, as indústrias têxteis destacam-se por utilizarem em seu processo produtivo elevada quantidade de água, corantes e produtos químicos, gerando efluentes potencialmente poluidores, com elevada carga orgânica, cor acentuada e compostos

tóxicos (PASCHOAL; TREMILIOSI-FILHO, 2005). Esses resíduos possuem em sua composição surfactantes e agentes quelantes, causadores de perturbações na vida aquática, principalmente pelo desenvolvimento do processo de eutrofização (AQUINO NETO *et al.*, 2011).

Uma das características das indústrias têxteis é a mudança constante do corante utilizado no processo produtivo, o que por consequência modifica as características químicas e físicas do efluente gerado, alterando a concentração da demanda química de oxigênio (DQO) e pH (CERQUEIRA *et al.*, 2009). Nesse sentido, Kunz *et al.* (2002) afirmam que os efluentes têxteis possuem em sua composição quantidade considerável de corantes que não se fixam na fibra têxtil durante o processo de tingimento do tecido, o que altera consideravelmente a qualidade da água do curso hídrico receptor.

A principal preocupação das indústrias têxteis refere-se à remoção de corantes do efluente gerado no processo produtivo, devido, principalmente, a sua baixa degradabilidade (CERQUEIRA *et al.*, 2009). Processos convencionais de remoção de corantes vêm sendo utilizados em todo o mundo, com destaque para a adsorção (KANNAN; SUNDARAM, 2001; MESHKO *et al.*, 2001), precipitação, degradação química, degradação fotoquímica e biodegradação (GONZALEZ-GUTIERREZ; ESCAMILLA-SILVA, 2009). Entretanto, nos últimos anos, especial destaque tem sido dado à utilização de processos eletroquímicos para o tratamento de efluentes potencialmente poluidores, como, por exemplo, a técnica de eletrofloculação (CERQUEIRA *et al.*, 2009).

Na tecnologia de eletrofloculação não ocorre a adição de floculantes, o que evita a formação de lodo residual. Trata-se de um processo eletroquímico baseado na geração de bolhas de gás (geralmente O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>), substituindo os aditivos floculantes. Esse processo é dividido em quatro etapas básicas: (1) geração de pequenas bolhas de gás; (2) contato entre as bolhas e as partículas em suspensão; (3) adsorção das pequenas bolhas de gás na superfície das partículas; (4) ascensão do conjunto partículas/bolhas para a superfície (PASCHOAL; TREMILIOSI-FILHO, 2005).

Durante o processo eletroquímico, a geração de coagulantes ocorre *in situ* a partir de eletrodos de ferro e/ou alumínio submetidos a uma corrente elétrica (CERQUEIRA *et al.*, 2011). Assim, ao contrário dos processos convencionais em que os coagulantes são adicionados ao efluente na forma de sais, no processo de eletrofloculação os coagulantes (ferro ou alumínio) são adicionados à suspensão por meio da dissolução do ânodo, que provoca a agregação das partículas posteriormente removidas

por sedimentação ou filtração (SASSON; ADIN, 2010).

Os dispositivos de eletrofloculação são compostos por eletrodos que apresentam polaridades diferentes, ânodos e cátodos. No processo eletroquímico, quando uma voltagem é aplicada, o ânodo é oxidado e o cátodo é reduzido, gerando eletroquimicamente o agente coagulante. O material de carga positiva pode reagir com as cargas negativas da solução, ocorrendo hidrólise que libera hidróxido, responsável pelo tratamento do efluente submetido ao processo (BRITO *et al.*, 2012).

A técnica de eletrofloculação vem ganhando popularidade e se tornando uma alternativa reconhecidamente viável frente ao processo convencional de coagulação/floculação (HARIF; ADIN, 2007). Paschoal e Tremiliosi-Filho (2005) afirmam que a eletrofloculação pode ser um método promissor no processo de reciclagem da água, uma vez que combina a oxidação parcial do poluente, por via eletrolítica, com a precipitação físico-química ou eletroquímica do lodo.

A eficiência de um processo de eletrofloculação é refletida na remoção de poluentes e potência elétrica empregada no processo eletroquímico. Há muitos fatores que influenciam o tamanho das bolhas (gases de hidrogênio e oxigênio), nas quais ocorrerá a adsorção dos poluentes, tais como a intensidade de corrente, temperatura e curvatura da superfície do eletrodo, material do eletrodo e pH do meio reacional (FORNARI, 2007). Diante disso, o presente artigo tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica acerca da utilização da técnica de eletrofloculação para o tratamento de efluentes industriais, com enfoque ao efluente têxtil.

## PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE INDÚSTRIAS TÊXTEIS

Indústrias têxteis são complexas, requerem elevado consumo de energia em seu processo produtivo, e são formadas por setores fragmentados e heterogêneos, dominados por pequenas e médias empresas (HASANBEIGI *et al.*, 2012).

O processamento têxtil tem como característica o elevado consumo de água e produtos químicos, e, por consequência, a geração de elevadas quantidades de efluentes (BASHA *et al.*, 2012; ROBINSON *et al.*; 2001; MAHMOODI *et al.*, 2011).

O beneficiamento têxtil consiste em um conjunto de processos aplicados aos materiais têxteis para transformá-los em artigos brancos, tintos, estampados e acabados (FREITAS, 2002). Na Figura 1, observa-se um fluxograma das etapas do processo a úmido para os tecidos de algodão e mesclas de algodão.

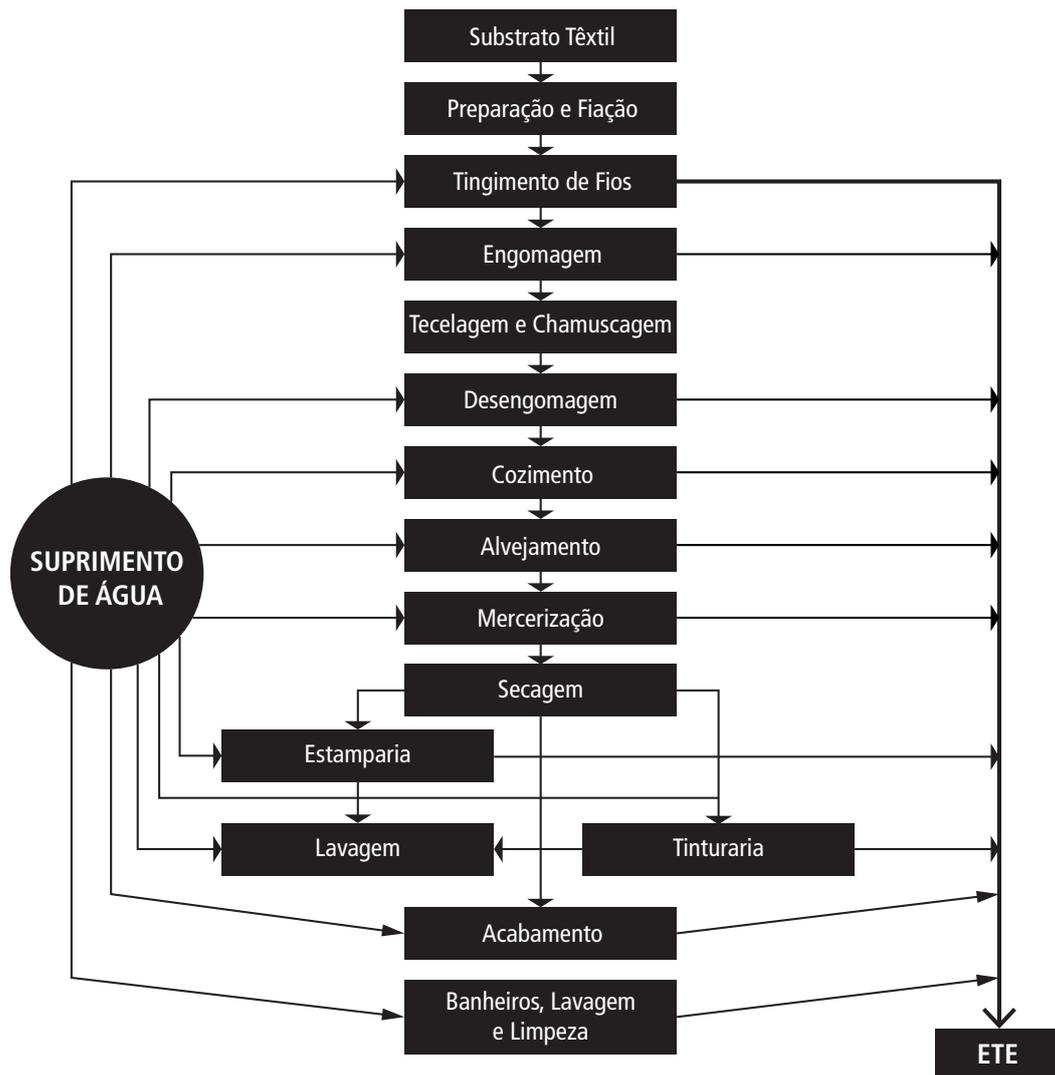


Figura 1: Etapas características do processamento de tecidos de algodão e sintéticos.

Fonte: Freitas (2002).

Uma forte coloração é a característica mais notória no efluente têxtil e está associada aos corantes empregados no tingimento. Cerca de 5 a 20% do corante são perdidos no processo de tingimento (PASCHOAL; TREMILIOSI-FILHO, 2005). Efluentes oriundos do processamento têxtil são altamente impactantes aos cursos hídricos receptores. A presença de corantes no efluente reduz a atividade fotossintética das plantas aquáticas, devido à dificuldade de penetração dos raios solares (KHLIFI *et al.*, 2010). Existem milhares de corantes disponíveis comercialmente, todos de difícil degradação, devido à sua estrutura química complexa (ROBINSON *et al.*, 2001), o que justifica a busca por técnicas inovadoras para o tratamento de efluentes têxteis.

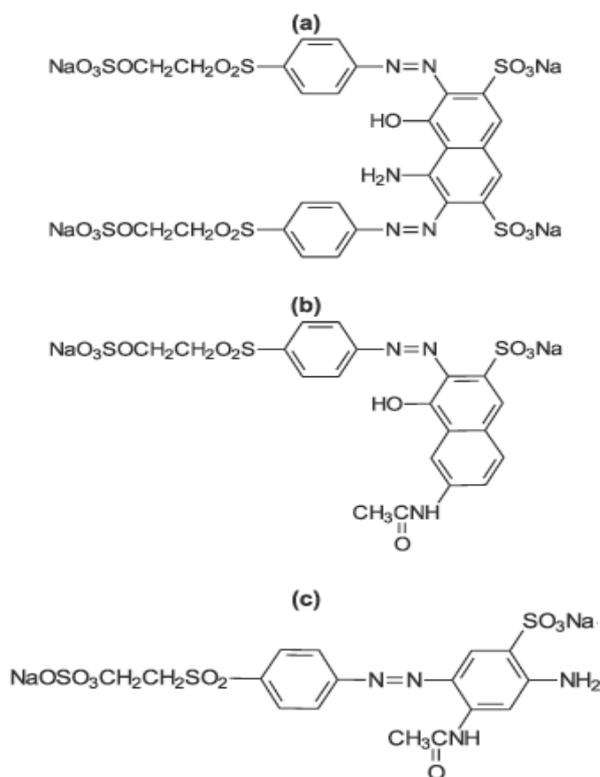
Durante o processo de tingimento da fibra têxtil, três etapas são consideradas importantes: a montagem, a fixação e o

tratamento final. Entretanto, todo processo de tintura envolve como operação final uma etapa de lavagem em banhos correntes para a retirada do excesso do corante original (GUARATINI; ZANONI, 2000), tornando o efluente altamente tóxico à maioria da biota aquática. A natureza não biodegradável dos corantes têxteis e sua estabilidade para agentes oxidantes dificultam a utilização de um único método para seu tratamento. Além disso, os testes de toxicidade demonstram que os corantes são tóxicos aos seres vivos (MAHMOODI *et al.*, 2011).

A classificação dos corantes têxteis pode ser feita pelo tipo de fibra, como, por exemplo, os corantes para *nylon*, algodão e poliéster, pela forma como são fixados à fibra e de acordo com sua estrutura química, como, por exemplo, azo, antraquinona, indigóides, etc (CASTANHO *et al.*, 2006).

## CORANTES AZOS

São compostos coloridos, insolúveis em água, sintetizados sobre a fibra durante o processo de tingimento (CERQUEIRA, 2006). A maioria dos corantes utilizados nas indústrias têxteis pertence ao grupo azo, que se caracteriza pelo grupo  $-N=N-$ , ligado a sistemas aromáticos, incluindo os principais tipos de corantes reativos (CASTANHO *et al.*, 2006; BAËTA *et al.*, 2012; CERQUEIRA, 2006; DEL MONEGO, 2007). Na Figura 2, observa-se a estrutura química de três corantes azos: preto remazol B, alaranjado remazol 3R e amarelo ouro remazol RNL.



**Figura 2:** Estruturas dos corantes: (a) preto remazol B; (b) alaranjado remazol 3R; (c) amarelo ouro remazol RNL.

**Fonte:** Castanho *et al* (2006).

Esses três corantes são solúveis em água e reagem com algumas fibras têxteis, formando uma ligação do tipo covalente. Segundo Castanho *et al.*, (2006), essa é a classe de corantes mais importante utilizada atualmente, podendo ser utilizada em fibra celulósica, em seda ou lã.

## CORANTES REATIVOS

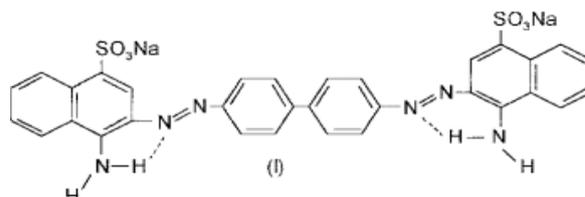
São corantes utilizados principalmente em fibras celulósicas. Possuem um grupo eletrofílico (reativo) capaz de formar ligações covalentes com grupos hidroxilas das fibras da celulose e também com grupos aminos das poliamidas. Existe uma grande variedade de corantes reativos, entretanto aqueles que possuem como grupos cromóforos às funções azo e antraquinona e como grupos reativos clorotriazinila e sulfatoetilsulfonila são os principais representantes. Nesta classe de corantes, a interação com a fibra é feita por meio de uma ligação covalente em que o grupo nucleofílico do corante é substituído pelo grupo hidroxila da celulose (SOUZA, 2006).

Esse grupo de corantes apresenta como característica alta solubilidade em água e o estabelecimento de uma ligação covalente entre o corante e a fibra, cuja ligação confere maior estabilidade na cor do tecido tingido, quando comparado a outros tipos de corantes em que o processo de coloração se opera por meio de ligações de maior intensidade (CERQUEIRA, 2006).

## CORANTES DIRETOS

Os corantes diretos caracterizam-se como compostos solúveis em água capazes de tingir fibras de celulose (algodão, viscose, etc.) por meio de interações de Van der Waals. A afinidade do corante é aumentada pelo uso de eletrólitos, pela planaridade na configuração da molécula do corante ou pela dupla ligação conjugada que aumenta a adsorção do corante sobre a fibra. Essa classe de corantes é constituída, principalmente, por corantes contendo mais de um grupo azo (díazo, triazo, etc) (VASQUES, 2008).

Nas últimas décadas poucas pesquisas referentes aos corantes diretos têm sido realizadas, mesmo com sua elevada comercialização. A grande vantagem desta classe de corantes é o alto grau de exaustão durante a aplicação e, conseqüentemente, diminuição do conteúdo do corante no efluente gerado (DEL MONEGO, 2007). Na Figura 3, observa-se um exemplo de corante direto contendo grupos diazo como grupo cromóforo.



**Figura 3:** Exemplo de corante direto contendo grupos diazo como grupo cromóforo.

**Fonte:** Guaratini e Zanoni (2000).

## CORANTES ÁCIDOS

O termo corante ácido corresponde a um grande grupo de corantes aniônicos portadores de um a três grupos sulfônicos. No processo de tintura, o corante previamente neutralizado em solução contendo cloreto, acetato e hidrogenossulfato liga-se à fibra através de uma troca iônica envolvendo o par de elétrons livres dos grupos amino e carboxilato das fibras proteicas, na forma não-protonada (DEL MONEGO, 2007). São corantes solúveis em água, com grande importância em fibras proteicas e poliamida sintética (SOUZA; ROSADO, 2009). Na Figura 4, observa-se a estrutura molecular do corante ácido violeta.

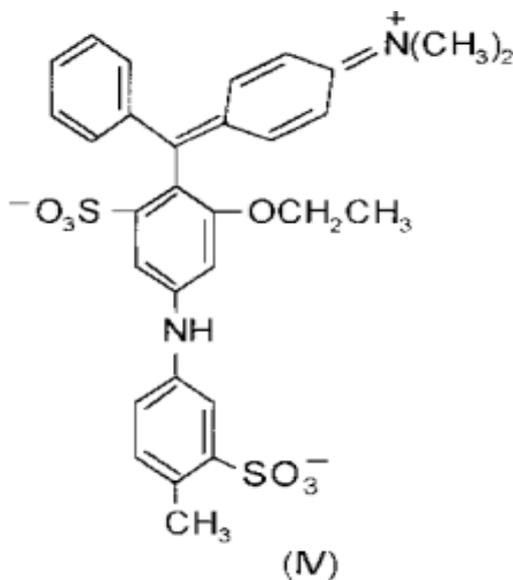


Figura 4: Estrutura molecular do corante ácido violeta.  
Fonte: Guaratini e Zanoni (2000).

## PRINCIPAIS REAÇÕES ENVOLVIDAS NO PROCESSO DE ELETROFLOCULAÇÃO

O processo de eletrofloculação, também chamado de eletrocoagulação ou eletroflotação, é um processo eletrolítico que envolve a desestabilização de poluentes emulsificados, ou em suspensão, em meio aquoso. Os materiais mais utilizados como ânodos de sacrifício são o ferro e o alumínio, devido ao seu baixo custo, disponibilidade e eficácia (AQUINO NETO *et al.*, 2011).

A eletrofloculação pode ser considerada uma alternativa aos processos convencionais de coagulação/floculação, apesar de existirem diferenças substanciais entre os dois métodos de tratamento de efluentes. Na técnica de eletrofloculação, espécies

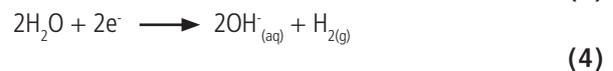
coagulantes ativos são geradas *in situ* pela oxidação eletrolítica de um ânodo apropriado, diferindo dos processos convencionais, em que coagulantes químicos são utilizados (HARIF; ADIN, 2011; SUN *et al.*, 2009).

Segundo Aquino Neto *et al.* (2011), o processo de eletrofloculação ocorre basicamente em três etapas. Na primeira, o coagulante é gerado *in situ* pela oxidação de um ânodo metálico (M) de sacrifício; assim que os respectivos cátions são gerados, estes reagem com moléculas de água para formação dos respectivos hidróxidos e poli-hidróxidos. Paralelamente, tem-se a eletrólise da água e a formação de microbolhas de oxigênio no ânodo e hidrogênio no cátodo que carregarão, na última etapa, o material floculado para a superfície:

**No ânodo:**



**No cátodo:**



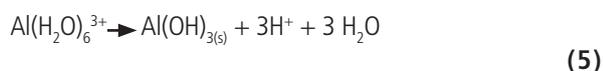
Na segunda etapa, os hidróxidos formados adsorvem-se em partículas coloidais originando os flóculos. Na última etapa do processo ocorre a flotação, em decorrência da formação das microbolhas que são geradas da eletrólise da água (AQUINO NETO *et al.*, 2011), conforme pode ser observado na Figura 5.

+ E (V)

Figura 5: Ilustração do processo de adsorção e formação das partículas coloidais que geram os flóculos com as moléculas de corantes. IS= íon de sacrifício: Al(OH)<sub>3</sub> ou Fe(OH)<sub>3</sub>, conforme esquema empregado.

Fonte: Adaptado de Aquino Neto *et al.* (2011).

Quando se utiliza eletrodos de alumínio para a realização do tratamento do efluente têxtil pela técnica de eletrofloculação, ocorre a oxidação no ânodo (4), o qual, após solvatação, sofre hidrólise (5) com a formação do agente de floculação Al(OH)<sub>3</sub> (CERQUEIRA, 2011).

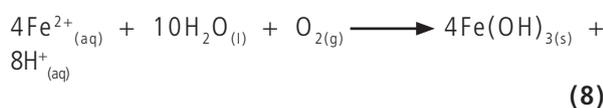


Além da formação do agente coagulante, a eletrofloculação gera microbolhas de gases (6) que são responsáveis pela flotação de óleos, graxas e outros compostos particulados (CERQUEIRA, 2011).



Segundo Fornari (2007), de maneira similar aos eletrodos de alumínio, os íons férricos gerados pela oxidação eletroquímica dos eletrodos de ferro podem formar íons monoméricos e complexos hidroxipoliméricos, dependendo do pH do meio aquoso. Esses compostos têm forte afinidade por partículas dispersas e íons que causam coagulação. Crespilho e Rezende (2004) apresentam as reações envolvidas no processo de eletrofloculação utilizando eletrodos de ferro:

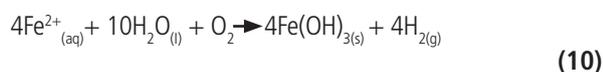
#### Ânodo:



#### Cátodo:



#### Reação global:



O efeito do pH do efluente reflete a eficiência da corrente, bem como a solubilidade de hidróxidos metálicos. A potência consumida é mais alta a pH neutro, devido à variação da condutividade (CHEN, 2004). A condutividade do efluente é proporcional à quantidade de íons condutores presentes no meio líquido (FORNARI, 2007); quando a condutividade é alta, o efeito do pH não é significativo (CHEN, 2004).

Quanto maior a distância entre os eletrodos de sacrifício, maior deverá ser a diferença de potencial aplicada, devido à resistência da solução à passagem de corrente elétrica. Assim, de acordo com as características do efluente, a distância entre os eletrodos pode variar para melhorar a eficiência do processo. Distâncias maiores poderão ser impostas em condutividade elétrica elevada; caso contrário, a distância deverá ser menor para não ocorrer aumento exagerado do potencial (CRESPILHO: REZENDE, 2004).

Vários tipos de reatores foram propostos na literatura para a técnica de eletrofloculação (MOLLAH *et al.*, 2001; CERQUEIRA, 2006). Em sua forma simples, um reator monopolar é composto por uma célula eletrolítica com um ânodo e um cátodo. Quando conectado a uma fonte de potencial externa, o ânodo sofre corrosão em decorrência da oxidação e o cátodo sofre redução. Esse tipo de reator é o mais utilizado em tratamento de efluentes industriais (CERQUEIRA, 2006).

## VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ELETROFLOCULAÇÃO

Mollah *et al.* (2001) enumera as principais vantagens e desvantagens da técnica de eletrofloculação frente às técnicas tradicionais de tratamento de efluentes industriais.

### a) Vantagens da eletrofloculação

1. Requer equipamento simples e de fácil operação, em que a corrente e o potencial aplicado podem ser medidos e controlados de maneira automatizada.
2. Há maior controle na liberação do agente coagulante, em comparação com os processos físico-químicos convencionais.
3. Limita o uso de substâncias químicas, diminuindo o impacto causado por xenobióticos no ambiente natural.
4. As bolhas de gás produzidas durante a eletrólise levam o contaminante ao topo do reator, onde pode ser facilmente removido.
5. A célula eletrolítica é eletricamente controlada, não necessitando de dispositivos adicionais, o que requer menos manutenção.
6. Uma das maiores vantagens da eletrofloculação é a remoção de óleos e graxas, devido à facilidade de coagulação e flotação das moléculas desses compostos. Como consequência da interação dessas

moléculas com o hidróxido de alumínio, formam-se colóides com densidade inferior à densidade da água, e estes se deslocam naturalmente para a superfície do líquido.

## b) Desvantagens da eletrofloculação

1. Os eletrodos precisam ser substituídos regularmente, caso sofram passivação ou desgaste.
2. O consumo de energia elétrica pode ser dispendioso em algumas regiões.
3. Um filme de óxido impermeável pode ser formado no cátodo, conduzindo a perda de eficiência da unidade.
4. Requer alta condutividade do efluente.

## APLICAÇÕES DA TÉCNICA DE ELETROFLOCULAÇÃO PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS

Atualmente não é possível encontrar na literatura muitos estudos relacionados à aplicação prática da técnica de eletrofloculação (HARIF; ADIN, 2011). Os principais estudos realizados avaliaram a remoção de matéria orgânica e material coloidal de águas (HOLT *et al.*, 2002; YILDIZ *et al.*, 2008; SUN *et al.*, 2009) e o tratamento de águas residuais urbanas e industriais (EMAMJOMEH; SIVAKUMAR, *et al.*, 2009; ADIN; VESCAN, 2002; FLECK, 2011).

Fleck (2011) aplicou a técnica de eletrofloculação utilizando eletrodos de sacrifício de alumínio para avaliar a redução dos parâmetros cor e turbidez em efluente têxtil. A eficiência de remoção dos parâmetros avaliados foi significativa na maioria dos ensaios realizados e mesmo com a danificação da estrutura dos eletrodos de sacrifício a eficiência de remoção manteve-se constante ao longo dos ensaios eletroquímicos. Crespilho e Rezende (2004) obtiveram resultados semelhantes ao aplicar a técnica de eletrofloculação para efluentes oriundos da indústria de processamento de coco utilizando eletrodos de alumínio. Observou-se uma remoção de 93% da turbidez no efluente tratado eletroquimicamente.

Cerqueira (2006) aplicou a técnica de eletrofloculação para o tratamento de efluente têxtil utilizando eletrodos de ferro e/ou alumínio em célula eletrolítica. Foram avaliados os parâmetros natureza e distância do eletrodo, variação de pH, potencial elétrico aplicado e tempo de reação sobre a eficiência do processo. Os resultados obtidos indicaram que o processo de

eletrofloculação nas condições operacionais estudadas é uma técnica viável para a remoção de DQO, cor e turbidez, a qual foi respectivamente de 87%, 95% e 100%. Adhoum e Monser (2004) obtiveram resultados semelhantes ao aplicar a técnica de eletrofloculação para o tratamento de efluentes de uma indústria de extração de óleo de oliva, utilizando eletrodos de alumínio e ferro. Obtiveram remoção de 76% de DQO e 95% de cor. Os eletrodos de alumínio mostraram-se mais eficientes na remoção do parâmetro cor quando comparados aos eletrodos de ferro. Silva *et al.* (2000) estudaram a viabilidade técnica da aplicação do processo eletrolítico na remoção de DQO de efluente de uma indústria de laticínios utilizando eletrodos de alumínio e ferro. Os resultados obtidos mostraram uma remoção de 60 a 80% do parâmetro DQO para os dois tipos de eletrodos de sacrifício utilizados.

Floss e Callegaro (2011) aplicaram a técnica de eletrofloculação utilizando eletrodos de sacrifício de ferro para o tratamento de efluente têxtil. Avaliou-se a eficiência de remoção dos parâmetros cor e turbidez sob diferentes condições de pH, intensidade de corrente elétrica e tempo de reação. Os resultados obtidos mostraram que a técnica de eletrofloculação é viável para o tratamento de efluentes têxteis, devido ao elevado percentual de remoção dos parâmetros em análise (68,9% para turbidez e 69,05 para cor). Cerqueira e Marques (2011) obtiveram resultados semelhantes utilizando eletrodos construídos com 4 placas de alumínio intercaladas, com 10 cm de altura, 5 cm de largura e 3 mm de espessura, separadas por espaçadores de diferentes tamanhos em água oleosa sintética. Obtiveram a pH 9, distância entre eletrodos de 0,5 cm, tempo de eletrólise de 3 minutos e aplicação de intensidade de corrente de 3 A (ampere), 99% de remoção de cor e 99% de remoção de turbidez.

Lima *et al.* (2008) compararam a eficiência do processo convencional (físico-químico) de tratamento de efluente têxtil com o processo de eletrofloculação. A eficiência da eletrofloculação depende de alguns parâmetros associados: pH, intensidade de corrente, tempo de reação, material dos eletrodos de sacrifício (Al ou Fe) e distância entre os eletrodos. Para avaliar a eficiência dos processos, foram determinados os parâmetros DQO, DBO e turbidez. Os melhores resultados foram obtidos para a intensidade de corrente 2A, pH 10,0 e 40 minutos. Houve uma diminuição de todos os parâmetros nos dois tratamentos estudados, no entanto, a eficiência do processo convencional mostrou-se superior ao tratamento eletroquímico, com redução de 76,95% de DQO, 53,75 de DBO e 94,14% de turbidez.

Borba *et al.* (2010) avaliaram a eficiência do processo de eletrofloculação utilizando eletrodos de alumínio para o tratamento de efluente de uma indústria avícola. Os resultados alcançados demonstraram ótima eficiência na remoção de poluentes orgânicos, com a remoção de aproximadamente

98% dos parâmetros cor, DQO e turbidez. O tempo de eletrólise e a densidade de corrente mínima utilizada para alcançar a ótima eficiência do processo foram baixos, gerando com isso um menor custo operacional e, por consequência, viabilizando o processo.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas últimas décadas, os problemas ambientais tornaram-se cada vez mais críticos e frequentes, considerando, notadamente, o desenvolvimento acelerado de atividades industriais potencialmente poluidoras. A indústria têxtil é uma atividade altamente impactante ao meio natural, devido, principalmente, à utilização de corantes em seu processo produtivo.

A indústria têxtil gera elevada quantidade de efluente líquido. Os efluentes provenientes dessa atividade industrial são complexos, formados, principalmente, por corantes, ácidos, bases, sais, detergentes, umectantes e oxidantes. Dessa forma, a busca por métodos eficazes para o tratamento do efluente gerado tornou-se imprescindível e a eletrofloculação surge como um método inovador e de eficácia comprovada.

O interesse em torno da utilização da eletrofloculação como técnica para o tratamento de efluentes industriais vem crescendo muito nos últimos anos, devido a sua simplicidade de operação e possibilidade de aplicação para diferentes tipos de efluentes. Entretanto, o pequeno número de estações de tratamento por eletrofloculação em funcionamento no Brasil torna-se um obstáculo para sua disseminação em grande escala.

Os resíduos gerados pelo processo de eletrofloculação são de fácil destinação e pouco impactantes ao meio natural. Os gases gerados são, em maioria, hidrogênio, oxigênio e cloro. O hidrogênio pode ser utilizado como fonte energética, o oxigênio retorna para a atmosfera, e o cloro só é gerado se o efluente tratado apresentar elevada condutividade elétrica.

O processo eletroquímico apresenta uma tendência de remoção de poluentes de efluente industrial superior às tecnologias tradicionais, o que se deve a sua característica de associar efeitos complementares às reações de oxidação/redução com a ação conjunta de microbolhas, promovendo um componente mecânico ao processo de tratamento. A associação da geração de coagulantes químicos e oxidantes no interior do reator, com ação das microbolhas (hidrogênio e oxigênio) geradas no processo, possibilita a ação sobre substâncias coloidais, em suspensão, metais pesados e compostos orgânicos.

Em termos energéticos e tempo de retenção hidráulica (TRH) do processo eletroquímico, o investimento total normalmente é inferior ao investimento realizado para outros métodos de tratamentos de efluentes. No processo eletroquímico, a toxicidade provocada por metais pesados e outras substâncias pode ser considerada irrelevante, devido à base do processo

de funcionamento ser de caráter eletroquímico.

Estudos realizados demonstram que a eficiência dos eletrodos de sacrifício depende diretamente do pH do efluente, com melhores resultados para pH próximo à neutralidade. Além disso, torna-se necessário o ajuste da condutividade elétrica do efluente, para que a capacidade de conduzir corrente elétrica seja ampliada, reduzindo o consumo energético do meio reacional. Muitos pesquisadores utilizam cloreto de sódio (NaCl) para o ajuste da condutividade elétrica, o que se torna viável pelo baixo custo de aquisição. Quando o efluente apresentar condutividade elétrica elevada, não é necessária a adição de NaCl, pois a condução de corrente elétrica é favorecida, diminuindo a influência do pH inicial na eficiência do tratamento empregado. Por outro lado, altos valores de condutividade conferem ao efluente concentração elevada de sólidos dissolvidos, que são de difícil remoção.

Vários estudos têm como objetivo principal verificar as melhores condições de tratamento do processo eletroquímico, em diferentes condições experimentais, considerando variáveis como intensidade de corrente, tempo de eletrólise, distância entre os eletrodos e pH inicial do efluente bruto a ser tratado. As variáveis que mais influenciam o processo de tratamento são aquelas relacionadas às condições de operação do reator, como intensidade de corrente e distância entre os eletrodos de sacrifício.

A técnica de eletrofloculação aplicada no tratamento de efluentes industriais apresenta ótimos resultados na remoção de poluentes orgânicos, com destaque para a indústria têxtil, amplamente encontrada na literatura. Assim, é possível inferir que a eletrofloculação tornou-se um método viável para o tratamento de efluentes, como forma de diminuir os impactos da ação antrópica sobre a integridade química, física e biológica do meio natural.

## REFERÊNCIAS

- ADHOUM, N.; MONSER, L. Descolourization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by electrocoagulation, *Chemical Engineering and Processing*, n.43, p. 1275-1280, 2004.
- ADIN, A; VESCAN, N. Electroflocculation for particle destabilization and aggregation for municipal water and wastewater treatment. *Proceedings of the American Chemistry Society*, v.42, n.2, p.537-541, 2002.
- AQUINO NETO, S; MAGRI, T. C.; SILVA, G. M; ANDRADE, A. R. Tratamento de Resíduos de Corante por Eletrofloculação: Um Experimento para Cursos de Graduação em Química. *Química Nova*, v.34, n.8, p.1468-1471, 2011.

- BAËTA, B; AQUINO, S; SILVA, S; RABELO, C. Anaerobic degradation of HYPERLINK "http://link.periodicos.capes.gov.br/ez48.periodicos.capes.gov.br/sfxlcl41?frbrVersion=4&ctx\_ver=Z39.88-2004&ctx\_enc=info:ofi/enc:UTF-8&ctx\_tim=2013-05-14T08%3A51%3A37IST&url\_ver=Z39.88-2004&url\_ctx\_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:ctx&rft\_id=info:sid/primoxlibrisgroup.com:primox3-Article-springer\_journal&rft\_val\_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:article&rft.atitle=Anaerobic%20degradation%20of%20azo%20dye%20Drimaren%20blue%20HFRL%20in%20UASB%20reactor%20in%20the%20presence%20of%20yeast%20extract%20a%20source%20of%20carbon%20and%20redox%20mediator&rft.jtitle=Biodegradation&rft.bttitle=&rft.aulast=Ba%3AAa&rft.auinit=&rft.aunit1=&rft.aunitm=&rft.ausuffix=&rft.au=Ba%3AAa%2C%20B.&rft.aucorp=&rft.date=201204&rft.volume=23&rft.issue=2&rft.part=&rft.quarter=&rft.ssn=&rft.spage=199&rft.epage=208&rft.pages=&rft.artnum=&rft.issn=0923-9820&rft.eissn=1572-9729&rft.isbn=&rft.sici=&rft.coden=&rft\_id=info:doi/10.1007/s10532-011-9499-4&rft.object\_id=&svc\_val\_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:sch\_svc&rft.eisbn=&rft\_dat=%3Cspringer\_jour%3E10.1007/s10532-011-9499-4%3C/springer\_jour%3E&rft\_id=info:oai/&svc.fulltext=yes" blue HFRL in UASB reactor in the presence of yeast extract a source of carbon and redox mediator. *Biodegradation*, v.23, n.2, p.199-208, 2012.
- BASHA, C. A; SENDHIL, J; SELVAKUMAR, K. V; MUNISWARAN, P. K. A; LEE, C. W. Electrochemical degradation of textile dyeing industry effluent in batch and flow reactor systems. *Desalination*, v.285, n.1, p.188-197, 2012.
- BORBA, F. H; MANENTI, D. R; MÓDENES, A. N; MORA, N. D; ESPINOZA-QUINONES; PALÁCIO, S. N; YASSUE, P. H; NASCIMENTO, R. Avaliação da eficiência da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes de indústrias de subprodutos avícolas. *Estudos Tecnológicos*, v.6, n.1:36-47, p.36-47, 2010.
- BRITO, J. F; FERREIRA, L. O; SILVA, J. P. Tratamento da Água de Purificação do Biosiesel Utilizando Eletrofloculação. *Química Nova*, v.35, n.4, p.728-732, 2012.
- CATANHO, M; MALPASS, G. R. P; MOTHEO, A. J. Avaliação dos tratamentos eletroquímico e fotoeletroquímico na degradação de corantes têxteis. *Química Nova*, v.29, n.5, p.983-989, 2006.
- CERQUEIRA, A. A. *Aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes têxteis*. 2006. 111f. Dissertação (Mestrado em Química)- Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.
- CERQUEIRA, A. A.; MARQUES, M. R. C. Aplicação do processo eletrolítico em corrente alternada no tratamento de água de produção. *Química Nova*, v.34, n.1, p. 59-63, 2011.
- CERQUEIRA, A. A; MARQUES, M. R. C; RUSSO, C. Avaliação do Processo Eletrolítico em Corrente alternada no Tratamento de Água de Produção. *Química Nova*, v.34, n.1, p.59-63, 2011.
- CERQUEIRA, A; RUSSO, C; MARQUES, M. R. C. Electroflocculation For Textile Wastewater Treatment. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v.26, n.4, p.659-668, 2009.
- CHEN, G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, v.38, n.1, p.11-41, 2004.
- CRESPILHO, F. N.; REZENDE, M. O. O. *Eletrofloculação: Princípios e Aplicações*. Editora Rima, São Carlos, 1ª ed. 2004. 96 p.
- CRESPILHO, F. N; REZENDE, M. O. O. *Eletrofloculação: Princípios e Aplicações*, Editora Rima, São Carlos, 1ª Ed., 96 p, 2004.
- DEL MONEGO, M. L. C. *Degradação eletroquímica de corantes e efluentes da indústria têxtil*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2007.
- EMAMJOMEH, M. M; SIVAKUMAR, M. Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flocculation processes. *Journal of Environmental Management*, v.90, n.1, p.1663-1679, 2009.
- FLECK, L. *Aplicação do controle estatístico de processos ao tratamento de um efluente têxtil por eletrofloculação*. 2011. 43f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Gestão Ambiental)- Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2011.
- FLOSS, M. I; CALLEGARO, T. *Utilização de eletrodos de sacrifício de ferro na eletrofloculação do efluente de uma indústria têxtil: avaliação da eficiência de tratamento*. 2002. 42f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Gestão Ambiental), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2011.

- FORNARI, M. M. T. *Aplicação da técnica de eletro-floculação no tratamento de efluentes de curtume*. 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Toledo, 2007.
- FREITAS, K. R. *Caracterização e reuso de efluentes do processo de beneficiamento da indústria têxtil*. 2002. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.
- GONZALEZ-GUTIERREZ, L. V; ESCAMILLA-SILVA, E. M. Reactive red azo dye degradation in a UASB bioreactor: Mechanism and kinetics. *Engineering in Life Sciences*, v.9, n.4, p.311-316, 2009.
- GUARATINI, C. C. I; ZANONI, V. B. Corantes têxteis. *Química Nova*, v.23, n.1, p. 71-78, 2000.
- HARIF, T; ADIN, A. Size and structure evolution of kaolin–Al(OH)<sub>3</sub> flocs in the electroflocculation process: A study using static light scattering. *Water Research*, v.45, n.18, p.6195-6206, 2011.
- HARIF, T; ADIN, A. Characteristics of Aggregates Formed by Electroflocculation of a Colloidal Suspension. *Water Research*, v.41, n.13, p.2951-2961, 2007.
- HASANBEIGI, A; HASANBEIGI, A; ABDORRAZAGHI, M. Comparison analysis of energy intensity for five major sub-sectors of the Textile Industry in Iran. *Journal of Cleaner Production*, v.23, n.1, p.186-194, 2012.
- HOLT, P. K; BARTON, G. W; WARK, M; MITCHELL, C. A. A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation. *Colloids and Surfaces*, v.211, n.1, p.233-248, 2002.
- KANNAN, N; SUNDARAM, M. M. Kinetics and mechanism of removal of methylene blue by adsorption on various carbons—a comparative study. *Dyes and Pigments*, v.51, n.1, p.25-40, 2001.
- KHLIFI, R; LASSAD, B; WOODWARD, S; ELLOUZ, M; DHOUIB, A; SAYADI, S; MECHICHI, T. Decolourization and detoxification of textile industry wastewater by the laccase-mediator system. *Journal of Cleaner Production*, v.175, n.1-3, p.802-808, 2010.
- KUNZ, A; ZAMORA, P. P; MORAES, S. G; DURÁN, N. Novas Tendências no Tratamento de Efluentes Têxteis. *Química Nova*, v.25, n.1, p.78-82, 2002.
- LIMA, S. B.; SOUZA, D. C.; LOPES, K. V.; SILVA, N. M.; RAMOS, R. M. Estudo comparativo entre tratamento convencional e eletro-floculação de efluente de lavanderia industrial têxtil. In: 31ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química, 31, 2008. São Paulo. *Anais...* São Paulo. 2008.
- MAHMOODI, N. M; HAYATI, B; ARAMI, M; LAN, C. Adsorption of textile dyes on Pine Cone from colored wastewater: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Desalination*, v.268, n.1-3, p.117-125, 2011.
- MESHKO, V; MARKOVSKA, L; MINCHEVA, M; RODRIGUES, A. E. Adsorption of basic dyes on granular activated carbon and natural zeolite. *Water Research*, v.35, n.14, p.3357-3366, 2001.
- MOLLAH, M. Y. A; SCHENNACH, R; PARGA, J. R; COCKE, D. L. Electrocoagulation (EC) science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, v.84, n.1, p.29-41, 2001.