

UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS DE ERECHIM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

RAFAELA DE MAMAN

**ELETROFLOCULAÇÃO APLICADA NO TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL
UTILIZANDO COMO ELETRODOS RESÍDUO DE INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO E
SUCATA DE FERRO**

ERECHIM, RS

2019

RAFAELA DE MAMAN

**ELETROFLOCULAÇÃO APLICADA NO TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL
UTILIZANDO COMO ELETRODOS RESÍDUO DE INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO E
SUCATA DE FERRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Orientadora: Prof. Dr^a Gean Delise L. P. Vargas
Coorientador: Prof. Dr^a Clarissa Dalla Rosa

**ERECHIM, RS
2019**

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Maman, Rafaela de

Eletrofloculação aplicada no tratamento de efluente têxtil utilizando como eletrodos resíduo de indústria de fundição e sucata de ferro / Rafaela de Maman. -- 2019. 65 f.:il.

Orientadora: Prof. Dra Gean Delise L. P. Vargas.

Co-orientadora: Prof. Dra Clarissa Dalla Rosa.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental-PPGCTA, Erechim, RS, 2019.

1. Eletrofloculação. 2. Efluente têxtil. 3. Resíduo de fundição. I. Vargas, Prof. Dra Gean Delise L. P., orient. II. Rosa, Prof. Dra Clarissa Dalla, co-orient. III. Universidade Federal da Fronteira Sul. IV. Título.

RAFAELA DE MAMAN

**ELETROFLOCULAÇÃO APLICADA NO TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL
UTILIZANDO COMO ELETRODOS RESÍDUO DE INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO E
SUCATA DE FERRO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS. Para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental, defendido em banca examinadora em ____/____/ 20____.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Gean Delise Leal Pasquali Vargas
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Clarissa Dalla Rosa

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Gean Delise Leal Pasquali Vargas – UFFS

Prof^a. Dr^a. Clarissa Dalla Rosa – UFFS

Prof^a. Dr^a. Regina de Fátima Peralta Muniz Moreira – UFSC

Prof. Dr. Liérson Borges de Castro – UFFS

Erechim/RS, 13 de dezembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial aos meus pais, Aladir e Volnei, e à minha irmã, Natália, pelo carinho, incentivo e apoio em todos os momentos.

À minha orientadora, professora Gean Delise Leal Pasquali Vargas, pela oportunidade de ingressar no programa de pós-graduação, pelo incentivo e suporte sempre que necessário. Obrigada por ter acreditado em mim e me apoiado, foi fundamental em todos momentos da pesquisa.

A minha coorientadora, professora Clarissa Dalla Rosa, por todos ensinamentos compartilhados.

Aos colegas de laboratório, Ériッサ, Gabriel, Joice, Josiane, Tainá e Willian pelo auxílio durante as atividades no laboratório, pelas conversas e chimarrão nos intervalos e pela companhia de todos os dias.

À colega de mestrado, Manuella, pela companhia, reclamações e amizade construída durante a pesquisa.

Aos técnicos, pelo auxílio com as análises e atividades laboratoriais, e pelo incentivo durante a pesquisa.

Ao meu namorado, Stephen, por todo apoio, incentivo, força, compreensão e por ouvir todas reclamações durante o processo. Obrigada por estar sempre presente!

À minha prima Roberta, por sempre me ouvir, me entender e incentivar!

Aos meus amigos do coração, Renata e Robson, que mesmo com a distância estão sempre presentes nos meus dias. O apoio de vocês é fundamental!

Aos voluntários Julia, Leonardo e Natalia pelo auxílio com algumas análises laboratoriais.

Às empresas, Cercena e Index Jens, pela disponibilização dos materiais utilizados na pesquisa.

À todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste estudo.

RESUMO

ELETROFLOCULAÇÃO APLICADA NO TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL UTILIZANDO COMO ELETRODOS RESÍDUO DE INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO E SUCATA DE FERRO

AUTORA: Rafaela De Maman

ORIENTADORA: Prof. Dr^a Gean Delise L. P. Vargas

COORIENTADOR: Prof. Dr^a Clarissa Dalla Rosa

As atividades de uma indústria têxtil apresentam grande contribuição para a contaminação ambiental de corpos hídricos, devido ao grande volume e complexidade dos efluentes gerados, dentre os poluentes destacam-se os corantes. O corante Índigo Blue é muito utilizado na indústria têxtil, especificamente no tingimento de jeans, e os efluentes gerados nesse processo são extremamente tóxicos para o ambiente aquático. Devido à dificuldade em se tratar estes efluentes, surge a necessidade do desenvolvimento e aprimoramento de técnicas para seu tratamento, destacando os processos eletroquímicos como uma técnica promissora. Os reatores eletroquímicos geram coagulantes *in situ* a partir da aplicação de corrente elétrica em eletrodos metálicos. Sua aplicação ganha destaque devido à sua boa eficiência no tratamento de vários tipos de efluentes, ressalta sua viabilidade econômica, fácil operação e necessita de pequenas áreas de ocupação. Além disso, foram utilizados 2 tipos de materiais como eletrodos metálicos, um é caracterizado como um resíduo de fundição, conhecidos como escória de ferro, que teriam a destinação final em aterro industrial, diminuindo assim seu descarte no meio ambiente. O outro sucata de ferro, material descartado no processo de corte de peças metálicas e que será derretido e reutilizado em novas peças. Dentro deste contexto o objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de emprego de escória de ferro e sucata de ferro como eletrodos no processo eletroquímico, voltado ao tratamento de efluentes de indústria têxtil para a remoção de corantes. Os experimentos foram conduzidos em um reator eletroquímico equipado com eletrodos metálicos, conectados à uma fonte de alimentação de corrente contínua. Para análise da eficiência do processo eletroquímico, foram determinados, antes e após o tratamento, os parâmetros de cor, pH, condutividade elétrica, geração de lodo, desgaste dos eletrodos, remoção de fenol, demanda química de oxigênio (DQO) e carbono orgânico total (COT). Foram obtidos resultados médios de remoção com o uso da escória de ferro no efluente sintético de 95 % para a cor e 100 % para fenol, e no efluente têxtil 80 % para cor, 91 % para turbidez, 100 % para fenol, 65 % para COT e 49 % para a DQO. Já o uso da sucata de ferro no efluente sintético a remoção média ficou em torno de 95 % para cor, 95 % para fenol e no efluente têxtil 92 % para cor, 97 % para turbidez, 100 % para fenol, 65 % para COT e 49 % para a DQO. Os resultados obtidos demonstraram eficiência do processo na remoção dos poluentes, demonstrando assim o potencial de uso da escória de ferro e da sucata de ferro como eletrodos no processo de eletrofloculação.

Palavras chave: Efluente têxtil. Tratamento eletroquímico. Resíduo de Fundição. Corantes.

ABSTRACT

ELETROFLOCULAÇÃO APLICADA NO TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL UTILIZANDO COMO ELETRODOS RESÍDUO DE INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO E SUCATA DE FERRO

AUTORA: Rafaela De Maman

ORIENTADORA: Prof. Dr^a Gean Delise L. P. Vargas

COORIENTADOR: Prof. Dr^a Clarissa Dalla Rosa

The textile industry activities represents a major contribution to the environmental contamination of hydrous body, due to the large volume and complexity of the generated effluents, among the pollutants stand out the dyes. Indigo Blue dye is widely used in the textile industry, specifically in the dyeing of jeans and the effluents generated in this process are extremely toxic to the aquatic environment. Due to the difficulty in treating these effluents the need arises for the development and improvement of techniques for their treatment, highlighting the electrochemical processes as a promising technique. Electrochemical reactors generate *in situ* coagulants from the application of electric current to metallic electrodes. Its application is highlighted due to its good efficiency in the treatment of various types of effluents, underlines its economic viability, easy operation and requires small areas of occupation. In addition, two types of materials were used as metal electrodes, one is characterized as a foundry waste, known as iron slag, which would have the final destination in industrial landfill, thus reducing its disposal in the environment. The other scrap of iron, material discarded in the process of cutting metal parts and that will be melted and reused in new parts. Therefore, the objective of this project is to evaluate the potential use of iron slag and iron scrap as electrodes in the electrochemical process aimed at the treatment of textile industry effluents for dye removal. The experiments were conducted in an electrochemical reactor equipped with metal electrodes, connected to a direct current power supply. To analyze the efficiency of the electrochemical process, before and after treatment, the parameters of color, pH, electrical conductivity, sludge generation, electrode wear, phenol removal, chemical oxygen demand (COD) and total organic carbon were analyzed. (TOC). Results were obtained with the use of iron slag in the synthetic effluent average removal of 95 % color and 100 % phenol, and in the textile effluent 80 % color, 91 % turbidity, 100 % phenol, 65 % TOC and 49 % COD. On the other hand, the use of iron scrap in the synthetic effluent removes an average of 95 % color, 95 % phenol, in the textile effluent 92 % color, 97 % turbidity, 100 % phenol, 65 % COT and 49 % COD. The results demonstrated the efficiency of the process in the removal of pollutants, thus demonstrating the potential use of iron slag and scrap as electrodes in the electroflocculation process.

Keywords: Textile effluente. Electrochemical treatment. Foundry waste. Dyes.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	OBJETIVOS.....	14
2.1.1	Objetivo geral	14
2.1.2	Objetivos específicos	14
3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	15
4	ARTIGO I.....	16
4.1	INTRODUÇÃO	16
4.2	MATERIAS E MÉTODOS	18
4.2.1	Efluente sintético	20
4.2.2	Efluente da indústria têxtil.....	21
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.3.1	Efluente sintético	21
4.3.2	Efluente da indústria têxtil.....	27
4.4	CONCLUSÃO	30
4.5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31
5	ARTIGO II	35
5.1	INTRODUÇÃO	35
5.2	MATERIAIS E MÉTODOS	37
5.2.1	Efluente sintético	38
5.2.2	Efluente da indústria têxtil.....	39
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.3.1	Efluente sintético	40
5.3.2	Efluente Indústria Têxtil	45
5.4	CONCLUSÃO	51
5.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
7	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	57
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58

INTRODUÇÃO

Na maioria dos países, a indústria têxtil representa uma grande importância na economia, sendo elas um dos segmentos de indústrias de maior tradição. Devido ao grande volume de produção, consequentemente é gerado um significativo volume de resíduos, podendo ser líquido, sólido ou gasoso (IMNICH, 2006; AL-MAMUN et al., 2019). No Brasil o desenvolvimento do setor têxtil tem sua trajetória com cerca de 200 anos com muitos casos de sucesso e insucesso em diferentes épocas, onde o fator tecnologia é um ponto estratégico nas mudanças e crescimento das empresas (FUJITA, 2015).

A indústria têxtil é um dos setores que mais gera efluentes em seu processo produtivo, onde as características destas águas residuárias dependem da tecnologia utilizada na produção, dos produtos químicos e do tipo de fibra utilizados. A composição do efluente têxtil inclui altas cargas orgânicas, ácidos, compostos orgânicos voláteis, hidrocarbonetos, álcalis, corantes e outros produtos químicos tóxicos como os Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) resistentes à degradação ambiental (SHOUKA, et al. 2019). As etapas do processo que apresentam o maior consumo de água é a de lavagem, tingimento e acabamento dos tecidos, além da lavagem dos equipamentos, gerando uma elevada quantidade de efluente líquido (IMNICH, 2006; FORTINO, 2014).

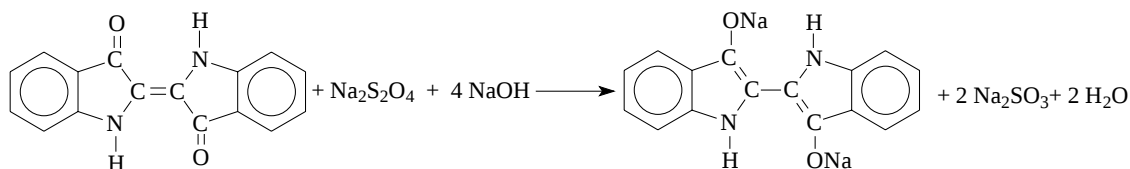
Um dos grandes desafios da indústria têxtil é a difícil remoção de cor dos seus efluentes, devido à alta resistência química dos corantes usados no processo, característica que torna difícil a degradação destes compostos (SIRIRERKRATANA, et al. 2019), no entanto, a imposição de rigorosos padrões de qualidade tem obrigado as indústrias a buscarem tecnologias que acarretem na adequação destas águas aos padrões exigidos (CERQUEIRA et. al, 2009).

As indústrias têxteis utilizam, principalmente, os corantes classificados como indigóides, a qual pertence o corante Índigo Blue, e são considerados os mais antigos dos corantes, utilizados por mais de 5 mil anos para o tingimento de lã, linho e algodão (HUNGER, 2003). O corante Índigo Blue apresentava inicialmente origem vegetal, extraído de plantas, porém, em 1880 foi substituído sinteticamente (GUARATINI, 2000).

Os corantes apresentam uma complexa estrutura molecular muito resistente a degradação biológica (SIRIRERKRATANA, et al. 2019), característica que dificulta sua remoção. O corante Índigo Blue apresenta uma coloração azul e é insolúvel em água por ter como característica química a presença do grupo cetônico ($C=O$), porém, quando ocorre a alteração na forma reduzida ($C-OH$), torna-se solúvel e o corante passa a ter afinidade química pela fibra celulósica, (PASCHOAL e TEMILIOSI-FILHO, 2005). Ainda, segundo o mesmo autor, o processo de tingimento ocorre por meio da reação de oxirredução, onde reduz-se o

corante na forma de Leucoíndigo, que ao entrar em contato com o tecido, ocorre a fixação pela reoxidação com ar, voltando a forma original do Índigo Blue, deixando a fibra com coloração azul (Figura 1).

Figura 1 – Reação de redução química do corante Índigo Blue usada na fixação nas fibras dos tecidos.



Fonte: Paschoal e Temiliosi-Filho, 2005.

Todos os corantes índigo incluem uma ligação dupla central (conectando os sistemas de anel indólico bicíclico), juntamente com o heterocíclico átomos de nitrogênio e grupos carbonila, para a extensão da conjugação eletrônica, o índigo demonstra uma mudança batocrômica significativa da diferença de energia entre o orbital molecular mais alto ocupado (HOMO) e o orbital molecular mais baixo desocupado (LUMO). Isso fornece a coloração azul-púrpura para essas moléculas quando em um solvente polares (VOLKOV, et al. 2020).

O efluente têxtil, devido as alterações no corante utilizado no processo produtivo, apresenta características específicas, como: cor intensa, alta demanda química de oxigênio (DQO), carbono orgânico total (COT) (LIMA, et al 2015), grande teor de sólidos dissolvidos e variação de pH (CERQUEIRA et. Al, 2009). Estes efluentes apresentam em sua maioria grande toxicidade ao ecossistema devido à presença de soda, que pode afetar diretamente o crescimento e o processo de nutrição de plantas, além da grande quantidade de nitrogênio, fenóis, ferro e outros metais influenciam diretamente no ecossistema aquático e microbiano, além disso, as altas concentrações de DQO e DBO desregulam o oxigênio presente no meio (CHAKRABORTY, 2014; SIRIRERKRATANA et al., 2019).

Diante das exigências das legislações, o tratamento do efluente têxtil é algo necessário e de grande importância devido a todos os impactos que podem causar se sua disposição no meio ambiente for de forma incorreta (FORTINO, 2012). O tratamento do efluente têxtil pode ser de origem física, química ou biológica, além de poder ocorrer a interação entre processos para se obter uma melhor eficiência do tratamento (HOLKAR, 2016).

Os processos eletroquímicos são técnicas aplicadas para a remoção de contaminantes de diversos efluentes, muito utilizados no tratamento de efluentes de indústria têxtil, (KHANDEGAR & SAROHA, 2013), metais pesados (SILVA et al., 2018), compostos

orgânicos (FAJARDO et al., 2015, OLIVEIRA et al., 2018; COSTA et al., 2019), óleos (CAÑIZARES et al., 2008) e sólidos em suspensão (SADEDDIN et al., 2011).

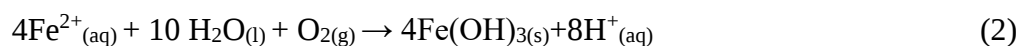
O processo de eletrofloculação baseia-se nos princípios de processos eletroquímicos, onde o efluente a ser tratado passa entre os eletrodos, placas metálicas, dispostas paralelamente, alimentados por uma corrente elétrica contínua. Várias reações acontecem ao nível dos eletrodos, reduzindo os poluentes por oxidação, coagulação, floculação e sedimentação ou flotação. Os eletrodos de sacrifício geram íons metálicos, através do potencial elétrico aplicado, os quais hidrolisam e formam um agente coagulante (CRESPILHO E REZENDE, 2004; KISMIR & AROGUZ, 2011).

A eletrofloculação no tratamento de águas residuárias industriais, tem sua eficiência apontada em estudos, onde apresenta alta remoção de matéria orgânica e cor, podendo atingir eficiências de 98%. Além disso, apresenta outros aspectos vantajosos, condições operacionais brandas, facilidade de automação, versatilidade e baixo custo se estiver trabalhando com energia renovável (COSTA et al., 2019), equipamentos de fácil operação, não necessita de armazenamento de produtos químicos, gera uma pequena quantidade de lodo, alta eficiência de remoção de vários contaminantes, porém são encontradas elevadas concentrações de ferro e alumínio que se desprendem dos eletrodos e ficam retidos no lodo, necessitando de um pós-tratamento para sua remoção (RUIZ, 2011).

Os materiais mais utilizados para o tratamento por eletrofloculação são alumínio e ferro, devido ao seu baixo custo, boa eficácia e maior disponibilidade, porém, diversos outros materiais estão sendo usados em processos eletroquímicos. Deve-se observar se a composição desses materiais não causa efeitos adversos a saúde humana e ao meio ambiente (LEE e GAGNON, 2015).

Quando eletrodos de ferro são empregados no tratamento de eletrofloculação, o ferro produz Fe(OH)_n , onde $n = 2$ ou 3 por oxidação no sistema eletrolítico. Podem ocorrer dois mecanismos para esta formação de Fe(OH)_n (GENDEL e LAHAV 2010). O primeiro mecanismo inclui as Equações 1, 2, 3 e 4 (Fonte: GENDEL e LAHAV 2010; COSTA et al. 2019):

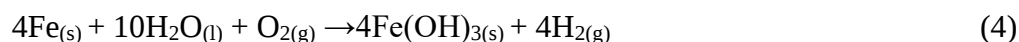
No ânodo:



No cátodo:



No geral:



O segundo mecanismo inclui as reações representadas pelas Equações 5, 6, 7 e 8 (Fonte: GENDEL e LAHAV 2010; COSTA et al. 2019):

No ânodo:



No cátodo:



No geral:



Muitos fatores afetam o processo de eletrofloculação, estes referentes à parâmetros operacionais, como a densidade da corrente elétrica, material dos eletrodos utilizados, e as características do efluente a ser tratado, como o pH e a condutividade elétrica (HAKIZINAMA et al., 2017). A densidade de corrente elétrica consiste na relação da quantidade de corrente elétrica que atravessa a superfície de um eletrodo. É um dos parâmetros de maior importância no processo eletroquímico, onde a corrente elétrica é proporcional à taxa de reações que ocorrem na célula eletroquímica, permitindo o controle das mesmas (HAKIZINAMA et al., 2017; MUFF, 2014). A aplicação de altas densidades de corrente elétrica pode resultar na maior geração de agentes coagulantes, oxidantes e microbolhas, promovendo uma maior eficiência na remoção de poluentes. Porém, estas altas correntes aplicadas podem afetar negativamente no tratamento de eletrofloculação, resultando na ocorrência de reações secundárias e geração excessiva de agentes coagulantes, levando à inversão das cargas de contaminantes e sua dispersão, diminuir a vida útil dos eletrodos e aumentar o consumo energético no tratamento. (VERMA, 2017; HAKIZINAMA et al., 2017).

A eficiência da densidade de corrente empregada depende da condutividade elétrica da solução eletrolítica, ou seja, da concentração de íons presentes na mesma. Quanto maior a condutividade do efluente a ser tratado, menor será a tensão elétrica requerida no processo eletroquímico, diminuindo o consumo de energia (HAKIZINAMA et al., 2017). Como forma de aumentar a eficiência da densidade de corrente elétrica aplicada, existe a possibilidade de se adicionar eletrólitos à solução para aumentar sua condutividade e assim aumentar a remoção

dos contaminantes presentes no efluente (CRESPILHO e REZENDE, 2004; OLIVEIRA et al., 2018).

Como nos processos de eletrofloculação o tipo de eletrodo utilizado é de suma importância na eficiência do tratamento, buscou-se uma alternativa na indústria de fundição que fosse interessante financeiramente e ambientalmente. No primeiro semestre do ano de 2018 somente no Brasil, foram produzidas aproximadamente 800.000 toneladas de peças fundidas, dentre esse valor 600.000 toneladas representam a produção de ferro fundido, volume 6 % superior ao ano de 2017 (ABIFA, 2018). Dentro do processo utilizado na indústria de fundição vários resíduos acabam sendo produzidos e por não apresentarem uma aplicação capaz de suprir sua quantidade formada, acabam sendo destinados a aterros sanitários, o que acarreta em custo para a indústria e impactos ao meio ambiente.

A indústria de fundição que gentilmente forneceu a escória de ferro utilizada nesta pesquisa apresenta uma produção mensal de aproximadamente 30 toneladas deste resíduo somente de escória de ferro, sendo todo destinado á aterro sanitário (BRAGAGNOLO et al. 2018). Diante deste contexto, o presente trabalho realizou a avaliação da utilização de resíduo de ferro fundido (escória de ferro) e sucata de ferro de uma indústria de fundição da região, como eletrodos no processo de eletrofloculação para a remoção de corante das águas residuais de uma indústria têxtil.

1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O presente estudo tem como objetivo avaliar o potencial de emprego de resíduo de fundição de ferro (escória) e sucata de ferro como eletrodos em processo eletroquímico para a descoloração de um efluente sintético contendo o corante índigo Blue, bem como o efluente gerado pela indústria têxtil.

1.1.2 Objetivos específicos

- Investigar a influência da intensidade da corrente elétrica e da concentração do corante Índigo Blue utilizados no tratamento eletroquímico aplicado ao efluente sintético.
- Investigar a influência da densidade da corrente elétrica na remoção da cor no efluente da indústria têxtil.
- Analisar parâmetros como cor, turbidez, pH, condutividade elétrica, DQO, COT e fenol no tratamento realizado.
- Analisar o desgaste dos eletrodos durante o tratamento, bem como a quantidade de lodo produzido no tratamento eletroquímico.
- Determinar a eficiência do processo no tratamento de águas sintéticas contendo corante Índigo Blue e no efluente da indústria têxtil.

2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada na forma de artigo científico, compreendendo dois capítulos:

a) Artigo científico I. Intitulado de “Eletrofloculação aplicada para a remoção de corante têxtil utilizando escória de ferro como eletrodo”.

b) Artigo científico II. Intitulado de “Remoção de corante têxtil através do processo de eletrofloculação utilizando eletrodos de sucata de ferro”.

3 ARTIGO I

ELETROFLOCULAÇÃO APLICADA PARA A REMOÇÃO DE CORANTE TÊXTIL UTILIZANDO ESCÓRIA DE FERRO COMO ELETRODO

Autores: Rafaela De Maman, Gean Delise L. P. Vargas, Clarissa Dalla Rosa

Resumo

O corante Índigo Blue é utilizado na indústria têxtil, especificamente no tingimento de Jeans, estes efluentes ricos em poluentes orgânicos com característica recalcitrante, acabam causando diversos impactos ambientais, requerendo das indústrias tratamentos eficientes. Diversas pesquisas vêm sendo realizadas em busca de métodos de tratamento eficazes, que reduzam efetivamente a carga poluidora destas águas, dentre estas tecnologias encontra-se a eletrofloculação. Este tratamento consiste em um processo eletroquímico que gera seu próprio coagulante, através da aplicação de corrente elétrica em eletrodos metálicos, desprezando o uso de outros produtos químicos. Os eletrodos metálicos utilizados neste estudo são resíduos da indústria de fundição, conhecidos como escória de ferro. O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de uso da escória de ferro no tratamento efluentes sintético e da indústria têxtil. Para análise da eficiência do processo eletroquímico, foram avaliados, um efluente sintético contendo corante comercial Índigo Blue e um efluente de indústria têxtil, antes e após o tratamento. Os parâmetros quantificados foram: cor, turbidez, pH, condutividade elétrica, geração de lodo, remoção de fenol, demanda química de oxigênio (DQO) e carbono orgânico total (COT). O tratamento de eletrofloculação apresentou uma boa eficiência na remoção dos parâmetros analisados, obtendo média de remoção no efluente sintético de 85 % de cor e 100 % de fenol, em 25 minutos de eletrólise. Já o efluente da indústria têxtil obteve uma média de remoção de 80 % de cor, 91 % de turbidez, 100 % fenol, 55 % de DQO e 73 % de COT, em 60 minutos de eletrólise. A análise estatística dos dados obtidos, demonstrou que nenhuma das variáveis avaliadas (corrente elétrica e concentração de corante) apresentou significância no tratamento com 0,05 %. No entanto, os resultados obtidos demonstram potencial do uso da escória de ferro como eletrodo no processo de eletrofloculação.

Palavras-chave: Eletrofloculação. Corantes. Efluente têxtil. Escória de Ferro.

3.1 INTRODUÇÃO

A indústria têxtil se destaca como um dos setores mais poluentes em termos de volume e complexidade dos efluentes produzidos. Os processos de tingimento e acabamento contribuem de forma significativa na geração de águas residuais, além da utilização de corantes durante o processo produtivo, promovendo um efluente com características específicas, como cor intensa, alta demanda química de oxigênio (DQO), grande quantidade de sólidos dissolvidos e variação do pH (ZAROUAL et. al, 2006; CERQUEIRA et. al, 2009; MOOK et al., 2017).

Devido a presença dos corantes, diversos impactos ambientais podem ser causados quando esse efluente é despejado sem o cumprimento das exigências da legislação. Dentre estes impactos pode se citar a redução parcial da penetração de raios solares ao meio aquático, dificultando a produção de alimento e oxigênio pelas plantas, e assim afetando diretamente o crescimento e nutrição das mesmas, a alta concentração de nitrogênio, fenóis, ferro, cromo, que acabam prejudicando a vida marinha, além das elevadas concentrações de DQO e DBO que podem resultar na redução do oxigênio no ecossistema afetado (BISCIO et. al, 2015; CHAKRABORTY, 2014; LIU et al., 2019).

Existem inúmeras técnicas físico-químicas, químicas e biológicas para o tratamento destes efluentes têxteis. Devido as implicações ambientais, além dos tratamentos convencionas, tem surgido pesquisas utilizando novas tecnologias de tratamento para a degradação destes compostos, entre elas tem se destacado os processos eletroquímicos (FORTINO, 2012; HOLKAR et al, 2016).

A eletrocoagulação é uma técnica amplamente aplicada para remoção de poluentes, sendo muito utilizada no tratamento de efluentes têxteis devido à sua capacidade ambiental, versatilidade, eficiência energética, segurança e rentabilidade. Utiliza equipamentos simples, de fácil operação, o que facilita a sua manutenção (KHANDEGAR & SOROHA, 2013; COSTA et al., 2019). Um reator eletroquímico é composto por um eletrólito e dois eletrodos (cátodo e ânodo). Ocorrem nos eletrodos reações de oxirredução por meio da aplicação de uma corrente elétrica contínua, além disso, ocorre a liberação de um agente coagulante no efluente pelo ânodo através da oxidação do material. Já no cátodo, ocorre o processo de redução do eletrodo que libera íons de hidroxila ao meio (GENDEL e LAHAV 2010; COSTA et al. 2019). Após essa combinação de reações ocorre a eletrólise da água, produzindo oxigênio no ânodo e hidrogênio no cátodo, formando microbolhas e ocasionando a floculação das partículas presentes no efluente (MOLLAH et. al, 2004; VERMA, 2017).

Os materiais mais utilizados em tratamentos eletroquímicos são alumínio e ferro, porém outros materiais são utilizados como eletrodos em pesquisas, como: zinco, aço inoxidável, aço galvanizado, aço, grafite, platina e diamante (LEE e GAGNON, 2015; ZAZOU et al., 2019), também podem ser utilizados resíduos da indústria como sucatas. A indústria de fundição do Brasil no primeiro semestre do ano de 2018 foi responsável por produzir aproximadamente 800.000 toneladas de fundidos, dentre esse valor 600.000 toneladas representam a produção de ferro fundido, volume 6% superior ao ano de 2017 (ABIFA, 2018). No processo de fundição de peças metálicas é produzido um resíduo sólido chamado escória, este resíduo por sua vez é rico em ferro e por não ter outra aplicação, acaba tendo como destino os aterros sanitários.

Diante do contexto e visando a sustentabilidade do meio ambiente, o presente trabalho buscou abordar aplicação e avaliação da utilização de escória de ferro proveniente de uma indústria de fundição, sendo usadas como eletrodos no processo eletroquímico objetivando a remoção de cor de um efluente sintético e outro real, oriundo de uma indústria têxtil.

3.2 MATERIAS E MÉTODOS

Inicialmente, realizou-se a coleta das escórias de ferro na empresa de Fundição Cercena localizada no município de Erechim - RS. O material coletado precisou ser quebrado, de forma manual, para obter pedaços menores para sua utilização como eletrodos (Figura 1). Após a quebra, os pedaços de escórias foram pesados, para formar pares com pesos semelhantes, sendo então armazenadas para posterior utilização.

No estudo realizado por Bragagnolo et al. (2018), essa mesma escória de ferro foi caracterizada quanto a sua composição média (Tabela 1).

Tabela 1 – Caracterização da escória de ferro utilizada como eletrodos nos processos de eletrofloculação

Óxidos (%)	
SiO ₂	70,4
AlO ₃	13,6
K ₂ O	4,98
Fe ₂ O ₃	3,29
Na ₂ O	2,79
CaO	1,2
Perda ao Fogo	1,32
Outros	2,387

Fonte: Bragagnolo et al. (2018)

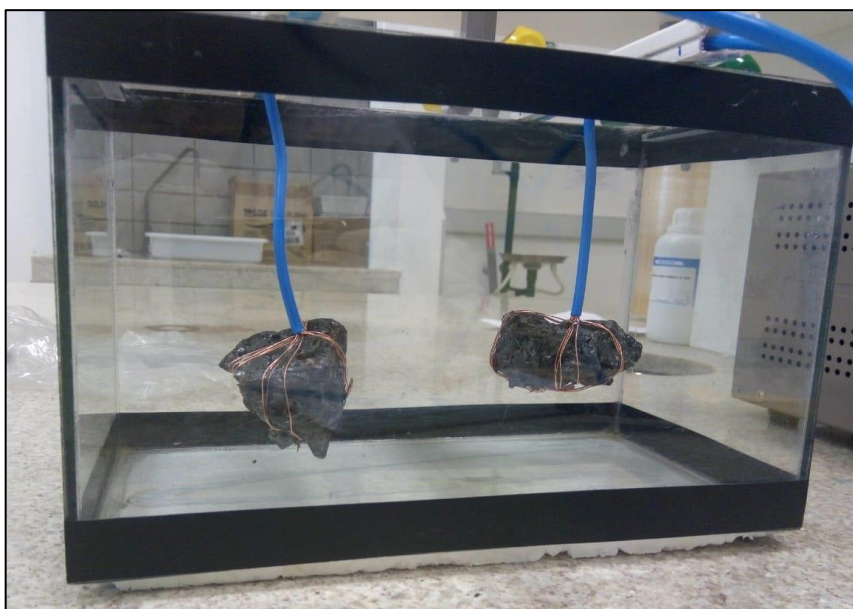
Figura 1 - Escória de Ferro coletada e utilizada como eletrodo.



Fonte: Autora, 2019.

O reator selecionado para o tratamento foi confeccionado de vidro com as dimensões 15 cm x 30 cm, totalizando um volume de 3 L de efluente por tratamento. Os fios utilizados foram de bitola 6 mm, descascados 10 cm na ponta para envolver a escória e 5 cm na outra ponta para conectar à fonte de energia, e a cada tratamento foram renovados (Figura 2).

Figura 2- Reator e escórias utilizadas nos ensaios de eletrofloculação



Fonte: Autora, 2019.

A densidade da corrente elétrica aplicada aos tratamentos foi baseada na literatura, variando de 0,3 a 0,9 Amperes. Para uma melhor condutividade dos elétrons no efluente foi adicionado a cada tratamento 1 g.L⁻¹ de NaCl. Todos os ensaios foram realizados em

temperatura ambiente (20 - 25° C), sendo o pH utilizado nos mesmos sem ajuste na faixa de 7,5 – 8,7. Ao final de cada ensaio foram analisadas as amostras iniciais e finais do tratamento, sendo as variáveis de resposta analisadas: Cor (2120 B), Turbidez (2130 B), pH, condutividade, Fenol (5530 D), Demanda Química de Oxigênio - DQO (5220 D) e Carbono Orgânico Total – COT (5310 B), todos os parâmetros foram avaliados segundo metodologia proposta no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2005). Além desses parâmetros, também foram analisadas a produção de lodo e o desgaste do eletrodo ambos utilizando Método Gravimétrico. A partir dos resultados obtidos, foi realizada análise estatística, com o software Minitab 15, para então determinar os fatores que influenciam significativamente no processo de tratamento de eletrofloculação, considerando as variáveis de resposta estudadas.

3.2.1 Efluente sintético

O corante sintético comercial utilizado foi o Índigo Blue, o mesmo apresentava granulometrias diferenciadas, o que necessitou realizar moagem e o peneiramento antes de sua utilização, para sua homogeneização. Os limites de concentração utilizados basearam-se na literatura, variando de 50 a 80 mg L⁻¹. Após os limites de concentração definidos foi realizada uma varredura da cor por espectrofotometria para o conhecimento do pico de absorção do corante, sendo o mesmo definido em 580 nm. Após estas etapas, foi possível construir a curva padrão da cor e assim obter o conhecimento da concentração do corante no efluente tratado.

Quanto ao tempo de eletrólise no tratamento do efluente sintético foi definido em 25 minutos, após análise da cinética da remoção da cor realizada (Apêndice A), utilizando a concentração de corante de 80 mg.L⁻¹ e removendo amostras a cada 5 minutos do tratamento até a estabilização da remoção da cor.

Os experimentos foram realizados seguindo um delineamento experimental fatorial 2² (Tabela 2), onde foram estudadas as variáveis densidade da corrente (0,3-0,9 A) e concentração do corante (50-80 mg L⁻¹), a combinação destas variáveis utilizando o planejamento experimental resultou em um total de 11 ensaios, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 2 - Fatores independentes e níveis de variação avaliados no delineamento experimental.

Variáveis	Níveis				
	-1,41	-1	0	+1	+1,41
Corrente (A)	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9
Concentração de corante (mg L⁻¹)	50	58	65	73	80

Tabela 3 – Matriz do planejamento experimental utilizando delineamento fatorial 2^2 .

Ensaio	Corrente elétrica	Concentração de corante
1	-1	+1
2	-1	-1
3	+1	+1
4	+1	-1
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	-1,41	0
9	+1,41	0
10	0	-1,41
11	0	+1,41

3.2.2 Efluente da indústria têxtil

O efluente têxtil utilizado foi obtido em uma empresa de Jeans localizada no município de Erechim – RS. O efluente foi coletado e armazenado em garrafas pet de 2 L, totalizando 50 L, após congelados para a preservação de suas características até sua utilização.

Os testes utilizando o efluente real totalizaram 15 ensaios, onde a variável a ser estudada foi apenas a densidade da corrente elétrica aplicada, já que a concentração inicial da cor foi determinada na etapa de caracterização do efluente. Assim, cada corrente utilizada no efluente sintético (0,3 A, 0,45 A, 0,60 A, 0,75 A e 0,90 A) foi analisada em triplicata para o conhecimento da influência da densidade da corrente no tratamento eletroquímico. O tempo de eletrólise ficou definido em 1 hora, após análise da cinética de remoção da cor utilizando o efluente real (Apêndice B), foram coletadas amostras a cada 10 minutos até a estabilização da remoção da cor.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Efluente sintético

Os resultados obtidos utilizando o efluente sintético são apresentados na Tabela 4, na qual tem-se os valores das concentrações iniciais e finais para a remoção de cor, conforme a matriz do planejamento. Nos dados obtidos, observa-se uma eficiente remoção da cor do efluente, variando de 68 a 95 %, apresentando uma média de remoção de 85 %. Esta variação na remoção de cor pode ser proveniente da composição dos eletrodos de escórias de ferro

utilizadas, onde não é possível ter o conhecimento preciso da concentração de ferro e outros constituintes presentes na composição de eletrodo utilizado, uma vez que são resíduos sólidos de fundição e substituídas a cada novo tratamento, podendo assim haver variabilidade em sua composição.

Tabela 4 – Remoção de cor por processo de eletrofoculação com eletrodo de escória de ferro.

Ensaio	Concentração inicial (mg L⁻¹)	Concentração final (mg L⁻¹)	Remoção da cor %
1	91,40	23,85	73,90
2	76,51	5,08	93,35
3	97,12	10,38	89,30
4	69,77	3,04	95,64
5	69,77	15,49*	77,80
6	66,51	4,06*	93,89
7	67,32	4,67*	93,05
8	71,40	22,83	68,01
9	69,16	4,46	93,53
10	46,30	14,46	68,75
11	105,08	10,18	90,30

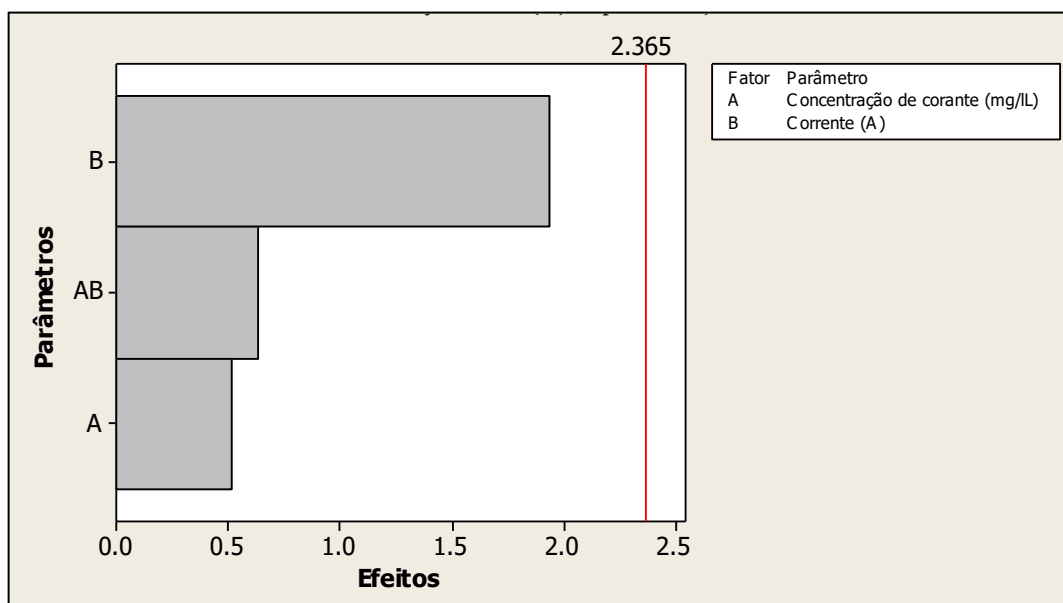
* Desvio padrão ponto central ensaios 5, 6 e 7 = 6,4 mg. L⁻¹.

No presente estudos foi possível verificar a eficiência na remoção de cor utilizando o tratamento proposto, onde mesmo com a composição complexa dos eletrodos de escórias de ferro obteve uma alta eficiência de remoção de cor chegando-se a ordem 95 %. No trabalho desenvolvido por Verma (2017), foi aplicada a eletrofloculação em um efluente sintético contendo 200 mg L⁻¹ de corante, utilizando um eletrodo de ferro e outro de alumínio, obtendo resultado de 86 % de remoção de cor após 1 hora de tratamento. Para Seki et al (2017), ao se utilizar eletrodos de ferro e 30 minutos de tratamento em efluente sintético, obteve 90 % de remoção de cor.

Um dos principais parâmetros para a eficiência no tratamento por eletrofloculação é a quantidade de coagulante gerado, e isto está relacionado à densidade da corrente elétrica aplicada e o tempo de eletrólise (KABDASLI et al, 2012). De acordo com estudos realizados por Azarian et al (2018) e Nariyan et al (2017), a eficiência de remoção dos poluentes no tratamento de eletrofloculação é diretamente proporcional à densidade da corrente elétrica aplicada, explicado pela Lei de Faraday. Porém, após análise da estatística realizada nos

resultados experimentais obtidos neste estudo, observou-se que as duas variáveis analisadas, intensidade da corrente elétrica e concentração do corante, não apresentaram significância na eficiência da remoção da cor no efluente sintético, podendo ter esta afirmação confirmada através do gráfico de Pareto com 0,05 % (Figura 3).

Figura 3 - Gráfico de Pareto da análise dos dados experimentais obtidos para a remoção de cor com 95% de confiança em função da variável densidade da corrente.



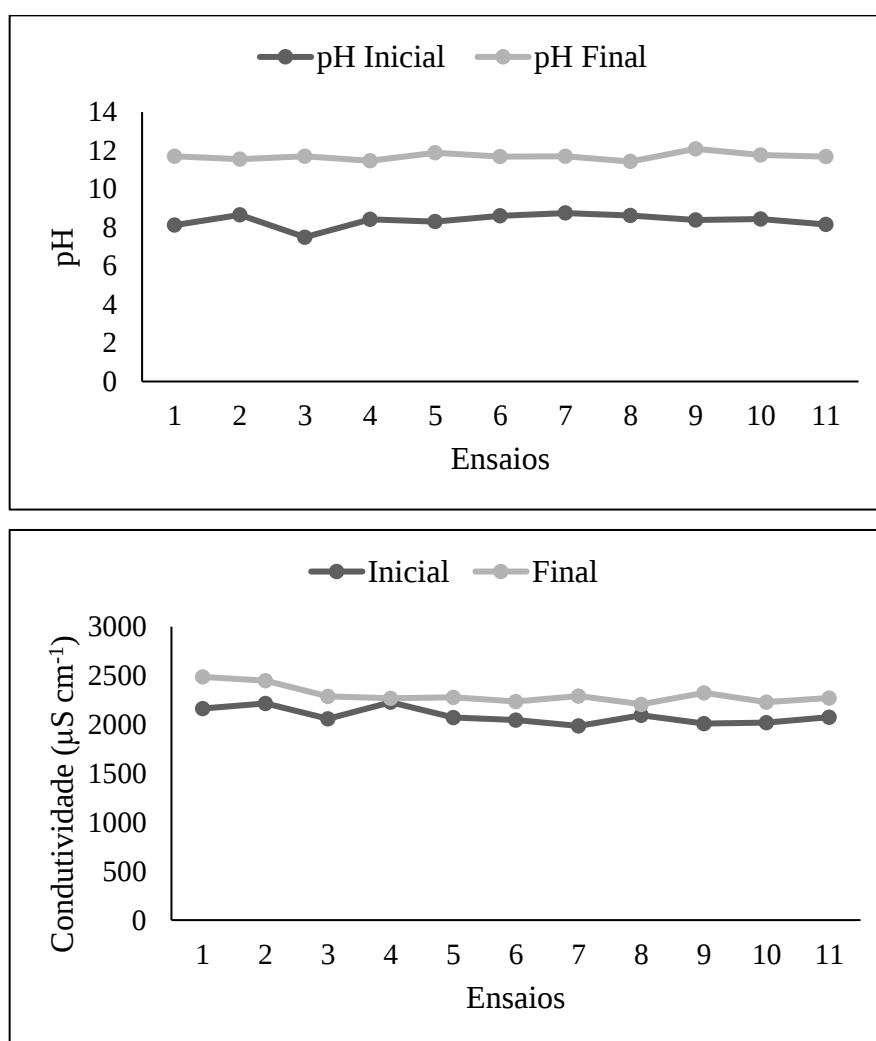
Fonte: Autora, 2019.

Os valores de pH e condutividade elétrica obtidos nos 11 ensaios realizados estão representados na Figura 4. Como pode se observar os valores de pH após o tratamento de eletrofloculação, se encontram acima do valor permitido para o lançamento de efluentes líquidos (pH entre 5 - 9) pela Resolução do CONAMA nº 430 de 13 de maio de 2011 e pelo CONSEMA nº 355 de 13 de julho de 2017.

De acordo com Pereira (2007), nos processos eletroquímicos o pH aumenta durante o tratamento, pois ocorre a geração dos íons OH^- durante a etapa de redução da água. Na eletrofloculação o pH final é alto em relação ao inicial, corroborando com os valores obtidos no presente estudo. Cerqueira (2009), avaliou o pH inicial como parâmetro de influência na eletrofloculação utilizando eletrodos de ferro, onde observou que o pH inicial 7 apresentou melhores valores de remoção de cor, turbidez e DQO. Ramazan et. al. (2019) estudou o efeito do pH com a aplicação de diferentes eletrólitos, usando eletrodos de ferro, encontrando resultados onde ao se adicionar NaCl à solução a ser tratada o pH aumentou de 7,2 para 11,35.

Para a condutividade elétrica do efluente, segundo as Resoluções de lançamento de efluentes, não apresentam exigências de valores. Bande et al. (2008) observa que ao se introduzir uma maior concentração de NaCl no efluente a ser tratado resulta em aumento na condutividade e uma diminuição na tensão oferecida pelo efluente, reduzindo assim, a quantidade de energia necessária para realizar o processo de eletrofloculação. No entanto, em estudos de Wang et al. (2009), não se pode aumentar muito a concentração de NaCl, pois afeta na eficiência de remoção de DQO, onde um excesso de íons Cl^- no meio é adverso a coagulação dos poluentes.

Figura 4 - Valores de pH e condutividade elétrica obtida nos ensaios de eletrofloculação.



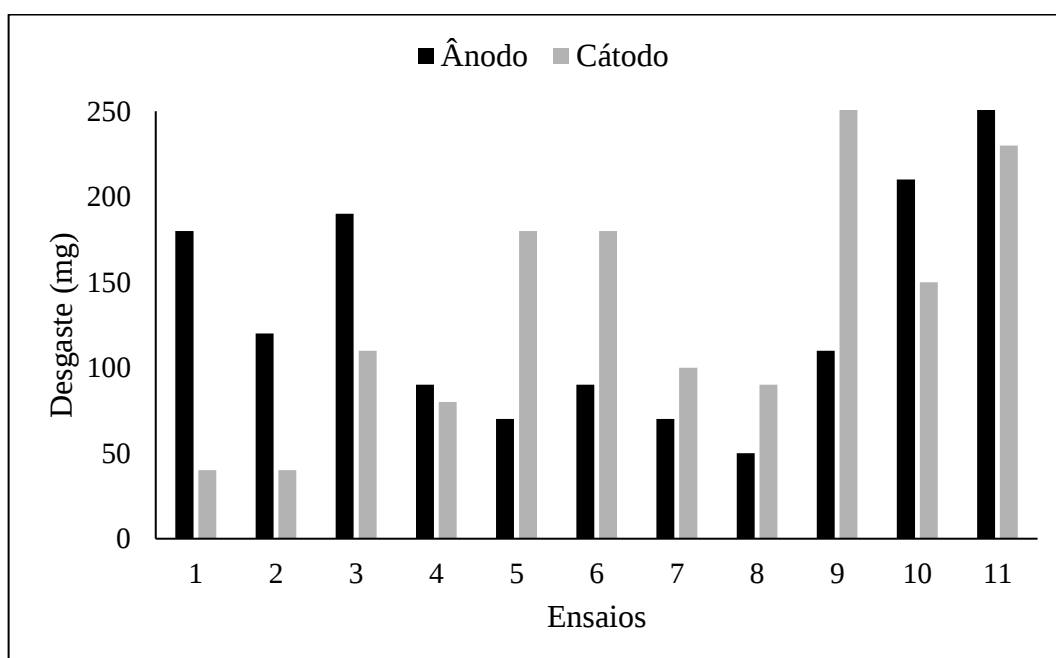
Fonte: Autora, 2019.

O desgaste dos eletrodos de escória de ferro, apresentados na Figura 5, foram determinados através da pesagem dos mesmos antes e após o tratamento. Para não ocorrer perda de massa com a lavagem dos eletrodos, evitou-se o uso de materiais abrasivos (SINOTI E

SOUZA, 2005), e após cada ensaio os eletrodos receberam apenas água destilada para remover o lodo gerado que pudesse estar grudado nas escórias de ferro, para sua posterior pesagem e descarte.

Nos estudos de Zazouli e Taghavi (2012), o desgaste dos eletrodos foi notável em densidade de corrente elétrica mais elevadas. No caso da escória de ferro a densidade da corrente não apresentou efeito no desgaste dos eletrodos, entretanto deve-se levar em consideração que o limite máximo da corrente aplicada no presente estudo foi de 9 A, diferente do limite máximo utilizado no trabalho de Zazouli e Taghavi (2012) onde foi aplicado uma corrente de 25 A.

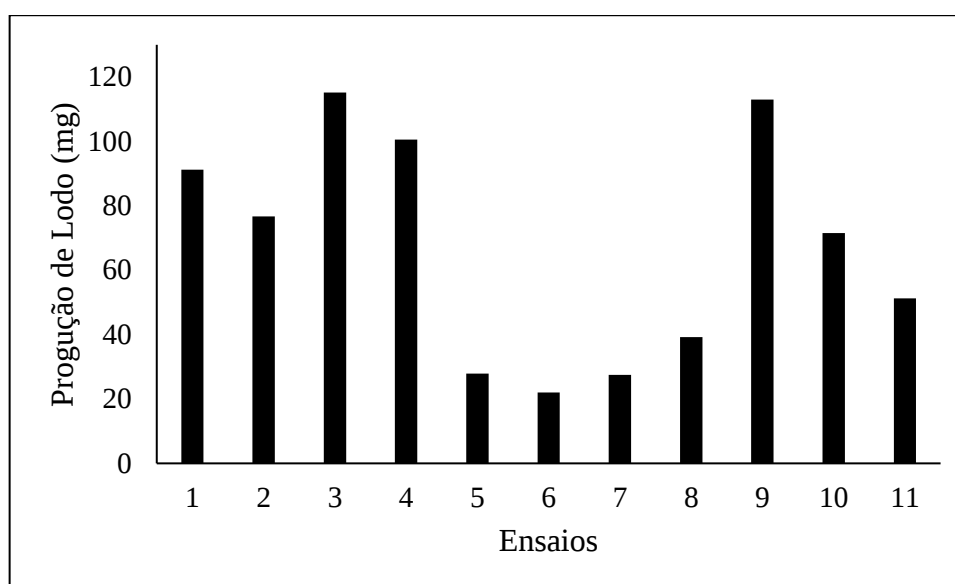
Figura 5 - Desgaste dos eletrodos de escória de ferro utilizados nos ensaios de eletrofloculação.



Fonte: Autora, 2019.

Os valores de produção de lodo durante os tratamentos estão representados na Figura 6. Observa-se o aumento do lodo gerado conforme a intensidade da corrente elétrica aumenta, este comportamento era esperado, visto que existe uma relação direta entre a quantidade de lodo formado e a densidade da corrente aplicada ao processo eletroquímico.

Figura 6 - Valores de produção de Lodo durante o tratamento de eletrofloculação.



Fonte: Autora, 2019.

Trabalhos de Zodi et al (2009) e Chen (2004), confirmam este aumento em seus estudos, ao utilizar eletrodos de ferro e alumínio na eletrofloculação, obtiveram resultados onde a formação de lodo está diretamente relacionada à densidade da corrente aplicada. A quantidade de lodo formada também está relacionada com a quantidade de material coagulante produzido, com a remoção de sólidos suspensos totais e outros compostos presentes no efluente.

Quanto a presença de fenol, este apresentou uma pequena concentração inicial, variando de 0,3 a 9,1 mg L⁻¹ estas concentrações foram removidas em 100 %. Apesar da complexidade da composição da escória de ferro utilizada, a remoção foi muito eficiente para este tipo de poluente. O estudo realizado por Pizzato et al (2018), corrobora com os resultados obtidos neste estudo, onde foi avaliado a remoção de fenol de um efluente têxtil por eletrofloculação com eletrodos de alumínio, este também apresentou eficiência de remoção de fenol, aproximadamente 71 % e os valores ficaram em torno de 0,01 mg.L⁻¹.

A concentração de COT também foi avaliada, inicial e final ao tratamento de eletrofloculação. No tratamento ocorreu remoção de COT em apenas 2 ensaios realizados (ensaio 2 e 7 do planejamento), de aproximadamente 18 %. O restante dos ensaios não apresentou remoção, sendo os valores de concentrações inicial entre 6 - 14 mg.L⁻¹. Na avaliação deste parâmetro é necessário estudar a quebra do grupo cromóforo, que são responsáveis pela cor do corante, sendo a estrutura responsável pela sua fixação à fibra do tecido (PASCHOAL e TEMILIOSI-FILHO, 2005). Os resultados obtidos nas análises de COT sugerem que o processo de eletrofloculação pode estar quebrando apenas esta ligação do grupo cromóforo, e por isso

apenas removendo a cor e não a matéria orgânica presente no efluente, visto a baixa remoção de COT obtida.

3.3.2 Efluente da indústria têxtil

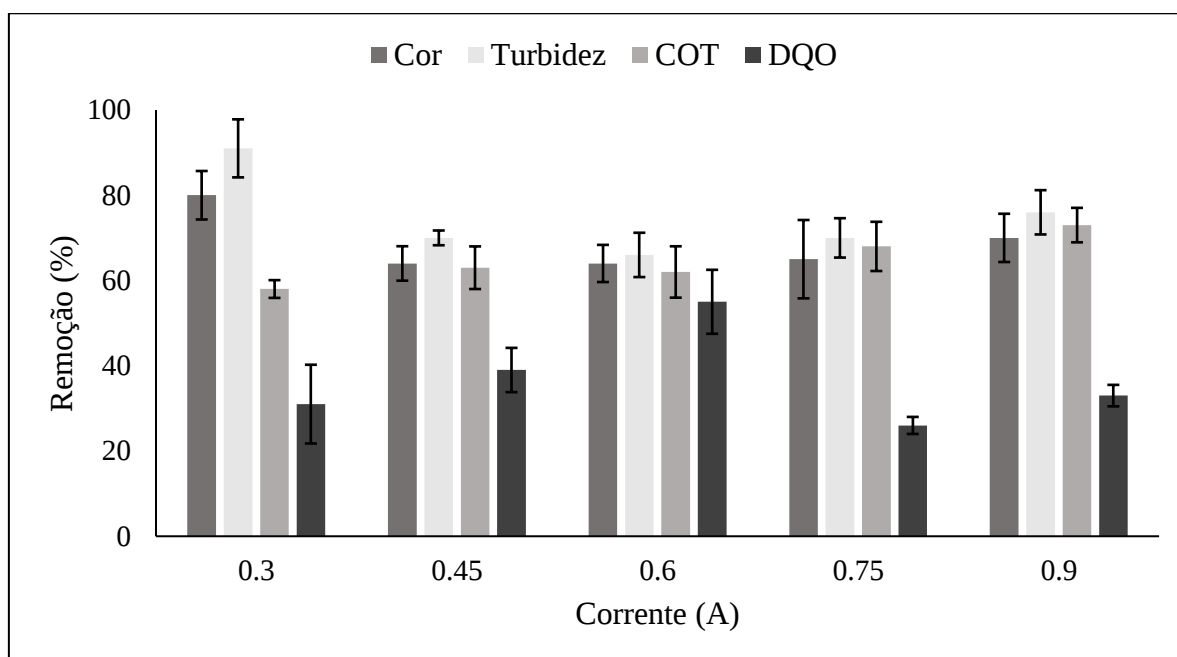
O efluente coletado na indústria têxtil passou pelo processo de caracterização inicial, para o conhecimento das propriedades do efluente bruto. Estas características estão representadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Caracterização do efluente têxtil bruto.

Caracterização do Efluente Bruto	
Cor	887,70 mg Pt Co L ⁻¹
Turbidez	1042,60 NTU
pH	8,06
Condutividade	673,70 $\mu\text{S cm}^{-1}$
Temperatura	22 C°
DQO	6,64 mg O ₂ .L ⁻¹
DBO	10,76 mg O ₂ .L ⁻¹
Sólidos Totais	68,40 mg
Fenol	1,17 mg.L ⁻¹
COT	208,20 mg.L ⁻¹

Após a execução do tratamento, é possível observar na Figura 7 as remoções de cor, turbidez, COT e DQO em cada corrente aplicada, valores que representam a média das remoções das triplicatas.

Figura 7 – Remoção de cor, turbidez, COT e DQO no efluente têxtil.



Fonte: Autora, 2019.

Analisando a remoção da cor e turbidez, os melhores resultados foram obtidos na menor densidade de corrente, 0,3 A, onde foram removidos 80 % da cor e 91 % da turbidez. Estes valores mostram que a densidade da corrente elétrica não apresentou significância no tratamento de eletrofloculação nas condições avaliadas, podendo se utilizar 0,3 A e obter eficiência elevada no tratamento, economizando na energia elétrica a ser aplicada no sistema.

De acordo com a Resolução do CONAMA nº 430 de 13 de maio de 2011 que dispõe sobre os padrões de lançamento de efluentes líquidos, o parâmetro cor não tem limite de concentração, apenas não deve alterar a cor do corpo hídrico. Assim, como referência de lançamento, utilizou-se a Resolução do CONAMA nº 357 de 17 de março de 2005 que dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e padrões de lançamento de efluentes. Para Rio Classe I exige-se a cor verdadeira em nível de cor natural do corpo de água, sendo a mesma apresentada em unidade de mg Pt.L^{-1} , e na Classe II a cor verdadeira tem o limite de 75 mg Pt.L^{-1} . Os valores de concentrações finais ao tratamento de eletrofloculação estão todos abaixo do limite permitido para Rio Classe II, o que possibilitaria seu lançamento no corpo hídrico sem necessidade de passar por um tratamento secundário.

O trabalho realizado por Núñez et al. (2019), avaliou a aplicação da eletrofloculação para remoção de cor e turbidez das águas residuárias de uma indústria têxtil, utilizando eletrodos de ferro. Foi usado 200 mL do efluente e o tempo de eletrólise de 10 minutos,

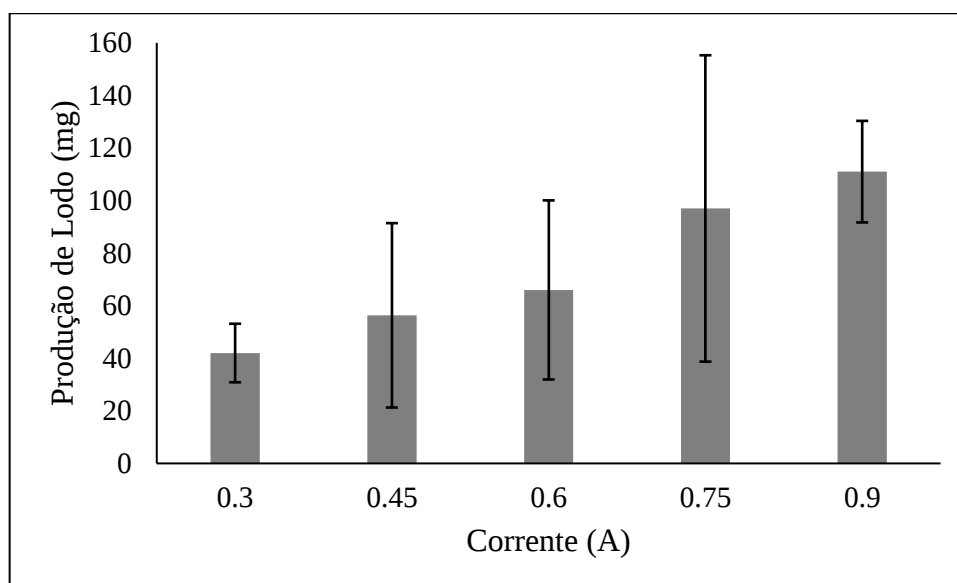
encontrando uma eficiência de remoção de cor de 70 % e turbidez de 45 %, estes valores inferiores ao nosso tratamento aplicado as escórias de ferro como eletrodo.

Na avaliação da remoção de COT, os valores se apresentaram próximos para cada corrente aplicada, não demonstrando uma variação expressiva, encontrando na corrente 0,9 A uma eficiência de 73 %. Na remoção da DQO obteve-se um máximo de 55% com a aplicação da corrente de 0,6 A, o restante permaneceu na média de 30 % de remoção. A remoção de fenol também foi avaliada, e apresentou uma eficiência de tratamento de 100 %, onde em todos os ensaios ocorreu a remoção total de fenol.

Sirma et al. (2019) avaliou a remoção de COT e DQO em um efluente têxtil pelo processo de eletrofloculação, utilizando 800 mL do efluente e eletrodos de alumínio e ferro. O eletrodo de alumínio apresentou melhores resultados de remoção do poluente COT, obtendo 29 %, e o de Ferro apenas 5 % de remoção. Já para a remoção de DQO, apresentou uma baixa eficiência, onde o máximo obtido foi de 19 %. Estes valores demonstram que a escória de ferro é eficiente na remoção de COT e DQO, apresentando valores na ordem de 73 % e 55 % respectivamente.

A produção de lodo do tratamento do efluente real apresentou valores que estão relacionados diretamente com o aumento da densidade da corrente elétrica (Figura 8).

Figura 8 – Produção de lodo do tratamento do efluente real através da eletrofloculação.



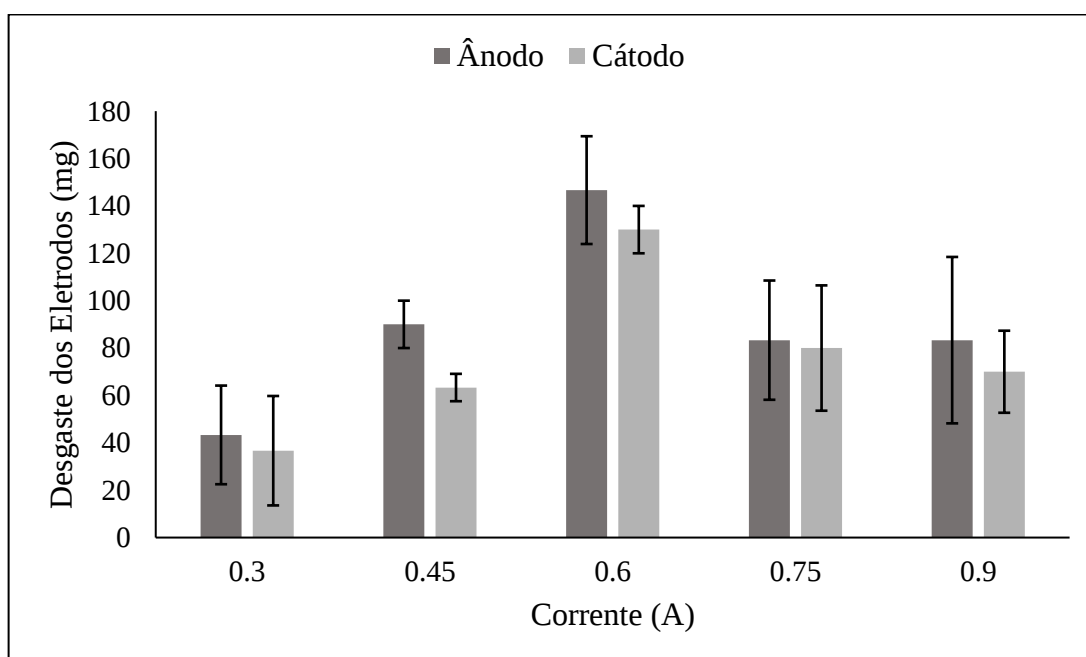
Fonte: Autora, 2019.

Observou-se uma grande variação no valor produzido entre as triplicatas, isto possivelmente se deve as características intrínsecas da composição da escória, visto que se trata

de um resíduo de composição variada, o que dificulta uma predição na produção do lodo, entretanto, mesmo com o elevado desvio observado, a quantidade de lodo gerado é reduzida o que justificaria sua aplicação no processo.

Ao se aplicar alta densidade de corrente no tratamento, observa-se um aumento na dissolução anódica do metal e consequentemente uma elevação na quantidade de lodo produzido (ZODI, et al. 2009). Essa reação de aumento da produção do lodo fica evidente nos ensaios realizados utilizando a escória de ferro, onde quando maior a densidade da corrente elétrica aplicada maior é a quantidade de lodo produzido. Bener et al (2019), encontrou ao estudar o processo de eletrofloculação para descoloração de águas residuárias têxteis, que o desgaste dos eletrodos está diretamente relacionado a densidade da corrente elétrica aplicada. Porém, no caso do uso da escória de ferro o comportamento não foi o semelhante, onde o maior desgaste apresentado foi na corrente intermediária de 0,6 A (Figura 9), isto possivelmente se deve as características próprias da escória.

Figura 9 – Desgaste dos eletrodos de escória de ferro em cada densidade de corrente aplicada.



Fonte: Autora, 2019.

3.4 CONCLUSÃO

O processo de eletrofloculação utilizando escórias de ferro como eletrodos apresentou uma boa eficiência no tratamento dos efluentes avaliados. Este apresenta uma grande vantagem relacionada a redução de custos com adição de insumos, visto se tratar de um resíduo produzido na indústria de fundição, além de ambientalmente e financeiramente ser interessante, pois sua

aplicação no tratamento de efluentes reduziria também seu descarte em aterros sanitários, o que para a indústria de fundição resultaria em redução de custos com disposição deste material.

Alguns pontos ainda devem ser investigados, a fim de se chegar aos padrões de lançamento, como o pH que ficou acima do permitido nos dois efluentes analisados, bem como, a remoção do COT a qual não apresentou resultados expressivos nos ensaios avaliados do efluente sintético, necessitando de uma maior atenção ao grupo cromóforo. A partir da análise estatística dos dados obtidos, observa-se que nenhuma das variáveis avaliadas, corrente elétrica e concentração de corante, apresentaram significância no tratamento com 0,05 %.

O uso de escória de ferro como eletrodo limitou-se por apresentar incerteza na concentração de ferro em cada pedaço utilizado no tratamento, o que acarreta resultados variados para cada teste realizado. Entretanto, a eletrofloculação é um método que possui muitos pontos fortes, necessitando assim de uma melhor avaliação do uso da escória de ferro no processo, para o entendimento de seu comportamento no tratamento eletroquímico.

Cabe ressaltar que pesquisas utilizando resíduos industriais, como a escória de ferro, são de suma importância, visto que, podem vir a agregar valor a um resíduo que é muito produzido no Brasil e descartado em aterros industriais. Assim, é possível retirar do meio ambiente uma porcentagem do que seria descartado, além de se utilizar um resíduo no tratamento de um efluente contendo corante para remoção deste poluente altamente tóxicos aos ambientes aquáticos.

3.5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-MAMUN, M.R.; KADER, S.; ISLAM, M.S.; KHAN, M.Z.H. Photocatalytic activity improvement and application of UVTiO₂ photocatalysis in textile wastewater treatment: A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, p. 103248, 2019.

APHA - Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation. 2005.

AZARIAN, G.; RAHMANI, R. A.; MASOUDI, M. ATASHZABAN, Z.; NEMATOLLAHI, D. New batch electro-coagulation process for treatment and recovery of high organic load and low volume egg processing industry wastewater. **Process. Saf. Environ. Prot.** 2018.

BANDE, R. M., PRASAD, B.; MISHRA, I. M.; WESAWAR, K. L. The oil effluent water treatment for safe disposal by electroflotation. **Chemical Engineering Journal**, v. 137, p. 503-509, 2008.

BENER, S.; BULCA, O.; PALAS, B.; TEKIN, G.; ATALAY, S.; ERSOZ, G. Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: Effect of operative

conditions on the organic carbon removal and kinetic study. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 129, p. 47-54, 2019.

BISCIO, V. et al. Reuse of textile wastewater after homogenization–decantation. **Chemical Engineering Journal**, v. 265, p. 122–128, 2015.

BRAGAGNOLO, L.; FERRAZZO, S. T.; MUSCOPE, F. P.; KORF, P. E.; VARGAS, P. L. D. G.; ROSA, D. C.; PIAZZETTA, L. V. H.; TORMEN F. A. Caracterização de resíduos da fundição de ferro e avaliação de possíveis aplicações na construção civil. **Revista Brasileira De Ciências Ambientais**, v. 50, p. 61-77, 2018.

BRASIL, Resolução CONAMA nº357, de 17 de março de 2005. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional.

BRASIL, Resolução CONAMA nº430, de 13 de maio de 2011. Condições e padrões de lançamento de efluentes do Território Nacional.

BRASIL, Resolução CONSEMA nº355, de 13 de julho de 2017. Critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para fontes geradores que lancem seus efluentes em águas superficiais do Estado do Rio Grande do Sul.

CARMELIO, J. S. et al. Guia ABIFA de Fundição. Associação Brasileira de Fundição. São Paulo: ABIFA, 2018.

CERQUEIRA, A.; RUSSO, C.; MARQUES, M. R. C. Electroflocculation for textile wastewater treatment. **Braz. J. Chem. Eng.**, v. 26, p. 659-668, 2009.

CHAKRABORTY, J. N. Wastewater problme in textile industry. In: Fundamentals and Practices in Colouration of Textiles. **Woodhead Publishing India PVT. LTD**, p. 515–545, 2014.

CHEN, G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. **Sep. Purif. Technol.**, v. 38, p. 11-41, 2004.

FORTINO, P. Pós-tratamento de efluente têxtil usando coagulação/floculação combinado com processos de separação por membranas. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

HOLKAR, C. R. et al. A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches. **Journal of Environmental Management**, v. 182, p. 351–366, 2016.

KABDASLI, I.; GUREL, M.; TUNAY, O. Characterization and treatment of textile printing wastewaters. **Journal Environmental Technology**, v. 21, p. 1147-1155, 2010.

KHANDEGAR, V.; SAROHA, A.K. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent e A Review. **Journal of Environmental Management**, 2013.

LEE, S. Y.; GAGNON, G. A. Review of the factors relevant to the design and operation of an electrocoagulation system for wastewater treatment. **Environmental Reviews**, v. 22, p. 421-429, 2014.

LIMA, C. S.; BATISTA, K. A.; RODRIGUEZ, A. G.; FERNANDES, J. R. S. Photodecomposition and color removal of a real sample of textile wastewater using heterogeneous photocatalysis with polypyrrole. **Solar Energy**, v. 114, p.105-113, 2015.

LIU, S.; LI, B.; QI, P.; YU, W.; ZHAO, J.; LIU, Y. Performance of Freshly Generated Magnesium Hydroxide (FGMH) for Reactive Dye Removal. **Colloid and Interface Science Communications**, v. 28, p. 34-40, 2019.

MOLLAH, M. Y. A.; MORKOVSKY, P.; GOMES, J. A.G.; KESMEZ , M.; PARGA, J.; COCKE, D. L. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. **Journal of Hazardous Materials**, p. 12, 2004.

MOOK, W. T.; AROUA, M. K.; SZLACHTA, M.; LEE, C. S. Optimisation of Reactive Black 5 dye removal by electrocoagulation process using response surface methodology. **Water Science & Technology**, v.75, p. 952-962, 2017.

NARIYAN, E.; SILLANPAA, M.; WOLKERSDORFER, C. Electrocoagulation treatment of mine water from the deepest working European metal mine-Performance, isotherm and kinetic studies. **Sep. Purif. Technol**, v. 177, p.363-373, 2017.

NÚÑEZ, J.; YEBER, M.; CISTEMAS, N.; THIBAUT, R.; MEDINA, P.; CARRASCO, C. Application of electrocoagulation for the efficient pollutants removal to reuse the treated wastewater in the dyeing process of the textile industry. **Journal of hazardous materials**, v. 371, p. 705-711, 2019.

PEREIRA, Aline Figueiredo Soares. Aplicação da Eletroflotação no Tratamento de Efluente na Indústria Têxtil. 2007. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Campinas, Campinas, 2007.

PIZZATO, G. A. J.; ANDRADE, Z. A. Avaliação do tratamento de efluente de tingimento de poliéster através de processo de eletroflotação. **6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente**, Bento Gonçalves, RS. 2018.

RAMAZAN, K.; CAN, O. T.; AYGUN, A.; TEK, A. Comparison of the effects of various supporting electrolytes on the treatment of a dye solution by electrocoagulation process. **Colloid and Interface Science Communications**, v. 33, p.100210, 2019.

SHOUKAT, R.; KHAN, S. J.; JAMAL, Y. Hybrid anaerobic-aerobic biological treatment for real textile wastewater. **Journal of Water Process Engineering**, v. 29, p. 100804, 2019.

SINOTI, A. L. L.; SOUZA, M. A. A. D. Processo eletrolítico no tratamento de esgotos sanitários: estudo da sua aplicabilidade e mecanismos associados. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005, Campo Grande.

SIRIRERKRATANA, K.; KEMACHEEVAKUL, P.; CHUANGCHOTE, S. Color removal from wastewater by photocatalytic process using titanium dioxide-coated glass, ceramic tile, and stainless steel sheets. **Journal of Cleaner Production**, v. 215, p. 123-130, 2019.

SIRMA, B.; OZLEM, B.; BURCU, P.; GULEN, T.; SUHEYDA, A.; GULIN, E. Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: effect of operative

conditions on the organic carbon removal and kinetic study. **Process safety and environmental protection**, v. 129, p. 47-54, 2019.

SEKI, C. C.; SILVA, D. C.; ARGONDIZO, A.; SILVA, A. P. Utilização de eletrodo de leito fixo no tratamento de efluente têxtil por eletrocoagulação. **XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**. UFSCar, São Carlos – SP, 2017.

WANG, C.T.; CHOU, W. L.; KUO, Y. M. Removal of COD from laundry wastewater by eletrocoagulation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 164, p. 81-89, 2009.

VERMA, A. K. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation employing Fe-Al composite electrode. **Journal of Water Process Engineering**, v. 20, p. 168-172, 2017.

VOLKOV, T. V. V.; CHELLI, R.; RIGHINI, C. C. Indigo chromophores and pigments: Structure and dynamics. **Perry Dyes and Pigments**, v.172, p. 107761, 2020.

ZAROUAL, Z.; AZZI, M.; SAIB, N.; CHAINET, E. Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in basic textile effluent. **Journal of Hazardous Materials**, 2006.

ZAZOU, H.; AFANGA, H.; AKHOUAIRI, S.; OUCHTAK, H.; ADDI, A. A. Treatment of textile industry wastewater by electrocoagulation coupled with electrochemical advanced oxidation process. **Journal of Water Process Engineering**, v. 28, p. 214-221, 2019.

ZAZOULI AND TAGHAVI. Phenol removal from aqueous solutions by electrocoagulation technology using iron electrodes: effect of some variables. **Journal Water Resource Prot**, v. 4, p. 980-983, 2012.

ZODI, S.; POTIER, O.; LAPICQUE, J. P. Treatment of the textile wastewaters by electrocoagulation: effect of operating parameters on the sludge settling characteristics **Sep. Purif. Technol.**, v. 69, p. 29-36, 2009.

4 ARTIGO II

REMOÇÃO DE CORANTE TÊXTIL ATRAVÉS DO PROCESSO DE ELETROFLOCULAÇÃO UTILIZANDO ELETRODOS DE SUCATA DE FERRO

Autores: Rafaela De Maman, Gean Delise L. P. Vargas, Clarissa Dalla Rosa

Resumo

A indústria têxtil se destaca como um dos maiores consumidores de água dentre os setores industriais e seu efluente apresenta características como alta carga de DQO, COT, sólidos suspensos, cor, turbidez, fenol e sais, o que requer um tratamento eficiente das águas residuárias produzidas. Dentre as diversas pesquisas que tem surgido voltadas ao tratamento de efluentes têxteis, tem se destacado a eletrofloculação. Este método consiste em um processo eletroquímico que gera seu próprio coagulante, desprezando o uso de outros produtos químicos, através aplicação de corrente elétrica em eletrodos metálicos imersos na solução. Os eletrodos utilizados no presente estudo são placas metálicas de sucata de ferro, doadas pela indústria de fundição, sendo o objetivo deste trabalho avaliar sua aplicação em processo de eletrofloculação para a descoloração de um efluente proveniente de uma indústria têxtil. A eficiência do tratamento foi avaliada aplicando o tratamento em um efluente sintético contendo corante comercial Índigo Blue e um efluente de uma indústria têxtil, avaliando parâmetros como: cor, turbidez, pH, condutividade elétrica, DQO, COT, fenol, ferro solúvel, geração de lodo e desgaste dos eletrodos. O tratamento eletroquímico apresentou bons resultados, no efluente sintético onde obteve-se remoção média de cor de 95 %, fenol de 96 %, baixa produção de lodo em 120 minutos de eletrólise. No efluente da indústria têxtil uma média de remoção de cor 92 %, turbidez 97 %, 100 % fenol, 65 % COT, 49 % DQO em 90 minutos de eletrólise. Com isso, o método de eletrofloculação utilizando como eletrodos sucata de ferro mostrou-se eficiente na remoção dos poluentes presentes no efluente da indústria têxtil, bem como no efluente sintético.

Palavras-chave: Indústria têxtil. Corantes. Eletrofloculação. Indústria de fundição. Sucata de Ferro.

4.1 INTRODUÇÃO

Na indústria têxtil, são adicionadas ao processo produtivo, elevadas quantidades de substâncias químicas, o que dificulta o tratamento das águas residuais. Os produtos químicos mais frequentemente encontrados nas águas residuais têxteis são corantes, surfactantes, solventes e outros compostos orgânicos. Estes poluentes provem principalmente dos processos de tingimento e acabamento, atribuindo ao efluente alta demanda química de oxigênio (DQO), alta concentração de sólidos em suspensão, alto teor de sal, elevada cor e turbidez, carbono orgânico total (COT) e baixa biodegradabilidade (GILPAVAS et al., 2017; KOBAYA et al., 2016; SIRIRERKRATANA, et al. 2019).

Muitos métodos são utilizados no tratamento de efluentes têxteis, como adsorção, precipitação, filtração por membrana, degradação química, coagulação química. Contudo, esses processos apresentam vários problemas operacionais e elevado custo para instalação e operação do sistema, gastos adicionais com insumos etc. (SINGH e ARORA, 2011; VERMA et al., 2014). Em consequência, muitos estudos envolvendo o método de eletrofloculação vem se destacando para o tratamento das águas residuárias têxteis (BRILLAS e MARTINEZ-HUITLE, 2015).

Os processo de eletrofloculação apresentam uma ampla utilização na remoção de diversos poluentes, devido a sua versatilidade, segurança, fácil aplicação e manutenção, facilidade de controle, baixa produção de lodo e compatibilidade ambiental (THAKUR et al., 2009; NÚÑEZ et al., 2019; COSTA et al., 2019).

O processo de eletrofloculação envolvem a geração de coagulantes *in situ* através da aplicação de corrente elétrica em eletrodos metálicos. Os íons metálicos gerados pela dissolução eletroquímica de um ânodo consumível sofrem espontaneamente hidrólise na água, dependendo do pH, formando várias espécies coagulantes, incluindo precipitados de hidróxido, capazes de remover poluentes por adsorção/sedimentação, e outras espécies metálicas de íons. Além disso, a reação catódica simultânea permite a remoção de poluentes por deposição ou por flotação. Os metais mais utilizados como eletrodos são o Ferro e Alumínio, devido a sua grande disponibilidade e baixo preço (EMAMJOMEH e SIVAKUMAR, 2009; YA et. al., 2018).

A indústria de fundição do Brasil, nos primeiros 8 meses do ano de 2019, acumula uma produção de 1,57 milhão de tonelada de fundidos, 2,6% maior do que no mesmo período de 2018. O ferro fundido lidera a produção no país (1,26 milhão de toneladas), seguido pelo aço (117,865 toneladas) e dos metais não ferrosos (130,227 toneladas). No ano de 2018 o Brasil ocupou o décimo lugar no ranking mundial de produção de fundidos, liderado pela China, Índia e EUA. Juntos, os três países respondem por 70% da produção mundial, totalizando 71,13 milhões de toneladas (ABIFA, 2019).

Diante deste contexto, o presente trabalho buscou abordar a aplicação e avaliação da utilização de um subproduto oriundo do corte de peças metálicas, que seriam utilizadas na fundição de novas peças de ferro, a sucata de ferro, provenientes de uma indústria de fundição da região, sendo usadas como eletrodos no processo eletroquímico objetivando a remoção de cor de um efluente sintético e efluente de indústria têxtil.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

A coleta da sucata de ferro, foi realizada na Indústria de Fundição Cercena, sendo este material o mesmo utilizado na confecção das peças produzidas, está empresa é localizada no município de Erechim -RS. O material necessitou de ajustes para ganhar o formato de placas, com dimensões menores para sua utilização como eletrodos (Figura 1). Para isso, foi necessário o corte das placas em um local especializado, para obter a dimensão de 12 cm x 9 cm. Após o corte foram pesadas e armazenadas em pares para posterior utilização.

Figura 1 - Sucata de Ferro coletada (esquerda) e cortada (direita) para utilização como eletrodo.

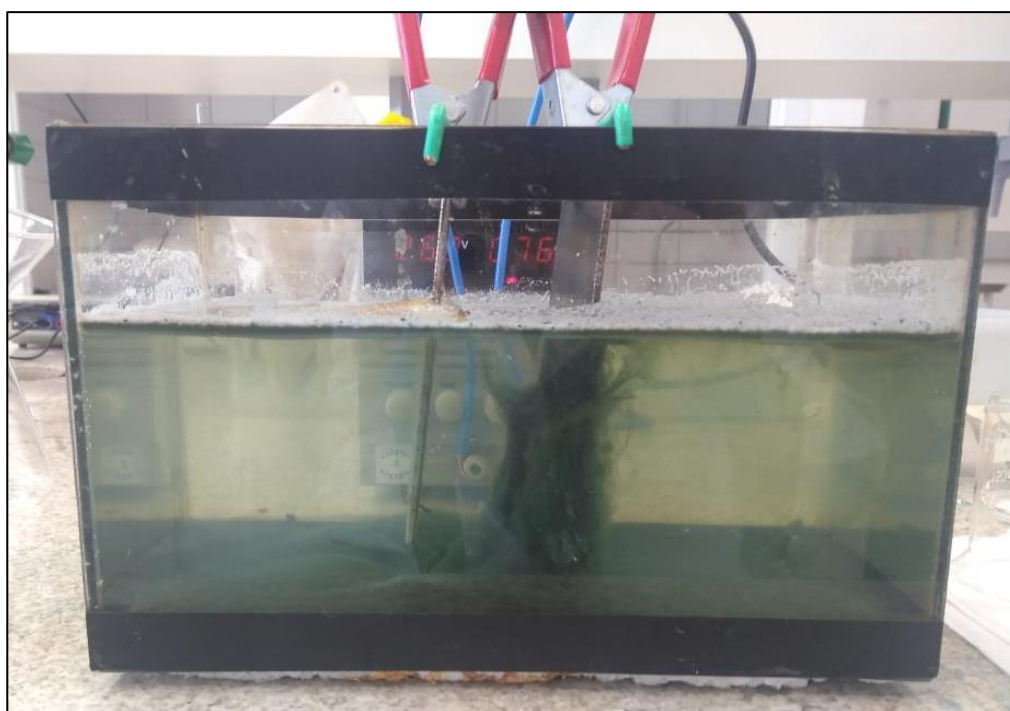


Fonte: Autora, 2019.

O reator eletroquímico utilizado nos tratamentos foi confeccionado de vidro, com dimensões 15 cm x 30 cm, totalizando um volume de 3 L de efluente por tratamento (Figura 2). Os fios utilizados foram de bitola 6 mm, em uma ponta soldados em garras jacaré para prender as placas de sucata de ferro e descascadas 5 cm na outra ponta, para conectar à fonte de energia. A densidade da corrente elétrica aplicada aos tratamentos foi baseada na literatura, variando de 0,3 a 0,9 A, sendo a distância entre as placas fixada em 10 cm. Para uma melhor condutividade dos elétrons no efluente foi adicionado a cada tratamento 1 g.L⁻¹ de NaCl. Todos os ensaios foram realizados em temperatura ambiente (20 - 25° C), sendo o pH utilizado nos mesmos sem ajuste na faixa de 7,5 – 8,7.

Foram analisadas amostras iniciais e finais a cada ensaio realizado, avaliando as variáveis resposta: Cor (2120 B), Turbidez (2130 B), pH, condutividade, Fenol (5530 D), Demanda Química de Oxigênio - DQO (5220 D), Carbono Orgânico Total – COT (5310 B) e Ferro (3500), todos os parâmetros foram avaliados segundo metodologia proposta no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2005). Além desses parâmetros, também foram analisadas a produção de lodo e o desgaste do eletrodo ambos utilizando Método Gravimétrico. A partir dos resultados obtidos, foi realizada análise estatística, com o software Minitab 15, para então determinar os fatores que influenciam significativamente no processo de tratamento de eletrofloculação, considerando as variáveis de resposta estudadas.

Figura 2 – Reator eletroquímico e eletrodos de sucata de ferro durante o processo de eletrofloculação



Fonte: Autora, 2019.

4.2.1 Efluente sintético

O corante comercial Índigo Blue utilizado apresentou diferentes tamanhos de granulometria, o que poderia afetar nas concentrações definidas, assim, o corante passou por um processo de moagem e peneiramento para conseguir uma homogeneidade no pó do corante. O efluente sintético contendo o corante comercial foi preparado em diferentes concentrações, variando de 50 a 80 mg L⁻¹, limites baseados na literatura. Com os limites de concentrações de corante definidos, realizou-se uma varredura da cor em um espectrofotômetro para o

reconhecimento do pico de absorção do corante, definido em 580 nm. Após, foi construída a curva padrão da cor para o conhecimento das concentrações do corante no efluente.

O tempo de eletrólise ficou definido em 2 horas, após serem realizados testes cinéticos (Apêndice C) preliminares do tratamento eletroquímico, utilizando 50 mg L⁻¹ de concentração do corante Índigo Blue, coletando uma amostra do efluente a cada 10 minutos de tratamento e sendo monitorada a remoção de cor até sua estabilização.

Os experimentos foram realizados seguindo um delineamento experimental fatorial 2² (Tabela), onde foram estudadas as variáveis densidade da corrente (0,3-0,9 A) e concentração do corante Índigo Blue (50-80 mg L⁻¹), a combinação destas variáveis utilizando o planejamento experimental resultou em um total de 11 ensaios, conforme mostra a Tabela .

Tabela 1 - Fatores independentes e níveis de variação avaliados no delineamento experimental.

Variáveis	Níveis				
	-1,41	-1	0	+1	+1,41
Corrente (A)	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90
Concentração de corante (mg L⁻¹)	50	58	65	73	80

Tabela 2 – Matriz do planejamento experimental utilizando delineamento fatorial 2².

Ensaio	Corrente elétrica	Concentração de corante
1	-1	+1
2	-1	-1
3	+1	+1
4	+1	-1
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	-1,41	0
9	+1,41	0
10	0	-1,41
11	0	+1,41

4.2.2 Efluente da indústria têxtil

O efluente têxtil foi disponibilizado por um indústria de Jeans localizada no município de Erechim – RS. O efluente foi coletado e armazenado em garrafas pet de 2 L, totalizando 50 litros, após congelados para a preservação de suas características até sua utilização.

Devido a concentração de cor ser determinada na caracterização do efluente da indústria têxtil, a variável estudada para o conhecimento de sua influência no tratamento, foi apenas a densidade da corrente elétrica. Foram realizadas triplicatas de cada ensaio com diferentes correntes aplicadas no efluente têxtil (0,3 A, 0,45 A, 0,60 A, 0,75 A e 0,90 A), totalizando 15 ensaios. O tempo de eletrólise ficou definido em 90 minutos, após análise da cinética de remoção da cor utilizando o efluente real (Apêndice D), foram coletadas amostras a cada 10 minutos até a estabilização da remoção da cor.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Efluente sintético

Após os ensaios de eletrofloculação, foram calculadas as concentrações iniciais e finais e consecutivamente as porcentagens de remoção de cor do efluente tratado, representados na Tabela 3, conforme o planejamento experimental. Nos dados obtidos, observa-se uma eficiente remoção da cor do efluente, sendo todos valores acima de 80 %.

Tabela 3 - Remoção de cor por processo de eletrofloculação com eletrodo de sucata de ferro.

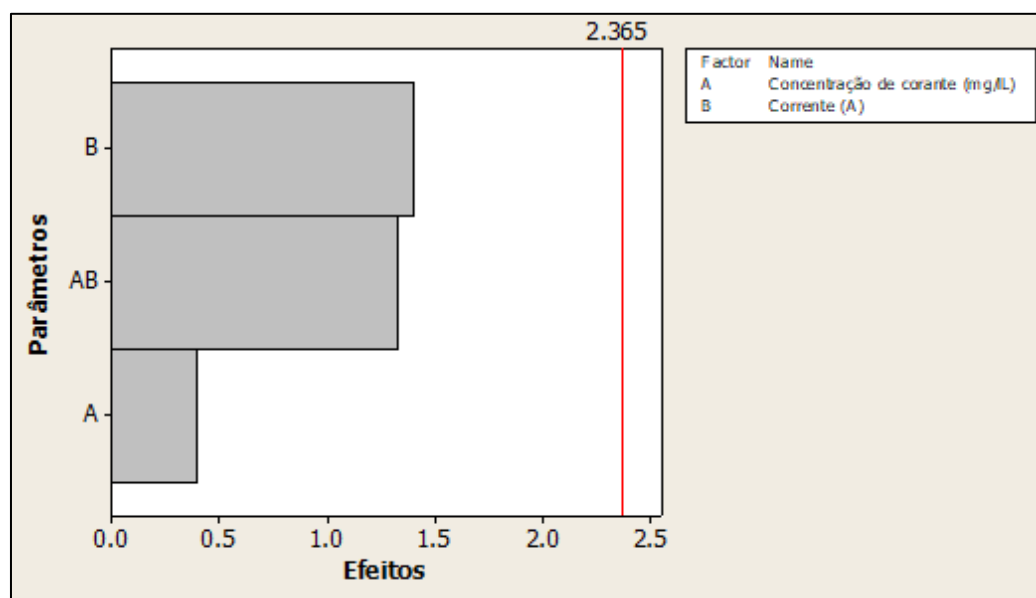
Ensaio	Concentração inicial (mg L ⁻¹)	Concentração final (mg L ⁻¹)	Remoção da cor (%)
1	109,37	10,39	90,50
2	65,29	11,61	82,21
3	108,76	4,27	96,08
4	65,08	0,59	99,09
5	84,47	2,02	97,61
6	81,82	2,02	97,53
7	82,22	3,24	96,05
8	84,27	3,04	96,39
9	80,80	3,04	96,24
10	61,41	1,82	97,04
11	123,86	2,43	98,04

* Desvio padrão ponto central ensaios 5, 6 e 7 = 0,70 mg. L⁻¹

Aplicando os dados obtidos nos ensaios para analisar a estatística, observa-se que a densidade da corrente elétrica e a concentração de corante, parâmetros aplicados nos 11 ensaios,

não apresentaram significância na remoção do corante presente no efluente sintético, o que pode ser afirmado através do gráfico de Pareto com 95 % de confiança (Figura 3). Porém, Aquino Neto (2011), destaca a importância da densidade elétrica aplicada ao tratamento eletroquímico, onde justifica que quanto maior a corrente elétrica aplicada maior é a formação de espécies coagulantes, que aceleram o processo de formação de partículas coloidais e, conseqüentemente, aumentam a eficiência do tratamento. Para Saqer e Farhat (2016), a densidade de corrente determina a taxa de produção do coagulante e o tamanho da produção de bolha e, portanto, afeta o seu crescimento. Após o aumento da densidade de corrente, a quantidade de hidróxidos para precipitação e adsorção também aumentará.

Figura 3 – Gráfico de Pareto da análise dos dados experimentais obtidos para a remoção de cor com 95% de confiança em função da variável densidade da corrente e concentração de corante.



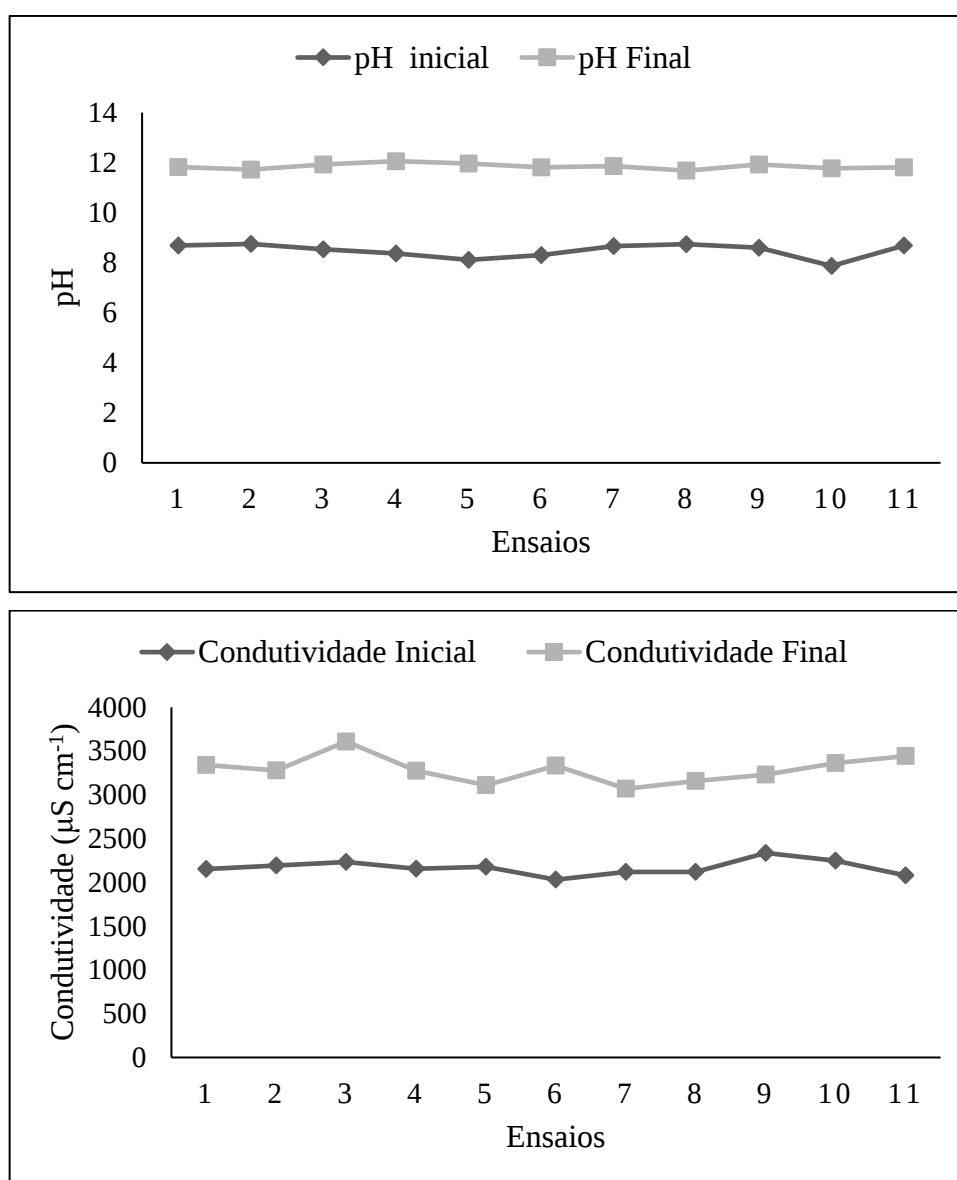
Fonte: Autora, 2019.

Os valores de pH e Condutividade elétrica dos 11 ensaios estão representados na Figura 4, nos mostram que os valores iniciais e finais seguem a mesma faixa, onde o pH apresentou valores iniciando na média de 8 e finalizando em 12. Estes valores de pH obtidos ficaram acima da faixa permitida para lançamento de efluentes pela Resolução do CONAMA nº 430 e CONSEMA nº 355 (pH de 5 a 9). Os resultados obtidos por Oliveira (2016), ao se utilizar eletrodos de alumínio, mostraram que quando o pH das soluções de corante foi entre 1 e 5, a eficiência de remoção de corante foi ótima com o pH 1, com uma eficiência de remoção de 99,78 %. Quando foram investigados em pH básico (pH = 8, 10 e 12) ocorreu uma queda significativa na eficiência. Daneshvar et al., (2004), estudaram a aplicação da eletrocoagulação

no tratamento da solução do corante ácido Vermelho 14 utilizando eletrodos de ferro e observaram que a máxima eficiência de remoção de cor foi a um pH variando de 6-9. Zazou (2019) estudou a eficiência na remoção de poluentes utilizando duas faixas de pH, uma faixa ácida de pH 3 e outra de pH 8,75, pH inicial do efluente têxtil a ser tratado. Ao diminuir o pH de 8,75 para 3 ocorreu uma diminuição na remoção de cor, aproximadamente de 93 para 65%, indicando uma remoção menos eficiente no pH ácido, atribuindo essa característica ao caráter anfotérico do hidróxido de ferro, que quase não precipita em pH muito baixo.

Os valores de Condutividade elétrica apresentaram a mesma faixa inicial e final ao tratamento. Este parâmetro não apresenta limite nos padrões de lançamento exigidos pelas Resoluções vigentes.

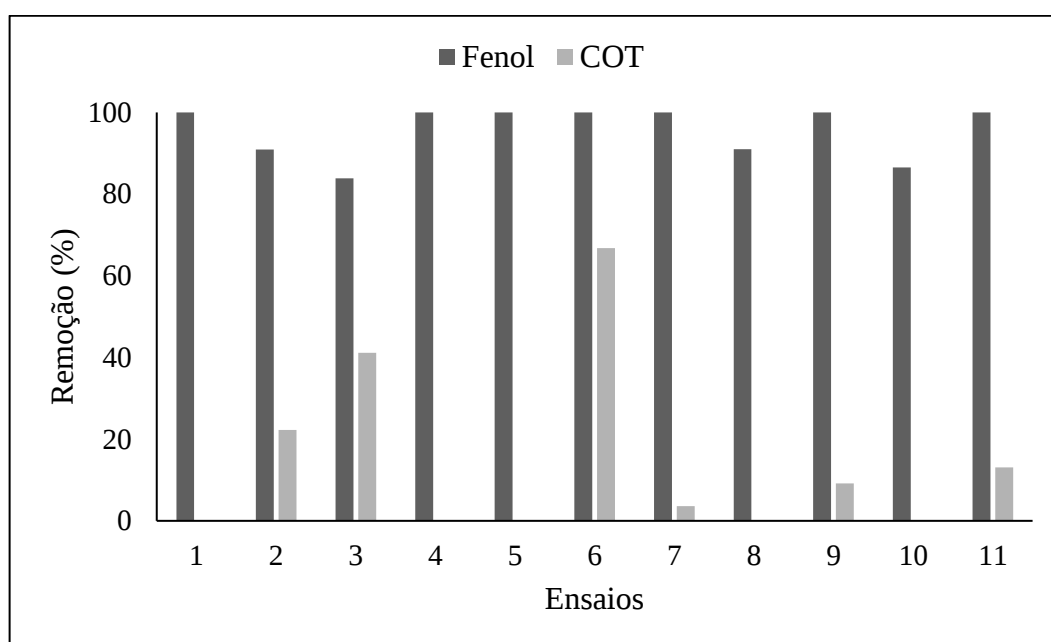
Figura 4 – Valores iniciais e finais obtidos de pH e Condutividade elétrica.



Também foi avaliada uso da sucata de ferro como eletrodo para a remoção de fenóis e COT (Figura 5). Seu uso se mostrou muito eficiente na remoção de fenol com concentração inicial no efluente sintético de 2 a 7 mg.L⁻¹, onde apenas 4 dos ensaios realizados não apresentaram 100 % de remoção, porém ficam na média de 90 %. As concentrações finais de fenol que não foram removidas em 100 % (faixa de 0,1 mg.L⁻¹) ficaram abaixo da concentração exigida pela CONSEMA nº 355 (0,1 mg.L⁻¹) e pela CONAMA nº 430 (0,5 mg.L⁻¹).

Já a remoção de COT apresentou baixa eficiência (Figura 5), onde ocorreu remoção em apenas 5 ensaios realizados, variando de 9 a 66 %. Este fato pode ser decorrente do grupo cromóforo, responsável pela cor e grupo funcional, que liga o corante à fibra (MACIEL, 2013; VOLKOV, et al. 2020). O tratamento de eletrofloculação utilizando as sucatas de ferro como eletrodo pode estar quebrando apenas esta ligação do grupo cromóforo, removendo assim a cor e não matéria orgânica. Su et al. (2011) afirmam que, embora o grupo cromóforo do corante seja destruído por radicais *OH, alguns intermediários de degradação incolores podem ser formados na solução durante a reação.

Figura 5 – Remoção de fenol e COT no efluente sintético.

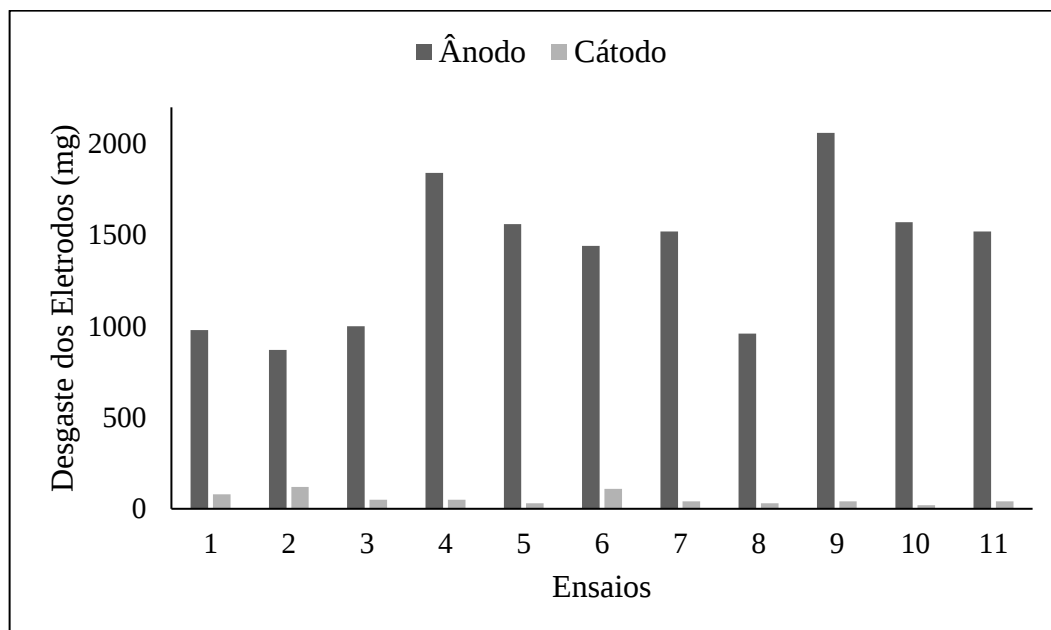


Fonte: Autora, 2019.

Na Figura 5 é possível observar que para o parâmetro COT não houve reprodutibilidade na remoção, visto que os resultados do ponto central do planejamento (ensaios 5, 6, 7) apresentam grande variação, com o desvio padrão de 38 mg.L⁻¹.

A Figura 6 apresenta o desgaste dos eletrodos de sucata de ferro, onde observa-se a ocorrência de um elevado desgaste nos ânodos utilizados em comparação aos cátodos. O desgaste está diretamente ligado a densidade da corrente elétrica aplicada, apresentando o aumento do desgaste dos eletrodos de sacrifício (ânodo) com o aumento da corrente elétrica.

Figura 6 – Desgaste dos eletrodos de sucata de ferro.

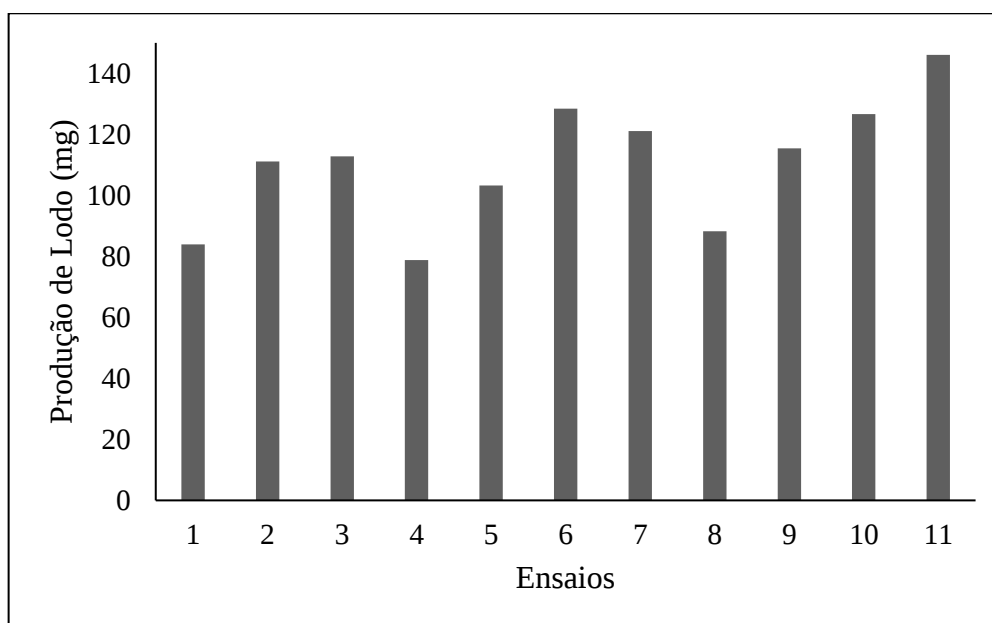


* Desvio padrão ponto central ensaios 5, 6 e 7 = 61 mg (Ânodo) e 43 mg (Cátodo).

Fonte: Autora, 2019.

A maior produção de lodo (Figura 7) ficou concentrada em todos os ensaios onde foi aplicado a corrente 0,6 A, ao contrário do esperado no processo de eletrofloculação, onde a produção do lodo aumentaria com a densidade da corrente elétrica e o desgaste dos eletrodos, não foi observado este comportamento no presente estudo, possivelmente pelo nível máximo da corrente utilizada ser de 9,0 A, potencial este que não pode ser considerado elevado se comparado a outros estudos utilizando a eletrofloculação.

Figura 7 – Produção de lodo nos ensaios de eletrofloculação.



Fonte: Autora, 2019.

4.3.2 Efluente Indústria Têxtil

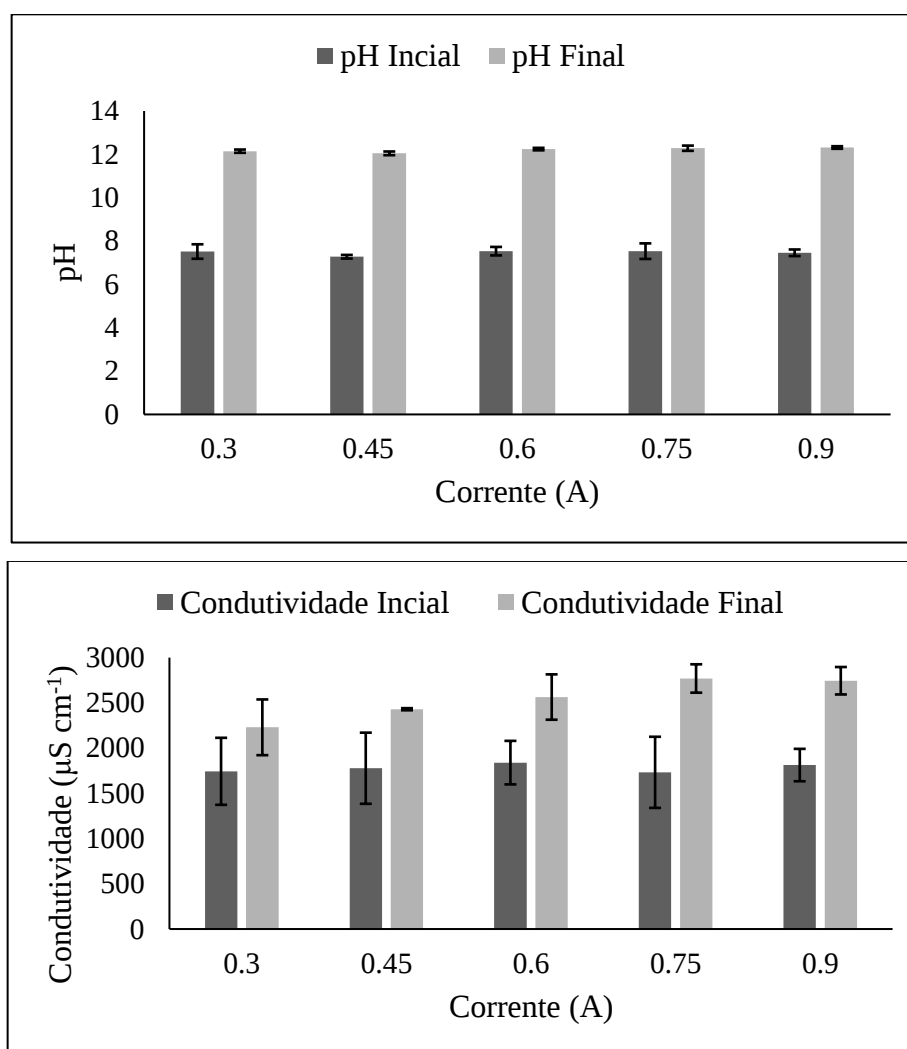
O efluente coletado na Indústria têxtil passou pelo processo de caracterização inicial, para o conhecimento das propriedades do efluente bruto. Estas características estão representadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Caracterização do Efluente têxtil bruto.

Caracterização do Efluente Bruto	
Cor	1209,20 mg Pt Co L ⁻¹
Turbidez	1461 NTU
pH	7,89
Condutividade	702,10 µS cm ⁻¹
Temperatura	22 C°
DQO	6,89 mg O ₂ L ⁻¹
DBO	9,06 mg O ₂ .L ⁻¹
Sólidos Totais	83,70 mg
Fenol	1,35 mg.L ⁻¹
COT	216,30 mg.L ⁻¹

Os valores iniciais e finais de pH e condutividade elétrica obtidos nos ensaios de eletrofloculação estão representados no Figura 8. Os valores pH ficaram todos na mesma faixa, iniciando na média de 8 e terminando em 12, mesmos valores encontrados no tratamento do efluente sintético, e acima do permitido pela Resolução do CONAMA nº 430 e pela CONSEMA nº 355, onde a faixa é de pH 5 a 9. O que sugere a necessidade de ajustes neste parâmetro após a aplicação do tratamento, para que este efluente encontre-se em condição de descarte no corpo receptor. Já condutividade elétrica segue o mesmo padrão, porém não se encontra limites nas Resoluções de lançamento.

Figura 8 – Valores iniciais e finais de pH e Condutividade elétrica do tratamento de eletrofloculação.



Fonte: Autora, 2019.

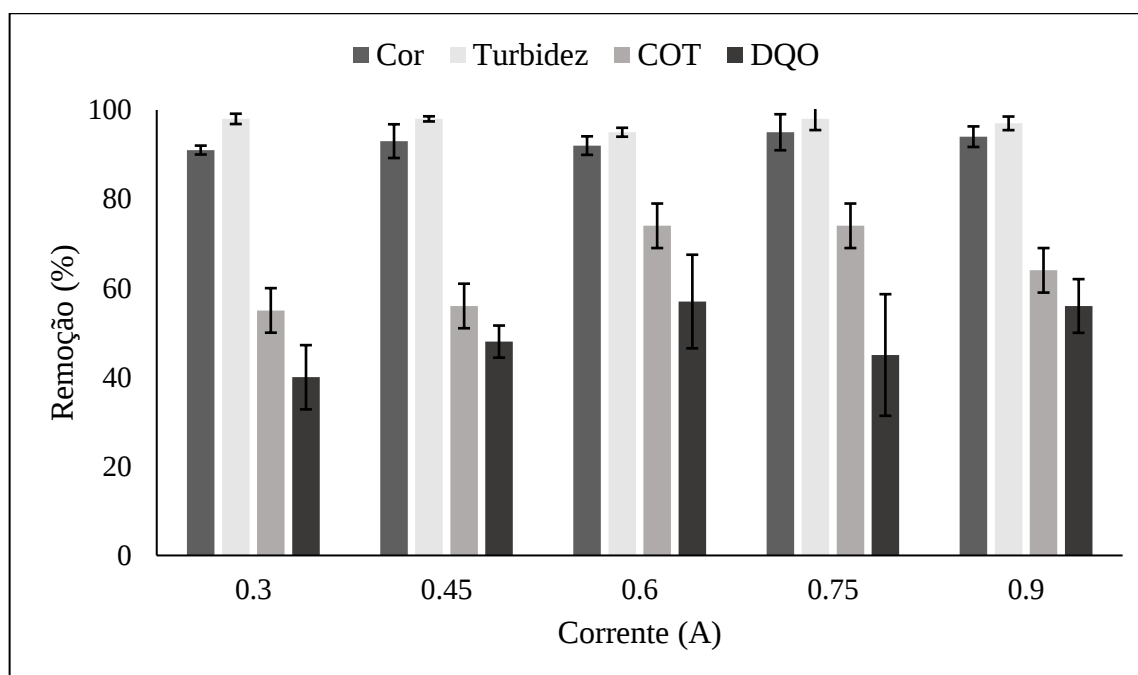
Segundo Tak et al. (2015), no processo de eletrocoagulação, o pH é um parâmetro que afeta o desempenho do tratamento, onde tipos diferentes de hidróxidos de metal são formados na eletrofloculação e podem ocorrer mudanças no processo, dependendo do pH inicial.

Cerqueira (2006), avaliou o pH inicial como parâmetro de influência na eletrofloculação utilizando eletrodos de ferro, onde observou que o pH inicial 7 apresentou melhores valores de remoção de cor, turbidez e DQO, o que corrobora com os resultados obtidos no presente estudo. Núñez et. al. (2019) testou diferentes faixas de pH (6, 7,1, 9 e 12) na remoção de cor, turbidez e DQO em um efluente têxtil, utilizando eletrodos de ferro, encontrando melhores resultados com o pH inicial de 7,1 (valor do efluente bruto). A faixa de pH 9 apresentou maior remoção de turbidez porém diminuindo muito a remoção de cor e DQO. Além disso, encontra-se a vantagem de utilizar o valor de pH original do efluente, sem necessidade de se implementar um processo para alteração do pH, diminuindo custos.

A condutividade elétrica é diretamente proporcional à quantidade de íons condutores presentes no líquido, quanto maior for a concentração de íons no efluente, maior será sua capacidade de condução de corrente elétrica e com isso maior será a possibilidade de ocorrência de reações entre as substâncias presentes no efluente. Com isso quando a condutividade é alta são removidas grandes quantidades de contaminantes, com um custo energético menor (CAMBOIM, 2010).

Na Figura 9, observa-se as remoções de cor, turbidez, COT e DQO em cada corrente aplicada., valores que representam a média das remoções nas triplicatas.

Figura 9 – Remoção de cor, turbidez, COT e DQO do efluente real.



Fonte: Autora, 2019.

Analisando a remoção de cor e turbidez do efluente têxtil, observa-se que as médias de remoção ficaram nos mesmos níveis, independente da intensidade da corrente elétrica aplicada. Isto evidencia que não é necessário utilizar uma maior corrente para se obter uma boa eficiência de remoção, onde poderia ser aplicada a menor corrente, de 0,3 A, e economizar em energia elétrica, o que pode ser interessante em processos de ampliação de escala. Diferentemente do relatado na literatura nos trabalhos de Kobya et al. (2015) e Ghalwa et al. (2016), ao aplicar a eletrofloculação para o tratamento de efluentes industriais, o aumento da densidade da corrente elétrica causou um aumento na taxa de produção de coagulantes, resultando consequentemente uma maior oxidação dos eletrodos e ao mesmo tempo a geração de gases hidrogênio e oxigênio na superfície dos eletrodos, efetuando assim o transporte do material coagulado.

Na avaliação da remoção de COT, as médias de remoção nas correntes aplicadas apresentaram pequena variação, de 55 a 75 %, onde o melhor resultado foi obtido na corrente de 0,6 A, nos mostrando que a corrente elétrica também não é significativa na remoção do deste parâmetro. Na remoção da DQO a eletrofloculação também apresentou uma eficiência parecida nas correntes, variando de 40 a 57 %, onde a maior remoção se encontra na corrente 0,6 A. Mais uma vez evidenciando que não é necessário aplicar maiores densidades de corrente para se obter bons resultados. Bener et al. (2019) avaliou a remoção de COT e DQO num efluente têxtil utilizando eletrodos de alumínio, após 120 minutos de eletrólise em pH inicial de 5, encontrou uma eficiente remoção de COT, aproximadamente de 65 %, e baixa remoção de DQO, onde o máximo obtido foi de 18 %. Quanto a presença de fenol, o tratamento utilizando a sucata de ferro apresentou uma eficiência de tratamento de 100 %, onde em todos os ensaios ocorreu a remoção total para este parâmetro.

Também, observou-se que o efluente final do tratamento apresentava uma coloração amarelada (Figura 10), em todos os ensaios realizados, assim optou-se por analisar a presença de ferro no final do processo de eletrofloculação, visto que o mesmo está presente nos eletrodos de sucata.

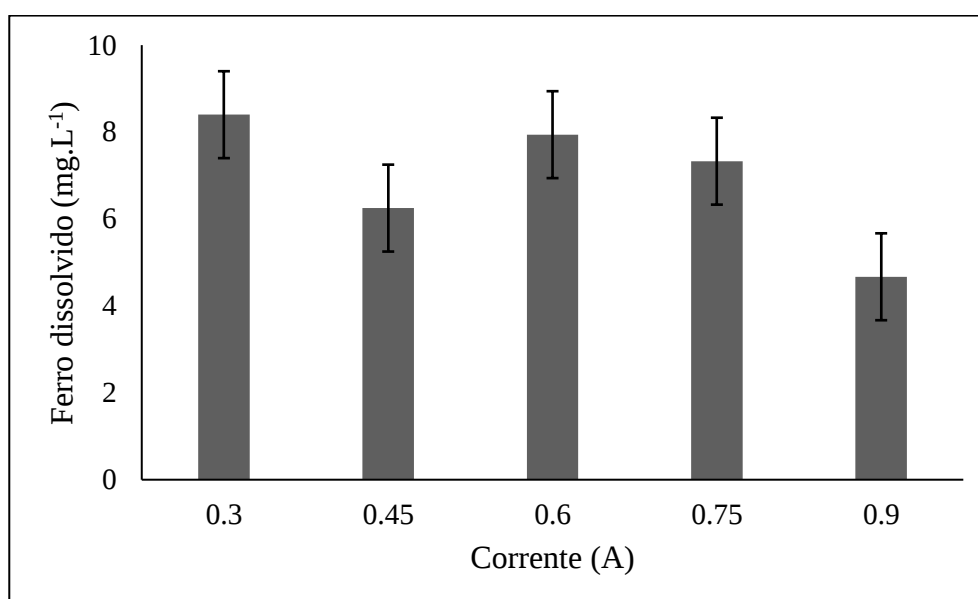
Figura 10 – Efluente bruto da Indústria Têxtil (esquerda) e após o processo de eletrofloculação (direita).



Fonte: Autora, 2019.

Após a análise do ferro no processo de eletrofloculação, dados apresentados no Figura 11, foram encontrados valores maiores nas menores densidades de corrente, chegando a 8 mg.L^{-1} na corrente $0,3 \text{ A}$. A concentração de ferro dissolvido pode estar diretamente ligada a remoção da cor, onde de acordo com Ghalwa et al. (2016), quando ocorre o aumento do pH, consequentemente ocorre a elevação na concentração de ferro dissolvido presente nas amostras durante o processo eletroquímico, aumentando a formação de hidróxido de ferro que absorvem as moléculas de corante e faz com que a remoção seja mais eficiente.

Figura 11 – Concentração de ferro dissolvido após o tratamento de eletrofloculação.

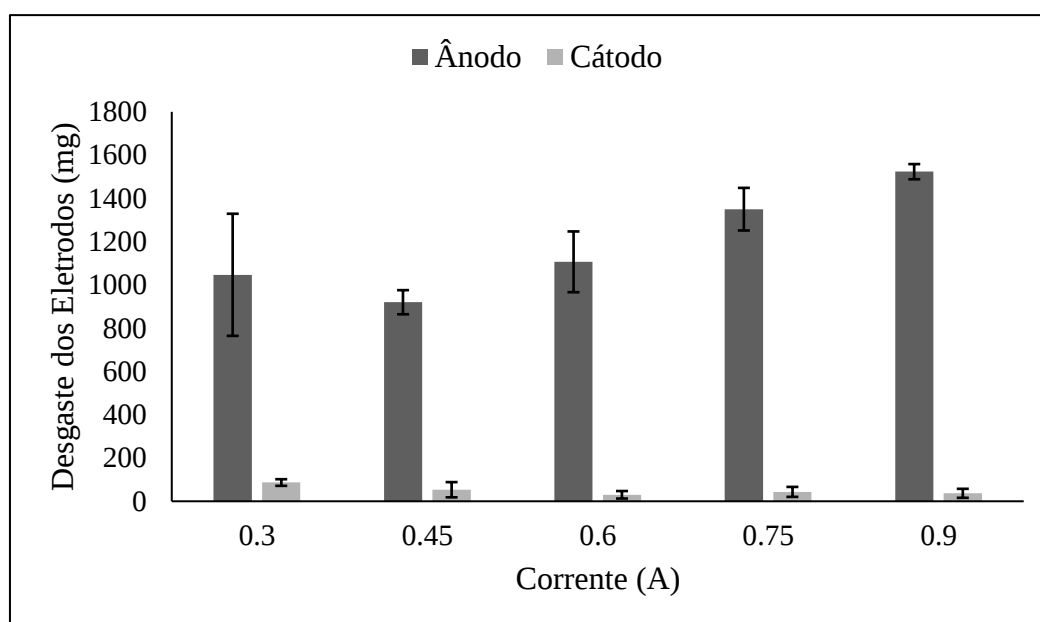


Fonte: Autora, 2019.

Apesar do efluente tratado apresentar ferro dissolvido, os valores encontram-se abaixo do permitido pelas Resoluções da CONAMA nº 430 (15 mg.L⁻¹ Fe) e CONSEMA nº 355 (10 mg.L⁻¹ Fe), não necessitando de tratamento secundário para seu lançamento no corpo hídrico receptor.

O desgaste dos eletrodos foi outro parâmetro analisado, onde pode-se observar na Figura 12 os valores obtidos nos ensaios. O desgaste dos ânodos se destaca em relação aos cátodos, e estão diretamente ligados a densidade da corrente elétrica aplicada. Santos (2015) afirma em seus estudos que a eletrofloculação está diretamente relacionada com o desgaste do eletrodo no processo de geração do coagulante, ou seja, a geração do alumínio e/ou ferro está relacionada à carga de corrente elétrica. Portanto, quanto maior for a carga elétrica aplicada no tratamento, maior será o desgaste do eletrodo de sacrifício, o que é visível nos resultados obtidos usando a sucata de ferro.

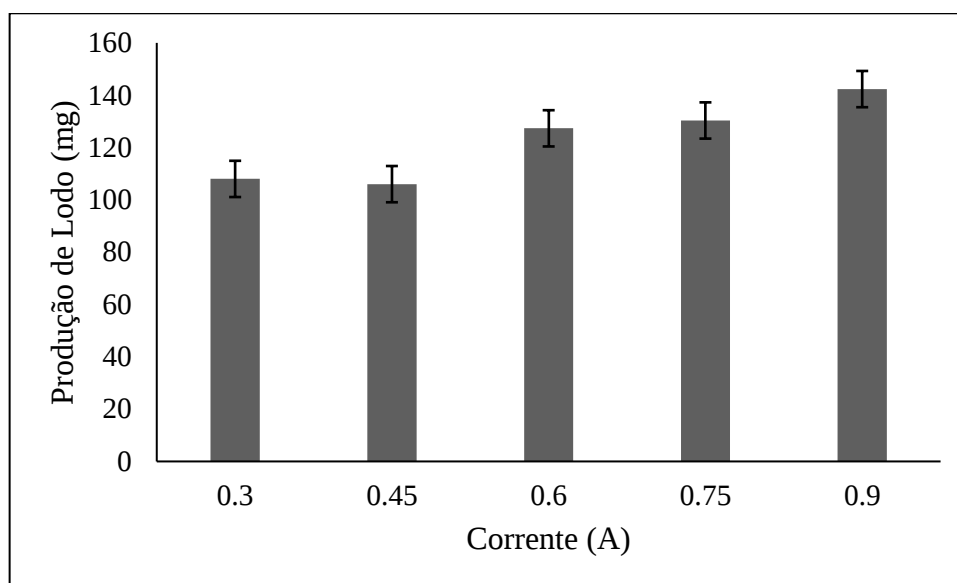
Figura 12 – Desgaste dos eletrodos no processo de eletrofloculação utilizando sucata de ferro.



Fonte: Autora, 2019.

A produção de lodo (Figura 13) apresentou maior quantidade produzida nas densidades de corrente maiores, relacionada com o maior desgaste dos eletrodos de sucata de ferro e a maior produção de coagulantes geradas durante o tratamento de eletrofloculação. O mesmo ocorreu nos estudos de Bener (2019), onde a quantidade de lodo gerado durante a eletrocoagulação aumentou à medida que a densidade da corrente foi aumentada.

Figura 13 - Produção de Lodo durante o processo de eletrofloculação.



Fonte: Autora, 2019.

4.4 CONCLUSÃO

A eletrofloculação utilizando sucata de ferro como eletrodo mostrou-se um tratamento eficiente para efluentes contendo corantes, sintético e real, visto que suas principais vantagens são a menor geração de lodo e não necessita de adição de produtos químicos no processo. O processo eletroquímico apresentou boa eficiência no tratamento dos efluentes analisados, apresentando remoção média de 95 % de remoção de cor, 95 % de remoção de fenol e baixa produção de lodo, no efluente sintético, já no efluente da indústria têxtil obteve-se uma média de remoção de 92 % de cor, 97 % de turbidez, 100 % de fenol, até 65 % de COT, 49 % de DQO e baixa produção de lodo.

A análise estatística apresentou o parâmetro densidade de corrente elétrica aplicada como não significativo na remoção dos poluentes nos dois efluentes analisados, sintético e da indústria têxtil.

Estudos envolvendo a utilização de resíduos industriais evidenciam cada dia mais sua importância, onde, se agrega valor a um produto sem a necessidade de se utilizar matéria-prima pura, como é o caso da sucata de ferro.

4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA - Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation. 2005.

AQUINO NETO. Tratamento de resíduos de corante por eletrofloculação: um experimento para cursos de graduação em química. **Química Nova**, v. 34, p. 1468-1471, 2011.

BENER, S.; BULCA, O.; PALAS, B.; TEKIN, G.; ATALAY, S.; ERSOZ, G. Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: Effect of operative conditions on the organic carbon removal and kinetic study. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 129, p. 47-54, 2019.

BRILLAS, D.; MARTÍNEZ-HUITLE, C. A. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An updated review. **Applied catalysis B: Environmental**, v. 166-167, p. 603-643, 2015.

CAMBOIM, Ricardo Augusto. Técnica de eletroflotação aplicada na remoção de cores de efluentes têxteis. 2010. 249 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

CARMELIO, J. S. et al. Guia ABIFA de Fundição. **Associação Brasileira de Fundição**. São Paulo: **ABIFA**, 2018.

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 - RJ, 2006.

DANESHVAR, N.; SORKHABI, H. A.; KASIRI, M. B. Decolorization of dye solution containing acid Red 14 by electrocoagulation with a comparative investigation of different electrode connections. **Journal of Hazardous Materials**, v. 112, p. 55-62, 2004.

EMAMJOMEH, M. M.; SIVAKUMAR, M. Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes. **Journal of Environmental Management**, v. 90, p.1663-1679, 2009.

GHALWA, N. M. A.; SAQER, A. M.; FARHAT, N. B. Removal of Reactive Red 24 Dye by Clean Electrocoagulation Process Using Iron and Aluminum Electrodes. **Journal of Chemical Engineering & Process Technology**. Palestine, p. 1-7, 2016.

KOBYA, M.; DEMIRBAS, E. Evaluations of operating parameters on treatment of can manufacturing wastewater by electrocoagulation. **Journal of Water Process Engineering**, p. 64-74, 2015.

KOBYA, M.; GENGEÇ, E.; DEMIRBAS, E. Operating parameters and costs assessments of a real dyehouse wastewater effluent treated by a continuous electrocoagulation process. **Chemical engineering and processing: process intensification**, v. 101, p. 87-100, 2016.

MACIEL, Washington Luiz Souza. Estudo do processo de adsorção do corante azul royal dianix cc presente em meio aquoso empregando carvão ativado obtido a partir de um 107 resíduo agroindustrial - semente de siriguela. 2013. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2013.

NÚÑEZ, J.; YEBER, M.; CISTEMAS, N.; THIBAUT, R.; MEDINA, P.; CARRASCO, C. Application of electrocoagulation for the efficient pollutants removal to reuse the treated wastewater in the dyeing process of the textile industry. **Journal of hazardous materials**, v. 371, p. 705-711, 2019.

OLIVEIRA, M. B. O. Desenvolvimento de um sistema eletroquímico para tratamento do corante alaranjado de metila pelo processo de eletrocoagulação/eletroflotação. Dissertação (Tecnologias para o Desenvolvimento Sustentável), Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco – MG, 2016.

PAVAS, E.; GÓMEZ, I. D.; GARCÍA, A. G. Coagulation-flocculation sequential with fenton or photo-fenton processes as an alternative for the industrial textile wastewater treatment. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 801, p. 267-299, 2017.

SANTOS, B. S. Sistema de tratamento híbrido utilizado na remoção do corante reativo 5g de um efluente têxtil sintético. Dissertação (Tecnologias Ambientais), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2015.

SAQER, A. M.; FARHAT, N. B.; Removal of reactive red 24 dye by clean electrocoagulation process using iron and aluminium electrodes. **Journal of Chemical Engineering & Process Technology**, v. 7, p. 1 – 7, 2016.

SIRIRERKRATANA, K.; KEMACHEEVAKUL, P.; CHUANGCHOTE, S. Color removal from wastewater by photocatalytic process using titanium dioxide-coated glass, ceramic tile, and stainless steel sheets. **Journal of Cleaner Production**, v. 215, p. 123-130, 2019.

SINGH, K.; ARORA, S. Removal of synthetic textile dyes from wastewaters: a critical review on present treatment technologies. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 41, p. 807-878, 2011.

SU, C.; PUKDEE-ASA, M.; RATANATAMSKUL, C.; LU, M. Effect of operating parameters on decolorization and COD removal of three reactive dyes by Fenton's reagent using fluidized-bed reactor. **Desalination**, v. 278, p. 211-218, 2011.

TAK, B.; TAK, B.; KIM, Y.; PARK, Y.; YOON, Y.; MIN, G. Optimization of color and COD removal from livestock wastewater by electrocoagulation process: Application of Box-Behnken design (BBD). **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 28, p. 307-315, 2015.

THAKUR, C.; SRIVASTAVA, V. C.; MALL, I. D. Electrochemical treatment of a distillery wastewater: Parametric and residue disposal study. **Chemical Engineering Journal**, v. 148, p. 496-505, 2009.

VERMA, A. K.; DASH, R. R.; BHUNIA, P. Chemical coagulation and sonolysis for total aromatic amines removal from anaerobically pretreated textile wastewater: a comparative study. **Advances in Environmental Research**, v. 3, p. 293-306, 2011.

YA, V.; GUILLOU, E. L.; CHEN, Y. M.; CHOO, K. H.; LEE, S. J. Scrap iron packed in a Ti mesh cage as a sacrificial anode for electrochemical Cr(VI) reduction to treat electroplating wastewater. **Journal of the Taiwan of Chemical Engineers**, v. 87, p. 91-97, 2018.

ZAZOU, H.; AFANGA, H.; AKHOUAIRI, S.; OUCHTAK, H.; ADDI, A. A. Treatment of textile industry wastewater by electrocoagulation coupled with electrochemical advanced oxidation process. **Journal of Water Process Engineering**, v. 28, p. 214-221, 2019.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A eletrofloculação mostrou-se eficaz no tratamento de efluente têxtil, melhorando todos os parâmetros analisados, visto que suas principais vantagens são a menor geração de lodo e não necessitar de adição de produtos químicos antes e após o tratamento.

Neste estudo, para a eletrofloculação, utilizou-se dois tipos de materiais para os eletrodos, escória de ferro e sucata de ferro, no tratamento de um efluente sintético contendo corante Índigo Blue e um efluente de Indústria Têxtil. Para comparação dos tratamentos propostos, avaliou-se a eficiência na remoção de cor, turbidez, DQO, COT e fenol, além da produção de lodo e desgaste dos eletrodos.

Ao se utilizar as escórias de ferro como eletrodo encontrou-se resultados como:

- No efluente sintético: 25 minutos de eletrólise, até 95 % de cor e 100 % de fenol.
- No efluente da indústria têxtil: 60 minutos de eletrólise, média de remoção de 80 % de cor, 91 % de turbidez, 100 % de fenol, até 73 % de COT, 55 % de DQO e baixa produção de lodo.

Os testes utilizando a sucata de ferro como eletrodo obtiveram os seguintes resultados:

- No efluente sintético: 120 minutos de eletrólise, 95 % remoção de cor, 95 % de remoção de fenol e baixa produção de lodo.
- No efluente da indústria têxtil: 90 minutos de eletrólise, média de remoção de 92 % de cor, 97 % de turbidez, 100 % de fenol, até 65 % de COT, 49 % de DQO e baixa produção de lodo.

A densidade da corrente elétrica não apresentou significância na remoção destes poluentes, nos dois efluentes e materiais de eletrodos estudados, podendo ser utilizada a corrente mediana, 0,6 A, e economizar na energia elétrica.

A sucata de ferro apresentou uma elevação no tempo de eletrólise, o que leva a um consumo maior de energia elétrica em seu processo, e em comparação a escória de ferro. A escória de ferro apesar de apresentar características complexas na sua composição, apresentou vantagens em seu uso: boas remoções de poluentes em apenas 60 minutos de eletrólise, como é o caso do efluente da indústria têxtil, obtendo valores de eficiência no mesmo patamar que ao se utilizar a sucata de ferro, podendo se agrega valor comercial a um resíduo sem utilização e economizar energia no tempo de eletrólise.

Os dois materiais utilizados como eletrodo apresentaram um comportamento semelhante ao se analisar a remoção da matéria orgânica no efluente sintético. Proporcionam

uma boa eficiência na remoção da cor, entretanto baixa remoção de COT, este fato pode estar relacionado a quebra do grupo cromóforo no corante.

A sucata de ferro apresentou coloração amarelada após cada tratamento aplicado, demonstrando a presença de ferro dissolvido, porém numa pequena quantidade, não se caracterizando como uma problemática, pois os valores encontram-se abaixo do limite permitido pelas Resoluções vigentes.

Os valores de pH necessitam de correção após cada tratamento, independente do material utilizado como eletrodo e do efluente tratado, todos valores terminaram na faixa de pH 12, acima do permitido para seu lançamento no corpo hídrico.

Analisando os prós e contras, é possível inferir que a técnica de eletrofloculação utilizando resíduos de fundição como eletrodos é altamente viável e aplicável ao tratamento de efluentes, especialmente os têxteis, sendo um método mais eficiente e ao mesmo tempo diminui os impactos ambientais à natureza que vai receber o efluente tratado e consequentemente às pessoas e animais que utilizarem essa água posteriormente.

6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Dois parâmetros analisados necessitam de uma melhor investigação:

- A remoção de COT no efluente sintético não apresentou resultados expressivos nos ensaios aplicados, necessitando de uma maior atenção na quebra do grupo cromóforo em relação a remoção da matéria orgânica.
- O pH apresentou valores acima dos valores permitidos pelas Resoluções vigentes em todos os ensaios realizados utilizando as escórias e sucata de ferro como eletrodos.

Uma questão importante a ser abordada em futuras pesquisas é a avaliação da viabilidade econômica da operação do processo de eletrofloculação utilizando resíduos como eletrodos. O custo do consumo energético e custos operacionais devem ser estimados, pois são critérios importantes para a indústria na escolha da tecnologia de tratamento a ser aplicada. Além disso, a maioria dos estudos envolvendo o processo de eletrofloculação são realizados utilizando reatores em escala laboratorial, enquanto isso é necessário o conhecimento em escala real com fluxo contínuo de efluente.

Necessita também de uma caracterização dos eletrodos utilizados, pois sua composição específica não é conhecida, o que acaba afetando no tratamento eletroquímico. Com isso seria possível ter um maior controle quanto a quantidade de ferro presente em cada tratamento a ser aplicado.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-MAMUN, M.R.; KADER, S.; ISLAM, M.S.; KHAN, M.Z.H. Photocatalytic activity improvement and application of UVTiO₂ photocatalysis in textile wastewater treatment: A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, p. 103248, 2019.

APHA - Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation. 2005.

AQUINO NETO. Tratamento de resíduos de corante por eletrofloculação: um experimento para cursos de graduação em química. **Química Nova**, Ribeirão Preto, v. 34, p.1468-1471, 2011.

AZARIAN, G.; RAHMANI, R. A.; MASOUDI, M. ATASHZABAN, Z.; NEMATOLLAHI, D. New batch electro-coagulation process for treatment and recovery of high organic load and low volume egg processing industry wastewater. **Process. Saf. Environ. Prot.** 2018

BANDE, R. M., PRASAD, B.; MISHRA, I. M.; WESAWAR, K. L. The oil effluent water treatment for safe disposal by electroflotation. **Chemical Engineering Journal**, v. 137, p. 503-509, 2008.

BENER, S.; BULCA, O.; PALAS, B.; TEKIN, G.; ATALAY, S.; ERSOZ, G. Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: Effect of operative conditions on the organic carbon removal and kinetic study. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 129, p. 47-54, 2019.

BISCIO, V. et al. Reuse of textile wastewater after homogenization–decantation.pdf. **Chemical Engineering Journal**, v. 265, p. 122–128, 2015.

BRASIL, Resolução CONAMA n°357, de 17 de março de 2005. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional.

BRASIL, Resolução CONAMA n°430, de 13 de maio de 2011. Condições e padrões de lançamento de efluentes do Território Nacional.

BRASIL, Resolução CONSEMA n°355, de 13 de julho de 2017. Critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para fontes geradores que lancem seus efluentes em águas superficiais do Estado do Rio Grande do Sul.

BRILLAS, D.; MARTÍNEZ-HUITLE, C. A. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An updated review. **Applied catalysis B: Environmental**, v. 166-167, p. 603-643, 2015.

CAMBOIM, Ricardo Augusto. Técnica de eletroflotação aplicada na remoção de cores de efluentes têxteis. 2010. 249 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

CAÑIZARES, P.; MARTÍNEZ, F.; JIMÉNEZ, C.; SÁEZ, C.; RODRIGO, M. A. Coagulation and electrocoagulation of oil-inwater emulsions. **Journal of Hazardous Materials**, v. 151, p. 44-51, 2008.

DA COSTA, P.R.F.; DE A. COSTA, E.C.T.; CASTRO, S.S.L.; FAJARDO, A.S.; MARTÍNEZ-HUITLE, C.A. A sequential process to treat a cashew-nut effluent: Electrocoagulation plus electrochemical oxidation. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v.1, 2019.

CARMELIO, J. S. et al. Guia ABIFA de Fundição. Associação Brasileira de Fundição. São Paulo: ABIFA, 2018

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.; RUSSO, C.; MARQUES, M. R. C. Electroflocculation for textile wastewater treatment. **Braz. J. Chem. Eng.**, São Paulo, v. 26, 2009.

CHAKRABORTY, J. N. Wastewater problem in textile industry. In: Fundamentals and Practices in Colouration of Textiles. **Woodhead Publishing India**, p. 515–545, 2014.

CHEN, G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. **Sep. Purif. Technol.**, v. 38, p. 11-41, 2004.

CRESPILHO, Nelson. F; REZENDE, Maria. O. Eletroflotação: Princípios e aplicações, 2004.

DANESHVAR, N.; SORKHABI, H. A.; KASIRI, M. B. Decolorization of dye solution containing acid Red 14 by electrocoagulation with a comparative investigation of different electrode connections. **Journal of Hazardous Materials**, v. 112, p. 55-62, 2004.

EMAMJOMEH, M. M.; SIVAKUMAR, M. Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes. **Journal of Environmental Management**, v. 90, p.1663-1679, 2009.

FARJADO, A. S.; RODRIGUES, R. F.; MARTINS, R. C.; CASTRO, L. M.; FERREIRA, R. M. Phenolic wastewaters treatment by electrocoagulation process using Zn anode. **Chemical Engineering Journal**, v. 275, p. 331-341, 2015.

FORTINO, P. Pós-tratamento de efluente têxtil usando coagulação/floculação combinado com processos de separação por membranas. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

FUJITA, R. M. L.; JORENTE, M. J. The Brazilian textile industry: a cultural and historical perspective. **Revista ModaPalavra e-Periódico**, v. 8, 2015.

GENDEL, Y.; LAHAV, O. A new approach to increasing the efficiency of low-pH Fe-electrocoagulation applications. **Journal of hazardous materials**, v. 183, p. 596-601.

GHALWA, N. M. A.; SAQER, A. M.; FARHAT, N. B. Removal of Reactive Red 24 Dye by Clean Electrocoagulation Process Using Iron and Aluminum Electrodes. **Journal of Chemical Engineering & Process Technology**. Palestine, p. 1-7, 2016.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. Corantes têxteis: Revisão. **Química Nova**, v. 23, p. 71-78, 2000.

HAKIZIMANA, J. N. et al. Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. **Desalination**, v. 404, p. 1-21, 2017.

KOBYA, M.; DEMIRBAS, E. Evaluations of operating parameters on treatment of can manufacturing wastewater by electrocoagulation. **Journal of Water Process Engineering. Turkey**, p. 64-74, 2015.

HOLKAR, C. R. et al. A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches. **Journal of Environmental Management**, v. 182, p. 351–366, 2016.

HUNGER, K. Industrial Dyes – Chemistry, Properties, Applications. **Weinheim:Wiley – VCH**. v. 653, 2003.

IMNICH, A. P. S. Remoção de Corantes de Efluentes Têxteis Utilizando Folhas de Azadirachta Indica como Adsorvente. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 2006.

KABDASLI, I.; GUREL, M.; TUNAY, O. Characterization and treatment of textile printing wastewaters. **Journal Environmental Technology**, v. 21, p. 1147-1155, 2010.

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.

KISMIR, Y.; AROGUZ, A. Z. Adsorption characteristics of the hazardous dye brilliant green on saklikent mud. **Chemical Engineering Journal**, v. 172, p. 199-206, 2011.

LEE, S. Y.; GAGNON, G. A. Review of the factors relevant to the design and operation of an electrocoagulation system for wastewater treatment. **Environmental Reviews**, v. 22, p. 421-429, 2014.

LIMA, C. S.; BATISTA, K. A.; RODRIGUEZ, A. G.; FERNANDES, J. R. S. Photodecomposition and color removal of a real sample of textile wastewater using heterogeneous photocatalysis with polypyrrole. **Solar Energy**, v. 114, p. 105-113, 2015.

LIU, S.; LI, B.; QI, P.; YU, W.; ZHAO, J.; LIU, Y. Performance of Freshly Generated Magnesium Hydroxide (FGMH) for Reactive Dye Removal. **Colloid and Interface Science Communications**, v. 28, p. 34-40, 2019.

MACIEL, Washington Luiz Souza. Estudo do processo de adsorção do corante azul royal dianix cc presente em meio aquoso empregando carvão ativado obtido a partir de um 107 resíduo agroindustrial - semente de siriguela. 2013. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2013.

MOLLAH, M. Y. A.; MORKOVSKY, P.; GOMES, J. A.G.; KESMEZ , M.; PARGA, J.; COCKE, D. L. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. **Journal of Hazardous Materials**, p. 12, 2004.

MOOK, W. T.; AROUA, M. K.; SZLACHTA, M.; LEE, C. S. Optimisation of Reactive Black 5 dye removal by electrocoagulation process using response surface methodology. **Water Science & Technology**, v.75, p. 952-962, 2017.

MUFF, J. O. Electrochemical Oxidation - A Versatile Technique for Aqueous Organic Contaminant Degradation. In: SØGAARD, E. G. **Chemistry of Advanced Environmental Purification Processes of Water: Fundamentals and Applications**, Amsterdam: Elsevier, 2014.

NARIYAN, E.; SILLANPAA, M.; WOLKERSDORFER, C. Electrocoagulation treatment of mine water from the deepest working European metal mine-Performance, isotherm and kinetic studies. **Sep. Purif. Technol.**, v. 177, p. 363-373, 2017.

NÚÑEZ, J.; YEBER, M.; CISTEMAS, N.; THIBAUT, R.; MEDINA, P.; CARRASCO, C. Application of electrocoagulation for the efficient pollutants removal to reuse the treated wastewater in the dyeing process of the textile industry. **Journal of hazardous materials**, v. 371, p. 705-711, 2019.

OLIVEIRA, M. B. O. Desenvolvimento de um sistema eletroquímico para tratamento do corante alaranjado de metila pelo processo de eletrocoagulação/eletroflotação. Dissertação (Tecnologias para o Desenvolvimento Sustentável), Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco – MG, 2016.

OLIVEIRA, E.M.S.; SILVA, F.R.; MORAIS, C.C.O.; OLIVEIRA, T.M.B.F.; MARTÍNEZ-HUITLE, C.A.; MOTHEO, A.J.; ALBUQUERQUE, C.C.; CASTRO, S.S.L. Performance of (in)active anodic materials for the electrooxidation of phenolic wastewaters from cashew-nut processing industry. **Chemosphere**, v. 201, p. 740-748, 2018.

PASCHOAL, M. M. A. Aplicação da tecnologia de eletrofloculação na recuperação do corante índigo blue a partir de efluentes industriais. **Química Nova**, v. 28, p. 766 – 772, 2005.

PAVAS, E.; GÓMEZ, I. D.; GARCÍA, A. G. Coagulation-flocculation sequential with fenton or photo-fenton processes as an alternative for the industrial textile wastewater treatment. **Journal of electroanalytical chemistry**, v. 801, p. 267-299, 2017.

PEREIRA, Aline Figueiredo Soares. Aplicação da Eletroflotação no Tratamento de Efluente na Indústria Têxtil. 2007. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Campinas, Campinas, 2007.

PIZZATO, G. A. J.; ANDRADE, Z. A. Avaliação do tratamento de efluente de tingimento de poliéster através de processo de eletroflotação. **6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente**, Bento Gonçalves, RS. 2018.

RAMAZAN, K.; CAN, O. T.; AYGUN, A.; TEK, A. Comparison of the effects of various supporting electrolytes on the treatment of a dye solution by electrocoagulation process. **Colloid and Interface Science Communications**, v. 33, p. 100210, 2019.

RUIZ, A. A. Usando eletrocoagulação para remoção de Tartrazina em soluções aquosas. **Revista Produção Mais Limpa**, v. 6, 2011.

SADEDDIN, K.; NASER, A.; FIRAS, A. Removal of turbidity and suspended solids by electrocoagulation to improve feed water quality of reverse osmosis plant. **Desalination**, v. 268, p. 204-207, 2011.

SANTOS, B. S. Sistema de tratamento híbrido utilizado na remoção do corante reativo 5g de um efluente têxtil sintético. Dissertação (Tecnologias Ambientais), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2015.

SAQER, A. M.; FARHAT, N. B.; Removal of reactive red 24 dye by clean electrocoagulation process using iron and aluminium electrodes. **Journal of Chemical Engineering & Process Technology**, v. 7, p. 1 – 7, 2016.

SEKI, C. C.; SILVA, D. C.; ARGONDIZO, A.; SILVA, A. P. Utilização de eletrodo de leito fixo no tratamento de efluente têxtil por eletrocoagulação. **XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**. UFSCar, São Carlos – SP, 2017.

SILA, J. F. A.; GRAÇA, N. S.; RIBEIRO, A. M.; RODRIGUES, A. E. Electrocoagulation process for the removal of co-existent fluoride, arsenic and iron from contaminated drinking water. **Separation and purification technology**, v. 197, p. 237-243, 2018.

SINGH, K.; ARORA, S. Removal of synthetic textile dyes from wastewaters: a critical review on present treatment technologies. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 41, p. 807-878, 2011.

SINOTI, A. L. L.; SOUZA, M. A. A. D. Processo eletrolítico no tratamento de esgotos sanitários: estudo da sua aplicabilidade e mecanismos associados. In: 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2005, Campo Grande. **Anais**. Rio de Janeiro: ABES, 2005.

SIRMA, B.; OZLEM, B.; BURCU, P.; GULEN, T.; SUHEYDA, A.; GULIN, E. Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: effect of operative conditions on the organic carbon removal and kinetic study. **Process safety and environmental protection**, v. 129, p. 47-54, 2019.

SIRIRERKRATANA, K.; KEMACHEEVAKUL, P.; CHUANGCHOTE, S. Color removal from wastewater by photocatalytic process using titanium dioxide-coated glass, ceramic tile, and stainless steel sheets. **Journal of Cleaner Production**, v. 215, p. 123-130, 2019.

SHOUKAT, R.; KHAN, S. J.; JAMAL, Y. Hybrid anaerobic-aerobic biological treatment for real textile wastewater. **Journal of Water Process Engineering**, v. 29, p. 100804, 2019.

SU, C.; PUKDEE-ASA, M.; RATANATAMSKUL, C.; LU, M. Effect of operating parameters on decolorization and COD removal of three reactive dyes by Fenton's reagent using fluidized-bed reactor. **Desalination**, v. 278, p. 211–218, 2011.

TAK, B.; TAK, B.; KIM, Y.; PARK, Y.; YOON, Y.; MIN, G. Optimization of color and COD removal from livestock wastewater by electrocoagulation process: Application of Box-Behnken design (BBD). **Journal Of Industrial And Engineering Chemistry**, v. 28, p. 307-315, 2015.

THAKUR, C.; SRIVASTAVA, V. C.; MALL, I. D. Electrochemical treatment of a distillery wastewater: Parametric and residue disposal study. **Chemical Engineering Journal**, v. 148, p. 496-505, 2009.

WANG, C.T.; CHOU, W. L.; KUO, Y. M. Removal of COD from laundry wastewater by eletrocoagulation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 164, p. 81-89, 2009.

VERMA, A. K.; DASH, R. R.; BHUNIA, P. Chemical coagulation and sonolysis for total aromatic amines removal from anaerobically pretreated textile wastewater: a comparative study. **Advances in Environmental Research**, v. 3, p. 293-306, 2011.

VERMA, A. K. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation employing Fe-Al composite electrode. **Journal of Water Process Engineering**, v. 20, p. 168-172, 2017.

VOLKOV, T. V. V.; CHELLI, R.; RIGHINI, C. C. Indigo chromophores and pigments: Structure and dynamics. **Perry Dyes and Pigments**, v.172, p. 107761, 2020.

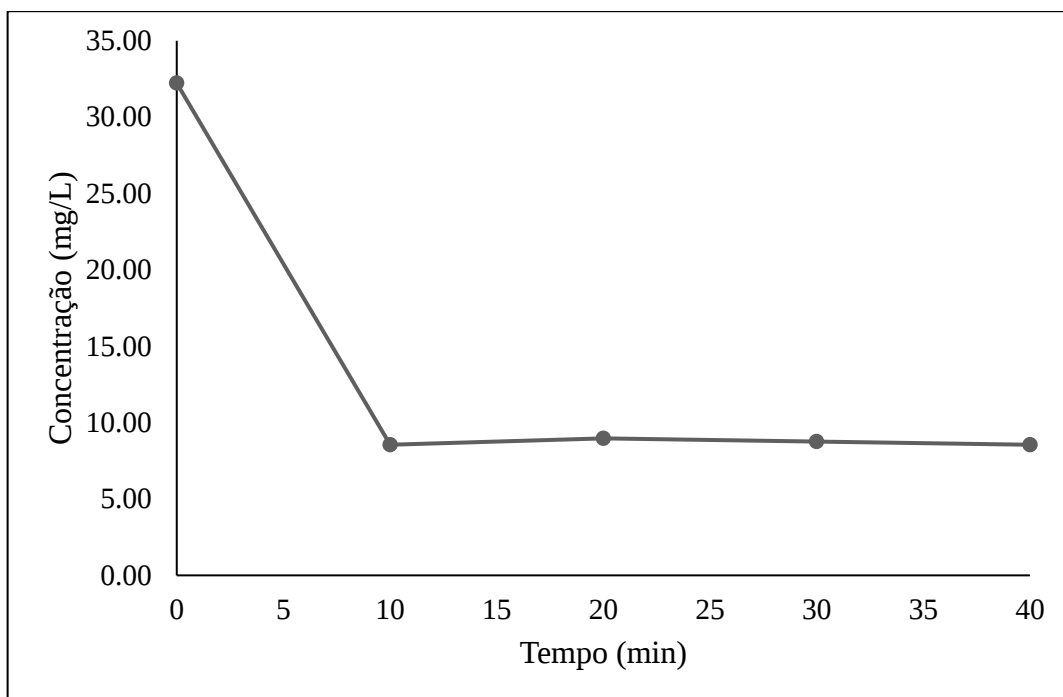
YA, V.; GUILLOU, E. L.; CHEN, Y. M.; CHOO, K. H.; LEE, S. J. Scrap iron packed in a Ti mesh cage as a sacrificial anode for electrochemical Cr(VI) reduction to treat electroplating wastewater. **Journal of the Taiwan of Chemical Engineers**, v. 87, p. 91-97, 2018.

ZAROUAL, Z.; AZZI, M.; SAIB, N.; CHAINET, E. Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in basic textile effluent. **Journal of Hazardous Materials**, 2006.

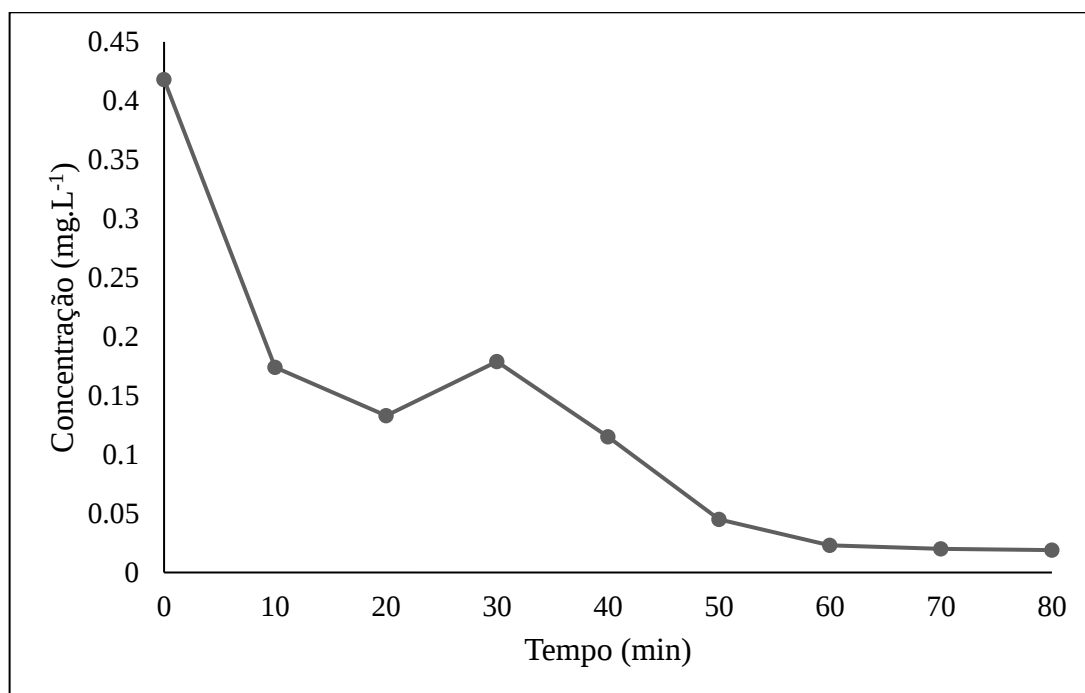
ZAZOU, H.; AFANGA, H.; AKHOUAIRI, S.; OUCHTAK, H.; ADDI, A. A. Treatment of textile industry wastewater by electrocoagulation coupled with electrochemical advanced oxidation process. **Journal of Water Process Engineering**, v. 28, p. 214-221, 2019.

ZODI, S.; POTIER, O.; LAPICQUE, J. P. Treatment of the textile wastewaters by electrocoagulation: effect of operating parameters on the sludge settling characteristics. **Sep. Purif. Technol**, v. 69, p. 29-36, 2009.

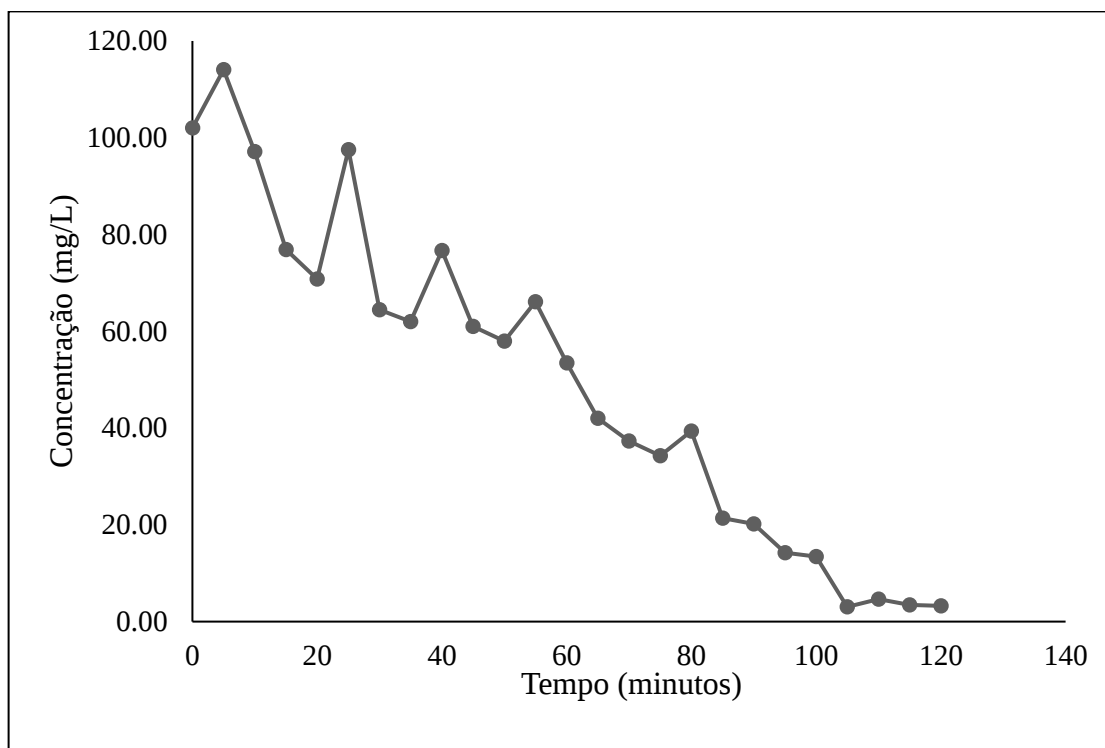
APÊNDICE A – Cinética de eletrofloculação para a remoção da cor em efluente sintético contendo o corante Índigo Blue utilizando eletrodos de escória de ferro.



APÊNDICE B – Cinética de eletrofloculação para a remoção da cor em efluente têxtil utilizando eletrodos de escória de ferro.



APÊNDICE C - Cinética de eletrofloculação para a remoção da cor em efluente sintético contendo o corante Índigo Blue utilizando eletrodos de sucata de ferro.



APÊNDICE D - Cinética de eletrofloculação para a remoção da cor em efluente de Indústria têxtil utilizando eletrodos de sucata de ferro.

