

II-003 - AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS À TÉCNICA DE ELETROFLOCULAÇÃO, APLICADA AO EFLUENTE DE UMA INDÚSTRIA TÊXTIL

Aline Raquel Müller⁽¹⁾

Tecnóloga em Gestão Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Medianeira. Mestre em Tecnologias Ambientais pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Medianeira.

Ionara Fernanda Hoffmann

Tecnóloga em Gestão Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Medianeira. Mestranda em Tecnologias Ambientais pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Medianeira.

Janaina Ferreira de Carvalho

Tecnóloga em Gestão Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Medianeira.

Eduardo Eyng

Engenheiro Químico pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Doutor em Engenharia Química pelo UNICAMP. Docente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Medianeira.

Fábio Orssatto

Tecnólogo Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Medianeira. Mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Doutorando em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Docente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Medianeira.

Endereço⁽¹⁾: Av. Brasil, 4232 - Medianeira - PR - CEP: 85884-000 - Brasil - Tel: (45) 3240-8000 - e-mail: alineraquelmuller@gmail.com

RESUMO

A principal contribuição deste trabalho foi avaliar os efeitos das variáveis pH, condutividade elétrica, intensidade de corrente e tempo de reação, no desempenho da técnica de eletrofloculação aplicada ao efluente de uma indústria têxtil, constituído por uma matriz complexa (mistura de cinco corantes diretos). As variáveis respostas foram turbidez e demanda química de oxigênio (DQO). O material testado como eletrodo de sacrifício foi o alumínio. O planejamento experimental constituiu-se em um delineamento fatorial fracionado, 2^{4-1} . Nenhuma das variáveis analisadas se mostrou significativa para a faixa de valores estudada, no entanto as variáveis que demonstraram ter uma maior tendência à significância foram tempo de reação e intensidade de corrente. As variáveis pH e condutividade elétrica não apresentaram qualquer efeito sobre a turbidez e a DQO, o que pode ser interessante para o processo de eletrofloculação em escala piloto e industrial pois, o controle destas variáveis exigiriam a utilização de produtos químicos, ocasionando elevação dos custos operacionais. Com relação à eficiência do tratamento do efluente têxtil pela técnica da eletrofloculação, esta se mostrou satisfatória para as condições testadas.

PALAVRAS-CHAVE: Eletrofloculação, Efluentes Têxteis, Tratamento Eletroquímico.

INTRODUÇÃO

As indústrias têxteis requerem grandes quantidades de água, corantes e produtos químicos ao longo de sua cadeia produtiva. Isto torna o processamento têxtil gerador de uma significativa quantidade de despejos aquosos altamente poluidores do meio ambiente, contendo elevada carga orgânica, cor acentuada e compostos tóxicos (PASCHOAL & TREMILIOSI-FILHO, 2005).

Para diminuir os impactos negativos causados pelo lançamento do efluente da indústria têxtil, busca-se o tratamento deste através de processos químicos, físicos e biológicos. Entretanto, é constante a tentativa de se aprimorar o sistema de tratamento, sendo desejável que este atenda aos requisitos de eficiência, ao menor custo possível. Alternativas ao tratamento tradicional de efluentes têxteis vêm sendo alvo de vários trabalhos científicos, entre os quais destacam-se a adsorção, processos oxidativos avançados, degradação biológica e a eletrofloculação.

Em seu trabalho, Raymundo et al (2010) utilizou bagaço de cana-de-açúcar como bioadsorvente, avaliando a remoção do corante carcinogênico *Congo Red*. Os resultados encontrados demonstraram a eficiência do tratamento, sendo removidos, por meio da utilização de 10,0 g de bioadsorvente, $64 \pm 6\%$ do corante em uma solução sintética, e $94 \pm 5\%$ em um efluente têxtil enriquecido com o corante.

O emprego de processos oxidativos avançados na descoloração e mineralização de efluente têxtil foi objeto de estudo de Vilar et al (2011), sendo testados diversas configurações, homogêneas e heterogêneas, em escala piloto, utilizando-se um coletor parabólico composto. Os melhores resultados foram obtidos para o sistema solar-foto-fenton, com uma concentração de $100 \text{ mg Fe}^{2+} \cdot \text{L}^{-1}$.

Já o trabalho desenvolvido por Queiroz (2011) propõe a degradação de corante por meio da incubação de cianobactéria *Anabaena flos-aqual*, testado sob dois diferentes meios de cultura. Os resultados da pesquisa demonstram um potencial de degradação satisfatório para o tratamento do corante Azul Drim CL R, sendo que o mesmo comportamento não se repetiu quando da análise do corante Amarelo Drim CL 2R.

Processos eletroquímicos aplicados à problemática do tratamento de efluente têxteis também podem ser encontrados na literatura. Neste sentido, destaca-se a pesquisa desenvolvida por Yuksel et al (2010), na qual a remoção do corante reativo *Orange 84* foi avaliada, utilizando-se a eletrofloculação. Neste trabalho foram testados eletrodos de aço inoxidável e ferro, sob diferentes condições de pH, densidade de corrente e tempo de reação. Os resultados demonstraram que os eletrodos constituídos de aço inoxidável se mostraram superiores aos de ferro, sendo atingidos níveis de remoção na ordem de 89,7% de DQO, 91,2% de Carbono Orgânico Total, 90,3% de turbidez e 94,1% de sólidos suspensos totais.

Dentro do contexto do tratamento de efluentes têxteis, a eletrofloculação mostra-se como uma boa alternativa devido à sua simplicidade de operação e aplicação em diversos tipos de efluentes industriais, oferecendo como benefícios: versatilidade, eficiência energética, segurança, reações rápidas e sistemas de menor tamanho, utilizando corrente elétrica para o tratamento ao invés de produtos químicos, requerendo equipamentos simples e de fácil operação, controle na liberação do coagulante, entre outros (FORNARI, 2007).

Tal técnica baseia-se na geração de coagulantes *in situ* pela dissolução de íons de ferro e/ou alumínio, de acordo com o tipo de eletrodo de sacrifício utilizado pela ação de uma corrente elétrica, sendo que o controle das condições operacionais do processo que impactam a eficácia do tratamento é imprescindível. Neste sentido é de extrema importância identificar quais variáveis são realmente pertinentes.

Sendo assim, a principal contribuição deste trabalho consiste na aplicação da técnica de eletrofloculação em um efluente líquido de uma indústria têxtil, o qual constitui uma matriz complexa composta pela mistura de cinco corantes diretos, objetivando identificar os efeitos principais das variáveis pertinentes à técnica, tais como: condutividade elétrica, pH, intensidade de corrente e tempo de reação sobre o desempenho da técnica avaliado por indicadores como turbidez e DQO.

MATERIAIS E MÉTODOS

O efluente utilizado neste experimento foi coletado em uma indústria têxtil, localizada no município de Céu Azul (PR) o qual utiliza em seu processo uma mistura de corantes diretos com os seguintes *color index*: *Red 89*, *Orange 34*, *Blue 94*, *Brown 116* e *Black 22*. O efluente foi transportado em embalagens plásticas e armazenado em congelador para posteriores testes e análises.

O estudo consistiu em aplicar a técnica de eletrofloculação em um efluente têxtil, onde o sistema alvo da pesquisa incidiu em um reator batelada de bancada (béquer de 1L), o qual comportou o eletrodo de sacrifício (placas de alumínio com 100 mm de comprimento x 50 mm de largura e 0,6 mm de espessura), assim como o efluente líquido a ser tratado. Os eletrodos por sua vez foram conectados a uma fonte de corrente contínua (Fonte de alimentação Modelo FA-3050, Marca: *Instrutherm*) de modo a viabilizar a eletrofloculação. A Figura 1 ilustra o sistema de tratamento utilizado.

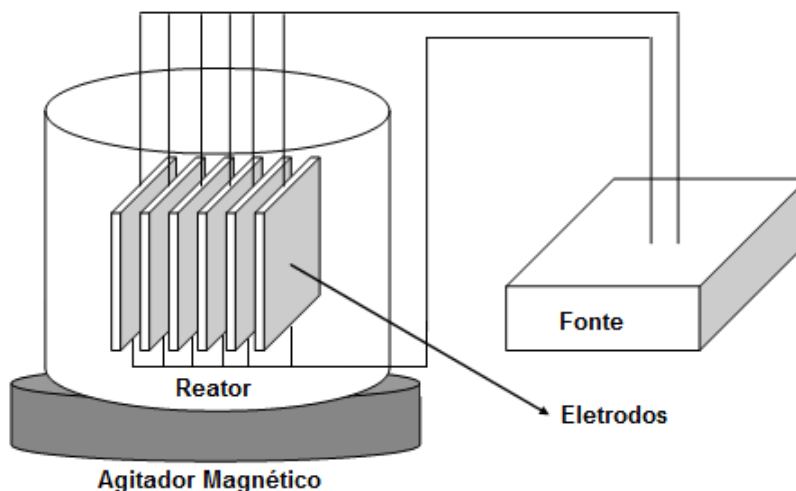


Figura 1: Diagrama Esquemático Experimental

As análises foram efetuadas no efluente bruto e no efluente tratado (eletrofloculado) para fins de avaliação da eficiência da técnica.

Para a aplicação da eletrofloculação utilizou-se o delineamento fatorial fracionado 2^{4-1} , adicionando-se 4 pontos centrais (para estimativa do erro experimental, ou seja, da variabilidade do processo), objetivando o cálculo dos efeitos, segundo a Tabela 1. É importante ressaltar que este procedimento permite apenas analisar o efeito dos fatores, não permitindo a obtenção do modelo ou ainda a superfície de resposta, sendo estes obtidos por meio do delineamento composto central rotacional (DCCR). Para análise estatística dos dados obtidos foi utilizado o programa *Statistica*®.

Tabela 1: Delineamento fatorial fracionado das variáveis independentes

Ensaio	pH	Condutividade	Intensidade de Corrente	Tempo
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	1
3	-1	1	-1	1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	1
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0

Na Tabela 2 estão expressos os valores referentes aos níveis estudados para os fatores.

Tabela 2: Níveis estudados para as variáveis independentes

Variável Independente	-1	0	1
pH	5	6	7
Condutividade elétrica (mS.cm^{-1})	3	4	5
Intensidade de Corrente (A)	1,5	2,25	3
Tempo (min)	7	10,5	14

Fez-se um sorteio para determinar a ordem dos experimentos, intercalando a cada duas análises sorteadas um ponto central. Foram realizados 12 ensaios.

Seguindo a ordem do sorteio, ajustou-se o pH (com uma solução de Hidróxido de Sódio 0,1M ou Ácido Clorídrico 0,1M, conforme necessário) e a condutividade elétrica (por meio da adição de Cloreto de Sódio P.A.) das amostras e posteriormente procedeu-se a eletrofloculação, ajustando a intensidade de corrente e controlando o tempo conforme já estabelecido pela matriz da Tabela 1. Realizada a eletrofloculação, deixou-se as amostras em repouso para a flotação do lodo gerado o qual foi descartado, sendo analisada a turbidez e DQO do efluente tratado.

Para o efluente bruto realizava-se a agitação magnética paralelamente aos ensaios, respeitando-se o mesmo tempo de repouso das amostras eletrofloculadas, para posterior análise de turbidez e DQO, não sendo ajustado o pH e a condutividade elétrica.

As determinações dos parâmetros foram realizadas em duplicata, sendo considerados apenas os valores médios obtidos. Os métodos utilizados constam na Tabela 3.

Tabela 3: Métodos utilizados para a análise dos parâmetros estudados

Parâmetro	Unidade	Método
DQO	mg.L ⁻¹	(APHA, 2005) – Colorimétrico
pH	-	Potenciométrico pHmetro – Marca Hanna – Modelo pH 21
Condutividade Elétrica	mS.cm ⁻¹	Condutivímetro Marca Digimed – Modelo CD-21
Turbidez	UNT	(APHA, 2005) – Nefelométrico Turbidímetro – Marca Tecnopon

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos efeitos das variáveis estudadas para a turbidez e DQO podem ser observados nas Tabelas 4 e 6.

Vale lembrar que para os efeitos serem significativos o p-valor deve ser menor que 0,05. Conforme pode ser observado nas Tabelas 4 e 6 nenhuma das variáveis independentes (pH, condutividade, intensidade de corrente e tempo) mostrou ter influência nas variáveis dependentes (turbidez e DQO). Entretanto as variáveis que apresentam ter uma tendência a significância (pois os valores de p-valor se aproximaram de 0,05) são tempo e intensidade de corrente.

Tabela 4: Efeitos das variáveis independentes estudadas na variável turbidez (UNT) para o eletrodo de Alumínio

FATOR	EFEITO	ERRO EXPERIMENTAL	t (7)	p-valor
Mean/Interc	9,23000	1,318089	7,002563	0,000211
Ph	-1,39500	3,228645	-0,432070	0,678688
Condutividade (mS.cm ⁻¹)	0,23000	3,228645	0,071237	0,945201
Intensidade de corrente (A)	3,57500	3,228645	1,107276	0,304767
Tempo (min)	-2,65000	3,228645	-0,820778	0,438826

Pode-se observar os valores de eficiência do tratamento para a variável turbidez na Tabela 5.

Tabela 5: Eficiência do tratamento expresso em termos da variável turbidez (UNT)

Ensaio	Turbidez (bruto)	Turbidez (eletrofloculado)	Eficiência (%)
1	183,00	10,25	94,40
2	192,50	10,65	94,47
3	152,50	5,80	96,20
4	152,50	4,47	97,07
5	192,00	6,56	96,58
6	183,00	10,40	94,32
7	192,50	18,50	90,39
8	192,00	10,01	94,79
9	192,50	13,13	93,18
10	183,00	9,56	94,78
11	183,00	8,63	95,28
12	152,50	2,80	98,16

Em média, a eficiência na remoção de turbidez foi de $94,96 \pm 2,00\%$ o que pode ser considerado satisfatório, sendo que o melhor desempenho apresentou-se com pH 6, condutividade elétrica de 4 mS.cm^{-1} , intensidade de corrente de 2,25 A e 10,5 minutos de reação. Cerqueira (2006) aplicou a técnica de eletrofloculação no tratamento de efluente de indústria têxtil e atingiu uma remoção de 93% com eletrodo de alumínio, valor próximo ao encontrado no presente trabalho.

A resolução do CONAMA 430 não menciona padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos para turbidez (BRASIL, 2011), porém, para efeito de comparação, a resolução do CONAMA 357 menciona que, para corpos hídricos de água doce de classe I, o valor de máximo para turbidez é de 40 UNT (BRASIL, 2005), ou seja, 100% dos valores obtidos estão abaixo.

A Figura 2 ilustra a alta eficiência na remoção de turbidez.



Figura 2: Amostras bruta e pós-tratada por eletrofloculação.

Tabela 6: Efeito da variável DQO (mg.L⁻¹) para o eletrodo de Alumínio

FATOR	EFEITO	ERRO EXPERIMENTAL	t (7)	p-valor
Mean/Interc	180,7000	6,66551	27,10972	0,000000
pH	-0,3150	16,32709	-0,01929	0,985146
Condutividade (mS.cm ⁻¹)	-14,8150	16,32709	-0,90739	0,394365
Intensidade de corrente (A)	-24,4850	16,32709	-1,49965	0,177386
Tempo (min)	-30,3350	16,32709	-1,85795	0,105528

A Tabela 7 mostra a eficiência que o tratamento apresentou para remoção de DQO.

Tabela 7: Eficiência da variável DQO (mg.L⁻¹) para o eletrodo de Alumínio

Ensaio	DQO (bruto)	DQO (eletrofloculado)	Eficiência (%)
1	453,61	190,73	57,95
2	476,10	180,35	62,12
3	439,08	180,76	58,83
4	439,08	196,05	55,35
5	315,65	156,36	50,46
6	453,61	201,11	55,66
7	476,10	171,7	63,94
8	315,65	120,78	61,74
9	476,10	187,27	60,67
10	453,61	208,02	54,14
11	453,61	213,21	53,00
12	439,08	162,06	63,09

A eficiência do tratamento para a DQO foi em média de 58,08 ±4,36% sendo que variou entre 50,46% a 63,94%. O melhor desempenho foi obtido através das seguintes condições: pH 5, condutividade elétrica igual a 5 mS.cm⁻¹, intensidade de corrente de 3 A e 7 minutos de reação. Comparado ao trabalho de Cerqueira (2006), em termos de DQO não houve a mesma eficiência, já que o autor atingiu um valor de 70% de remoção.

Kato & Piveli (2005) citam que a turbidez é oriunda dos sólidos suspensos presentes no efluente. Dessa maneira acredita-se que a eficiência do tratamento, a níveis razoáveis para a DQO quando comparado à turbidez se deve ao fato de parte da matéria orgânica ter permanecido dissolvida.

CONCLUSÕES

Para a faixa de valores estudada, nenhuma variável se mostrou significativa estatisticamente a 5% de significância. Porém os fatores que demonstraram ter uma maior tendência a influência nas variáveis respostas foram a intensidade de corrente e tempo de reação. Já as variáveis pH e condutividade elétrica não mostraram ter significância aproximada como as demais, o que pode ser interessante para o processo de eletrofloculação em escala piloto e industrial pois, se tivessem efeito sobre as variáveis dependentes exigiriam a utilização de produtos químicos para o seu controle, aumentando os custos operacionais.

Analisando a eficiência de remoção do parâmetro DQO mostrou-se eficácia regular. Já para a turbidez, a eficiência foi satisfatória.

Deste modo, este trabalho avaliou com êxito os efeitos do pH, condutividade, intensidade de corrente e tempo de reação sobre as variáveis respostas turbidez e DQO, para a aplicação da eletrofloculação no tratamento de um efluente de indústria têxtil, composto por uma mistura de cinco corantes diretos. Como a intensidade de corrente e o tempo foram as variáveis que demonstraram uma maior tendência à significância, novos estudos

são necessários para que se possa, inclusive, expandir a faixa de estudo. Ressalta-se ainda a utilização do delineamento fracionado, uma vez que o número de ensaios para a continuação da pesquisa será reduzido de 32 ensaios (DCCR com 4 fatores estudados, 2⁴) para 8 (DCCR com 2 fatores estudados, 2²).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). Standard methods for the Examination of Water and Wastewater. 21^a ed. Estados Unidos da América, 2005.
2. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução 357. Brasília, DF, Brasil, 2005.
3. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução 430. Brasília, DF, Brasil, 2011.
4. CERQUEIRA, A. A.; RUSSO, C. Aplicação da técnica de eletrofoculação no tratamento de efluentes têxteis. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Química pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2006.
5. FORNARI, Marilda Menchon Tavares. Aplicação da técnica de eletro-floculação no tratamento de efluentes de curtume. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-graduação em Engenharia Química pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2007.
6. KATO, M. T.; PIVELI, R. P. Qualidade das águas e poluição: Aspectos físico-químicos. ABES: São Paulo, p. 285. 2005.
7. PASCHOAL, F. M. M.; TREMILIOSI-FILHO, G. Aplicação da tecnologia de eletrofloculação na recuperação do corante índigo blue a partir de efluentes industriais. Química Nova, v. 28, n. 5, 766-772p. 2005.
8. QUEIROZ, B. P. V.; STEFANELLI, T. Biodegradação de Corantes Têxteis por *Anabaena flos-aqual*. Engenharia Ambiental – Espírito Santo do Pinhal, v.8, n.1, p. 26-35, 2011.
9. RAIMUNDO, A. S.; ZANAROTTO, R.; BELISÁRIO, M.; PEREIRA, M. de G.; RIBEIRO, J. N.; RIBEIRO, A. V. F. N. Evaluation of Sugar-Cane Bagasse as Bioadsorbent in the Textile Wastewater Treatment Contaminated with Carcinogenic Congo Red Dye. Brazilian Archives of Biology and Technology, v. 53, n. 4: 931-938, 2010.
10. VILAR, V. J. P.; PINHO, L. X.; PINTOR, A. M. A.; BOAVENTURA, R. A. R. Treatment of textile wastewaters by solar-driven advanced oxidation processes. Solar Energy, 85: 1927-1934, 2011.
11. YUKSEL, E.; EYVAZ, M.; GURBULAK, E. Electrochemical treatment of Colour Index Reative Orange 84 and Textile Wastewater by using Stainless Steel and Iron Electrodes. Environmental Progress & Sustainable Energy, v. 00, n. 00, 2011.