

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

GABRIELA SANTIN

**AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTIL EM ESCALA
LABORATORIAL UTILIZANDO DIFERENTES COMBINAÇÕES COM A
ELETROFLOCULAÇÃO**

CAXIAS DO SUL

2018

GABRIELA SANTIN

**AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTIL EM ESCALA
LABORATORIAL UTILIZANDO DIFERENTES COMBINAÇÕES COM A
ELETROFLOCULAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção da aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II – Engenharia Química, sob a orientação da prof. Dra. Renata Cornelli e coordenação do prof. M.Sc Tomás Augusto Polidoro.

CAXIAS DO SUL

2018

GABRIELA SANTIN

**AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTIL EM ESCALA
LABORATORIAL UTILIZANDO DIFERENTES COMBINAÇÕES COM A
ELETROFLOCULAÇÃO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Química, e aprovado em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Química em 26 de novembro de 2018.

Orientador:

Dra. Renata Cornelli

Banca Examinadora:

Dra. Camila Baldasso

M.Sc Tomás Augusto Polidoro

RESUMO

A urbanização, industrialização e o uso de água doce como recurso natural vital têm contribuído para o crescimento de impactos ambientais negativos. A indústria é um dos setores que mais utiliza água no seu processo, apresenta dificuldade no tratamento do efluente e produção elevada de lodo que não pode ser descartado no meio ambiente. Neste contexto, o processo de eletrofloculação apresenta-se como um método alternativo de tratamento de efluentes industriais, devido à versatilidade e à compatibilidade ambiental. Este estudo consistiu em aplicar a técnica de eletrofloculação, bem como avaliar sua eficiência em um efluente de uma lavanderia industrial têxtil. Os ensaios foram realizados em escala laboratorial, utilizando uma célula eletrolítica, fonte de 5V e eletrodos de Alumínio (Al). Para um volume de 5 L, os ensaios tiveram duração de 10 minutos e a corrente utilizada foi de 4,5 A. Pode-se comprovar a eficiência da eletrofloculação, e também da técnica combinada com filtração e adsorção com carvão ativado, por meio de análise de pH, cor aparente, turbidez, condutividade elétrica, DQO, surfactantes (Substâncias tenso-ativas que reagem ao azul de metileno), sólidos suspensos totais e alumínio total. Como a eletrofloculação não atendeu o parâmetro de alumínio total remanescente, o método deve ser combinado com filtração e carvão ativado, uma vez que o pH está no limite estabelecido, foi efetivo para remoção de cor, apresentando 10 uc, a eficiência para remoção de turbidez foi de 97,17%, 100% para remoção de surfactantes e sólidos suspensos totais, 55,56% para remoção de DQO. O consumo de energia da operação foi de 751,50 W.h.m⁻³. Apesar da eletrofloculação ser pesquisada a anos e apresentar elevada eficiência para tratamento de diversos tipos de efluentes, sua aplicação em escala industrial ainda não é muito utilizada, com isso, deve-se intensificar as pesquisas acerca deste tema.

Palavras chave: Tratamento de efluente têxtil, eletrofloculação, eletrodos de alumínio.

ABSTRACT

Urbanization, industrialization and the use of freshwater as a vital natural resource have contributed to the growth of negative environmental impacts. The industry is one of the sectors that uses the most water in its process and its effluent presents difficulty in the treatment and high production of sludge that can not be discarded in the environment. In this context, the electroflocculation process presents is an alternative method of treating industrial effluents, due to its versatility and environmental compatibility. This study consisted in applying the technique of electroflocculation, as well as evaluating its efficiency in an effluent from an industrial textile laundry. The tests were done on laboratory scale, using an electrolytic cell, 5V source and Aluminum (Al) electrodes. For a volume of 5 L, the tests lasted for 10 minutes and the current used was 4.5 A. The efficiency of electroflocculation, as well as the combined technique with filtration and adsorption with activated carbon, can be verified by means of analysis of pH, apparent color, turbidity, electrical conductivity, COD, surfactants (tensoactive substances that react to methylene blue), total suspended solids and total aluminum. As the electroflocculation did not meet the total remaining aluminum parameter, the method must be combined with filtration and activated carbon, once the pH is at the established limit, it was effective for color removal, presenting 10 uc, turbidity removal efficiency was 97.17%, 100% for removal of surfactants and total suspended solids, 55.56% for COD removal. The energy consumption of the operation was 751.50 W.h.m⁻³. Although electroflocculation has been researched for years and has high efficiency for the treatment of several types of effluents, its application on an industrial scale is still not widely used, with this, research on this topic should be intensified.

Keywords: Treatment of textile effluent, electroflocculation, aluminum electrodes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Cadeia têxtil	16
Figura 2 - Estrutura química dos principais grupos presentes em fibras têxteis naturais e sintéticas	18
Figura 3 – Fluxograma do processo produtivo têxtil e a geração de resíduos típicos de cada processo.....	19
Figura 4 - Processo de tingimento do algodão contendo o grupo sulfatoetilsulfona como centro reativo da molécula.....	22
Figura 5 - Corante Direto (Corante Vermelho Congo) contendo grupos diazos como grupos cromóforos	22
Figura 6 – Estrutura do corante ácido vermelho 14, classificado com corante azóico	23
Figura 7 – Estrutura molecular do corante ácido Violeta	23
Figura 8 – Redução do corante com ditionito de sódio.....	24
Figura 9 - Corante contendo grupo tiosulfato com íon sulfeto e a formação dos corantes com pontes de dissulfeto	24
Figura 10 – Corante solubilizado temporariamente através de hidrólise	25
Figura 11 - Tingimento do corante pré-metalizado (VII) cromo/corante 1:1	25
Figura 12 - Corante Branqueador contendo o grupo triazina.....	26
Figura 13 - Reação de redução do Indigo Blue a sua forma leucoindigo.....	27
Figura 14 – Reação de redução do corante Indigo.....	28
Figura 15 - Interações físico-químicas dentro do reator de eletrofloculação	34
Figura 16 - Processo de adsorção e formação das partículas coloidais que geram os flóculos com as moléculas de corantes.....	35
Figura 17 – Diagrama de solubilidade do hidróxido de alumínio em função do pH...	36
Figura 18 – Diagrama esquemático experimental	39
Figura 19 - Fluxograma das etapas de pré e pós tratamento	39
Figura 20 – Determinação de pH de cada amostra e limite permitido pela legislação vigente	46
Figura 21 – Cor aparente das amostras	47
Figura 22 – Resultado das análises de remoção de turbidez	48
Figura 23 – Resultado da análise de condutividade das amostras	49

Figura 24 – Gráfico de determinação de DQO e limite máximo permitido pela legislação vigente	51
Figura 25 – Gráfico de determinação de surfactantes aniônicos	52
Figura 26 – Gráfico de determinação de SS e o limite permitido pela legislação	53
Figura 27 – Determinação do alumínio total.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Métodos analíticos para quantificar os parâmetros físico-químicos e seus padrões de emissão conforme CONSEMA 355/2017.....	40
Tabela 2 – Padrões de emissão para DQO e SS, conforme as faixas de vazão de acordo com a resolução do CONSEMA 355/2017	41
Tabela 3 – Resultados do pH das amostras.....	44
Tabela 4 - Resultado da cor aparente das amostras	47
Tabela 5 – Eficiência de remoção de turbidez.....	48
Tabela 6 - Resultado da determinação de DQO e eficiência de remoção	50
Tabela 7 – Eficiência da remoção de surfactantes aniônicos	51

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Processos de tratamentos de efluentes.....	29
Quadro 2 – Métodos utilizados na indústria têxtil e suas vantagens e desvantagens.....	30

SUMÁRIO

1 INTRUDUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO GERAL	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 INDÚSTRIA TÊXTIL NO BRASIL	15
2.2 ETAPAS DO PROCESSO PRODUTIVO.....	16
2.3 FIBRAS TÊXTEIS	17
2.3.1 Fibras naturais	17
2.3.2 Fibras Químicas	17
2.4 RESÍDUOS TEXTEIS	19
2.4.1 Águas residuais	20
2.4.1.1 Corantes	20
2.4.1.2 Índigo blue	26
2.4.2 Resíduos sólidos	28
2.4.2.1 Lodo proveniente do tratamento de efluentes	28
2.5 MÉTODOS PARA REMOÇÃO DE POLUENTES UTILIZADOS NA INDÚSTRIA TÊXTIL.....	29
2.5.1 Tratamento biológico	31
2.5.2 Tratamento Físico	31
2.5.3 Tratamento Químico	32
2.5.3.1 Tratamento eletroquímico	32
2.5.3.2 Eletrofloculação	33
2.6 PARÂMETROS DE CONTROLE DO PROCESSO	36
3 MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1 MATERIAIS	38
3.1.1 Coleta das amostras de efluente líquido	38
3.1.2 Procedimento experimental	38
3.2 MÉTODOS	40
3.2.1 Parâmetros físicos químicos avaliados	40
3.2.2 Densidade de corrente	41
3.2.3 Densidade de carga	42
3.2.4 Consumo de energia	42

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1 pH	44
4.2 COR APARENTE	46
4.3 TURBIDEZ	48
4.4 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	49
4.5 DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO	50
4.6 SURFACTANTES	51
4.7 SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS	52
4.8 ALUMÍNIO TOTAL	53
4.9 DENSIDADE DA CORRENTE	55
4.10 DENSIDADE DE CARGA	55
4.11 CONSUMO DE ENERGIA	56
4.12 RESUMO DOS RESULTADOS ENCONTRADOS	56
5 CONCLUSÃO	58
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
REFERENCIAIS	60

1 INTRODUÇÃO

O crescimento urbano, a industrialização e o uso de água doce como recurso natural vital têm contribuído para o crescimento de impactos ambientais negativos, como por exemplo, a poluição de rios e lagos e o desequilíbrio no ecossistema aquático (SILVA, 2007). Sendo que, de acordo com a Organizações das Nações Unidas (ONU) em 2017 dois terços do planeta se encontrava em situação de escassez de recursos hídricos, principalmente pela poluição da água doce superficial e subterrânea e também por condições climáticas.

Visto que os problemas ambientais vêm se tornando mais críticos e constantes devido a estarem ligados diretamente ao crescimento populacional e aumento da atividade industrial, as alterações no solo, ar e água podem ser constatadas. O uso abusivo e irresponsável de água doce, seja para abastecimento humano, uso agrícola ou industrial, tem levado a projeções de escassez em dimensões mundiais. Pode-se destacar também que a contaminação das águas naturais é um dos maiores problemas ambientais, alterando a biodiversidade aquática (SOARES, 2016).

Kunz (2001) enfatiza que devido à escassez deste recurso a economia de água no processo produtivo da indústria vem ocupando relevante papel e gerando muitos estudos. O mesmo autor destaca que os principais setores que utilizam água doce disponível são a agricultura e a indústria, sendo que do consumo da indústria 15% é o setor têxtil que utiliza este recurso, por consequência tem a responsabilidade de minimizar impactos ambientais devido ao volume significativo de efluentes gerados. Os quais quando não tratados corretamente causam contaminação do solo e principalmente da água, devido aos mesmos serem demasiados ou até mesmo irreversíveis.

O Brasil se destaca por estar entre um dos maiores produtores mundiais do setor têxtil e do vestuário. Produtor de algodão, fios, malhas e tecidos, impulsiona o Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, gerando muitos empregos. Além do mais, o tecido com foco em denim, também conhecido como *jeans*, é considerado um dos mais importantes tecidos com base em algodão e o país é o segundo maior produtor de denim e o terceiro maior consumidor mundial (ABIT, 2017). Todavia, a produção têxtil causa diversos impactos ambientais como geração de resíduos sólidos e

efluentes devido ao grande consumo de água, corantes e produtos químicos no seu processo produtivo (PASCHOAL; TREMILIOSI-FILHO, 2005).

As características dos resíduos gerados na indústria têxtil irão depender do processo empregado, das fibras e dos produtos químicos utilizados no processo, tingimento e beneficiamento. O efluente proveniente dessa classe de indústria é considerado o principal poluidor pois apresenta significativa quantidade de carga orgânica, cor e toxicidade, necessitando de volume de água considerável e produtos químicos para seu tratamento (PASCHOAL; TREMILIOSI-FILHO, 2005).

Além disso, os corantes utilizados na indústria têxtil são tóxicos, mutagênicos e carcinogênicos, aproximadamente 10 a 20% de corantes são descartados durante a etapa de lavagem, pois não ocorre a fixação às fibras, tornando o efluente com forte coloração (GUARATINI e ZANONI, 2000). O mesmo autor ainda enfatiza que esses corantes são solúveis em água, apresentam baixa adsorção em sólidos e baixo nível de degradação, caracterizando o efluente com elevada demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e cor acentuada.

Para as águas residuais têxteis, os tratamentos usuais são físicos, utilizando adsorção em carvão ativado, coagulação e precipitação e também tratamentos químicos ou biológicos. Geralmente a utilização desses métodos requer a combinação entre eles para uma otimização da eficiência. Sendo que esses métodos usuais têm elevada produção de lodo, que é solúvel em água, gerando impacto ambiental (ANDRADE, 2003).

Devido à dificuldade de tratamento do efluente têxtil e a produção elevada de lodo que não pode ser descartado no meio ambiente, novas tecnologias em tratamentos vêm sendo estudadas. Dentro deste contexto, a eletrofloculação pode ser uma alternativa devido a sua eficiência e possibilidade de reuso de água (CERQUEIRA, 2006).

Este método de tratamento apresenta diversas vantagens, uma vez que remove partículas coloidais menores, tem baixo custo operacional e energético, disponibilidade facilitada de energia elétrica, versatilidade e facilidade de manutenção e operação, além de gerar menos lodo do que um processo físico-químico.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a utilização do método de eletrofloculação em escala laboratorial no tratamento do efluente de uma indústria têxtil.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) caracterizar o efluente gerado no beneficiamento do jeans;
- b) propor o tratamento do efluente via eletrofloculação;
- c) analisar os parâmetros de pH, cor aparente, turbidez, condutividade elétrica, DQO, surfactantes, sólidos suspensos totais e alumínio total remanescente no efluente tratado;
- d) realizar testes comparativos com tratamentos combinados com a eletrofloculação como alternativa de melhorias dos parâmetros alcançados;
- e) comparar os tratamentos propostos com o tratamento físico químico usualmente utilizado na indústria têxtil;
- f) comparar o efluente gerado e a eficiência dos tratamentos propostos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse capítulo, fez-se uma abordagem da literatura associado a problemática ambiental causada pelo efluente proveniente da indústria têxtil. Também foram abordados os parâmetros relacionados a caracterização e tratamento do efluente e a tecnologia empregada no tratamento envolvido.

2.1 INDÚSTRIA TÊXTIL NO BRASIL

Segundo Gorini (2000), a produção têxtil no Brasil cresceu entre os anos de 1990 e 1999, tendo uma taxa de crescimento de 10% na produção de fios e de 30% nas malhas, tanto que no ano de 1997 o país estava entre os 10 maiores produtores mundiais de tecidos, malhas e fios, particularmente o algodão. O vestuário teve uma taxa de crescimento acumulado de 84% nesse período, conseqüentemente aumentando o consumo de confeccionados.

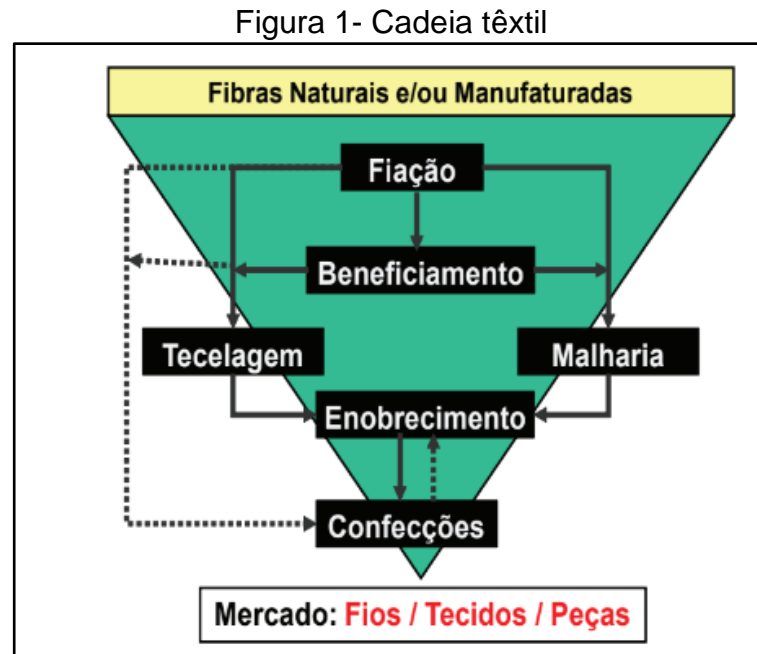
Além disso, Gorini (2000) acrescenta que a produção de têxteis exerce grande influência na economia brasileira, fazendo com que esteja entre os grandes produtores mundiais. Amorin (2011) completa relatando que desde o ano de 2011 o Brasil vem ocupando a 8ª posição entre os maiores produtores têxteis mundiais, entretanto no cenário internacional, sua participação é pequena, estando em 26º lugar em exportação de têxteis, sendo que a China é o país que mais exporta tecidos e confecções.

Segunda a Associação Brasileira da indústria têxtil e de confecção (ABIT), o país se posiciona como o 5º maior produtor têxtil do mundo, com uma produção equivalente a 2,6% da mundial, e tem cerca de 32 mil empresas atuando no ramo, o país é o 2º maior produtor de denim do mundo e o 3º maior consumidor autossuficiente na produção de algodão, com produção de 9,4 bilhões peças por ano, sendo referência mundial deste setor (ABIT, 2017).

Silva (2007) afirma que na indústria têxtil voltada para o denim, Estados Unidos, Japão e Europa estão entre os principais consumidores, sendo que o consumo mundial desse tecido está acima de 3 bilhões de metros por ano. O Brasil é um dos principais produtores de denim do mundo, com uma capacidade produtiva em torno de 600 milhões de metros por ano (ABIT, 2017).

2.2 ETAPAS DO PROCESSO PRODUTIVO

Bastian e Rocco (2009) definem as etapas do processo produtivo têxtil a partir da divisão das fibras têxteis, fiação, tecelagem, beneficiamento e enobrecimento dos fios e tecidos e confecções. A Figura 1 apresenta a divisão da cadeia têxtil.



Ainda, segundo Bastian e Rocco (2009), as etapas podem ser dispostas da seguinte forma:

- a) fiação: a partir das fibras têxteis provenientes da tecelagem ocorre a obtenção do fio;
- b) beneficiamento: preparação dos fios para o uso final, posteriormente acontece o tingimento, engomagem, retorção e tratamentos especiais;
- c) tecelagem: etapa em que os tecidos são elaborados a partir dos fios têxteis;
- d) enobrecimento: neste processo ocorre a preparação, tingimento, estamparia e acabamentos variados no tecido;
- e) confecção: parte final da cadeia têxtil, o produto é confeccionado e finalizado com acabamentos e aviamentos;
- f) beneficiamento do produto final: dentro do processo de fabricação de produtos em jeans, é necessário lavagem ou tingimento da peça pronta, após

o tingimento, o tecido passa por diversos processos para retirar excesso de corante ou que ficou mal fixado. Algumas lavagens consistem em retirar o corante que está bem fixado com o intuito de criar diferentes tonalidades e detalhes na peça.

2.3 FIBRAS TÊXTEIS

Bastian e Rocco (2009) apontam que as fibras têxteis são as principais matérias primas do setor e podem ser divididas em dois grupos, as fibras naturais e as manufaturadas, também chamadas de fibras químicas. O mesmo autor ainda afirma que as fibras naturais podem ser de origem vegetal, animal ou mineral (fibra de basalto e amianto), já as manufaturadas consistem na transformação química de matéria prima natural.

2.3.1 Fibras naturais

Oliveira (1997) destaca as principais fibras têxteis naturais:

- a) algodão: não apresenta restrição as condições de solo e clima, devido a estes fatos é produzida em larga escala mundialmente. É a fibra mais utilizada na confecção no Brasil;
- b) seda: fibra de elevado valor agregado, deriva-se do bicho-da-seda;
- c) lã: fibra utilizada principalmente em artigos de inverno, sendo a segunda fibra mais utilizada no Brasil.

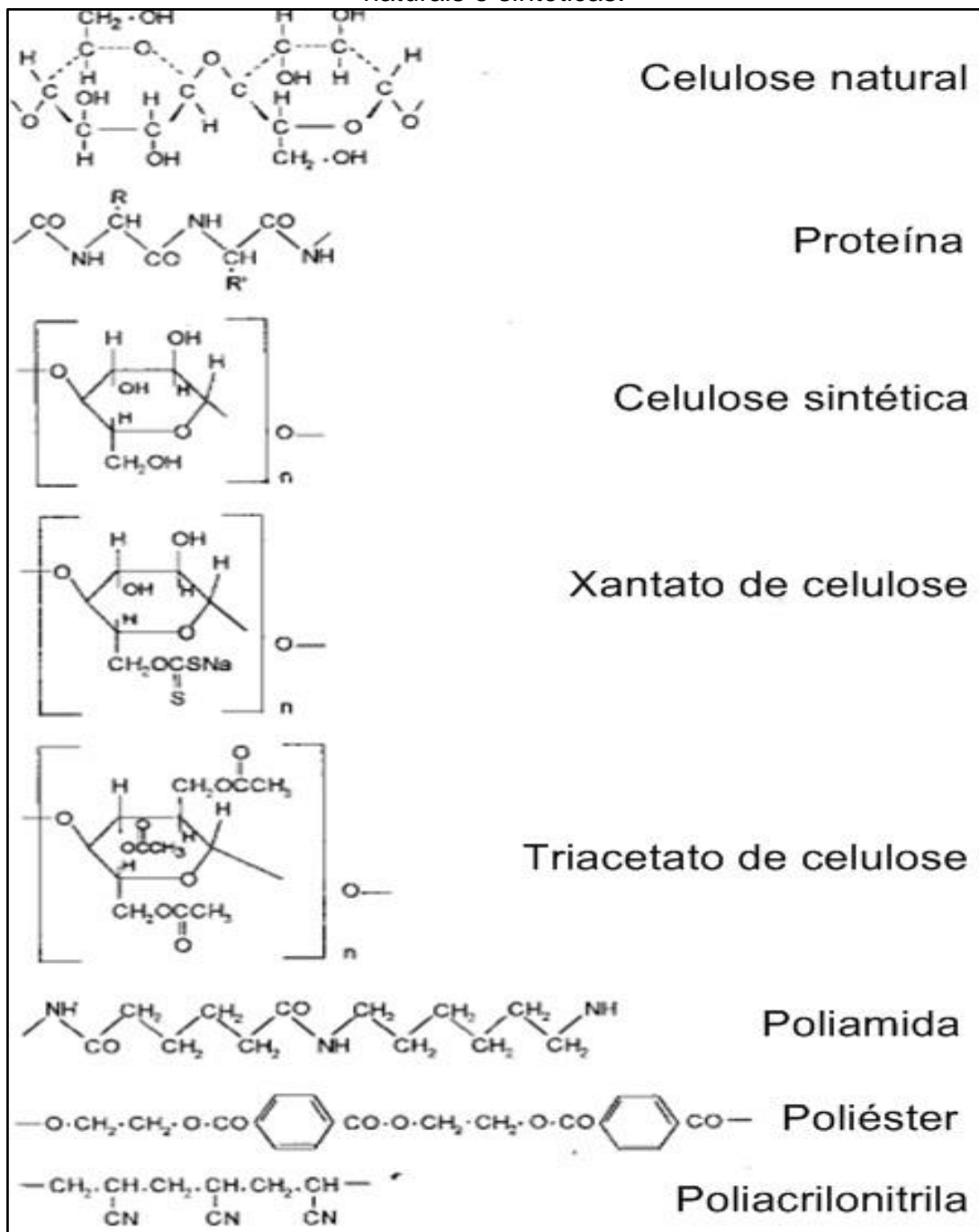
2.3.2 Fibras Químicas

Gorini e Siqueira (1997) afirmam que as fibras químicas artificiais são produzidas a partir da celulose proveniente do algodão ou da polpa da madeira, alguns exemplos de fibras artificiais são a viscose e raiom acetato. A adição dessas fibras ao tecido ocasiona o melhoramento do caimento, cor, textura e brilho. Para a produção de fibras químicas é necessário a utilização de soda cáustica, o que torna o processo altamente poluidor.

Com o surgimento das fibras químicas sintéticas, as artificiais tiveram sua produção estagnada. As fibras sintéticas, que podem ser vistas na Figura 2, são

obtidas nos primeiros estágios da petroquímica, são derivadas de polímeros com maior grau de polimerização, obtidas por síntese de monômeros derivados do petróleo. O processo de obtenção destas fibras requer sofisticação tecnológica, pois necessita de microeletrônica, mecânica de precisão e climatização adequada. As principais fibras dessa classe são o poliéster, acrílico, elastano e o polipropileno (OLIVEIRA, 1997).

Figura 2 - Estrutura química dos principais grupos presentes em fibras têxteis naturais e sintéticas.



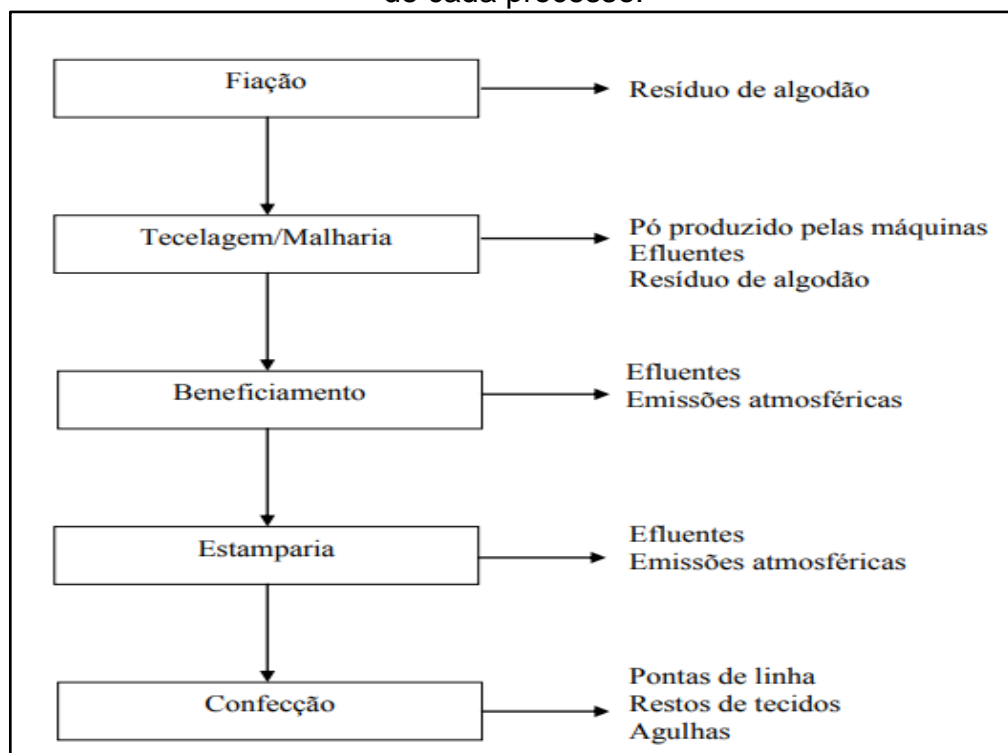
Fonte: (Guaratini; Zanoni, 2000)

2.4 RESÍDUOS TÊXTEIS

As características dos resíduos gerados nas indústrias têxteis dependem do tipo de fibras, produtos químicos e do processo industrial utilizados, sendo que os principais problemas associados a esses resíduos estão relacionados a quantidade de carga orgânica, cor, toxicidade e salinidade (HARRELKAS et al., 2009). Essa classe de indústria utiliza corantes e produtos químicos ao longo da cadeia produtiva e também elevada quantidade de água, tornando o processo têxtil gerador de uma significativa quantidade de resíduos (PASCHOAL; TREMILIOSI-FILHO, 2005).

Harrelkas et al. (2009) enfatizam que a indústria têxtil pode poluir o ar devido a vapores químicos e gases de combustão e geram grande quantidade de resíduos sólidos, entretanto a maior fonte de poluição deste tipo de indústria é o efluente gerado, visto que a água é uma das principais matérias primas do processo produtivo associado à larga utilização de corantes, do qual 50% dos corantes utilizados não são fixados a fibra de tecido. Ao longo do processo têxtil, cada operação gera um tipo de resíduo, como restos de fios, agulhas e tecidos, como pode ser visto na Figura 3, os quais devem ser tratados e destinados corretamente (AVELAR, 2012).

Figura 3 – Fluxograma do processo produtivo têxtil e a geração de resíduos típicos de cada processo.



Fonte: Avelar (2012)

2.4.1 Águas residuais

Na indústria têxtil a maior parte da utilização de água está na etapa do beneficiamento de seus tecidos e fios, representando 90% do consumo da indústria, o consumo de água, dependendo da indústria, pode chegar a 3000 m³ por dia e gera fluxos de efluentes complexos e com diversos tipos de contaminantes (KARCI, 2014). O mesmo autor destaca que as características das águas residuais das operações de processamento têxtil estão relacionadas com a natureza dos vários processos industriais empregados pela indústria e os produtos químicos associados a estas operações.

Ledakowicz; Solecka e Zylla (2001) apontam que a indústria têxtil gera rejeitos contendo corantes, sendo tóxicos e resistentes a diversos métodos de tratamentos. Outro aspecto levantado pelos mesmos autores é que as águas residuais têxteis não são biodegradáveis, tendo um alto potencial poluidor de rios, devido a esse fato não podem ser completamente removidos por tratamentos biológicos, portanto é necessário avaliar um método físico ou químico eficaz para remover cor e compostos tóxicos do efluente têxtil.

2.4.1.1 Corantes

O tingimento é um dos processos mais importantes na produção têxtil, além da padronagem, fornece a cor específica para cada produto, fixação perdurável e diversidade no beneficiamento. Para garantir tais propriedades os corantes devem apresentar afinidade com a fibra, uniformidade e resistência ao desbotamento. Em virtude de tal demanda, atualmente pode-se encontrar mais de 2000 tipos de corantes utilizados na indústria têxtil (GUARATINI; ZANONI, 2000).

Do mesmo modo, Peixoto et. al (2013) salientam que em soma ao efeito visual e em termos de impacto de demanda química de oxigênio (DQO) os corantes usados no emprego têxtil são tóxicos, mutagênicos e carcinogênicos. Ainda afirma que é estimado que a produção de corantes no mundo é em torno de 800.000 toneladas por ano e que aproximadamente 15% desses corantes são descartados no meio ambiente através dos efluentes.

Os corantes são solúveis em água, devido a moléculas poliaromáticas, sua adsorção em sólidos é relativamente baixa e apresenta também baixa

degradabilidade, devido a esses fatos são os compostos presentes no efluente têxtil que mais geram problemas ambientais, que são caracterizados por volumes de demanda química de oxigênio, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), cor e pH (PEIXOTO et al. 2013).

Guaratini e Zanoni (2000) apontam que a fixação das moléculas dos corantes às fibras é feita em solução aquosa e podem envolver quatro tipos de ligações químicas, que serão descritas a seguir:

- a) interação iônica: ocorre a interação entre os centros positivos dos grupos amino e carboxilato presentes na fibra e a carga iônica da molécula do corante;
- b) interação de Van der Waals: tingimentos onde a interação ocorre na aproximação máxima entre os orbitais π do corante e da molécula da fibra por afinidade;
- c) interação de Hidrogênio: a fixação é proveniente de ligações entre os átomos de hidrogênio covalente ligados no corante e os elétrons livres presentes no átomo da fibra;
- d) interação Covalente: a molécula do corante que contém um grupo eletrofílico se liga aos resíduos nucleofílicos da fibra, formando uma ligação covalente e ocorrendo a fixação do corante.

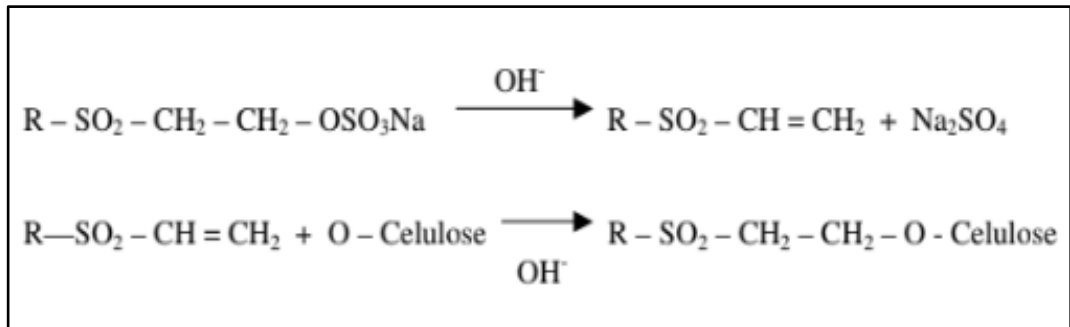
E dois grupos são responsáveis pelas características essenciais dos corantes, o grupo cromóforo e o grupo auxocromo. Os cromóforos são responsáveis pela cor e são a parte não saturada da molécula, já os auxocromo doam e recebem os elétrons e são responsáveis pela fixação da cor nas fibras do tecido, esses dois grupos são ligados entre si por um sistema conjugado (SOARES, 2016).

Além disso os corantes são classificados pela sua estrutura conforme definido por Twardokus (2004):

- a) reativos: corantes que apresentam um grupo eletrofílico que forma ligação covalente com a hidroxila presente nas fibras, com grupos amino, hidroxilas e tióis das fibras protéicas e também com o grupo amino das poliamidas. Os principais grupos desse corante apresentam a função azo e antraquinona como grupos cromóforos e os grupos clorotriazinila e sulfatoetilsulfonila como grupos reativos. A reação química ocorre através da substituição do grupo nucleofílico pela hidroxila da celulose. Apresenta

solubilidade em água e considerável estabilidade na cor do tecido tingido. Um exemplo desse tipo de interação pode ser observado na Figura 4;

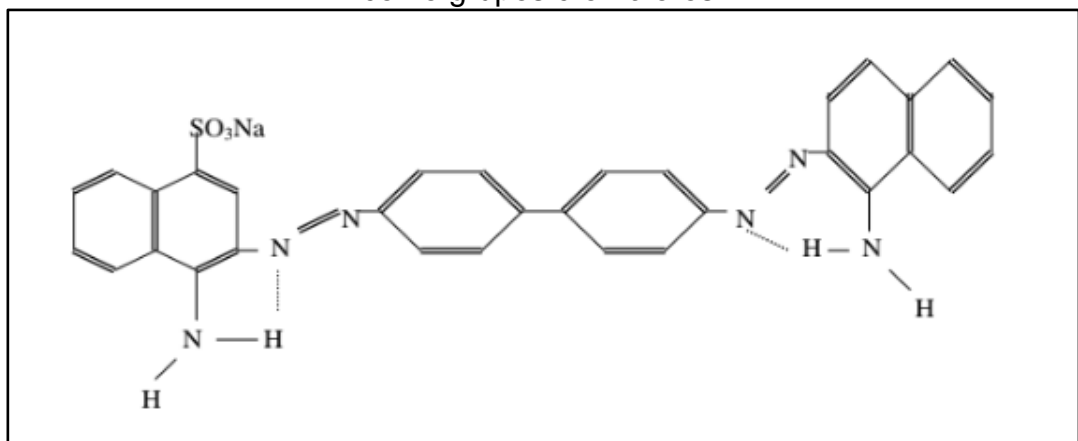
Figura 4 - Processo de tingimento do algodão contendo o grupo sulfatoetilsulfona como centro reativo da molécula.



Fonte: Guaratini e Zanoni (2000)

b) corantes diretos: sua principal característica é a solubilização em água, atribuindo cor às fibras de celulose como a viscose e o algodão, por interação de Van de Waals. Com o uso de eletrólitos, sua afinidade aumenta, aumentando a adsorção do corante sobre a fibra. O principal benefício no uso desse corante é a diminuição da concentração do mesmo no efluente devido à exaustão na aplicação. O principal grupo desse tipo de corante é o grupo azo, um exemplo da estrutura do corante direto é apresentado na Figura 5;

Figura 5 - Corante Direto (Corante Vermelho Congo) contendo grupos diazos como grupos cromóforos.

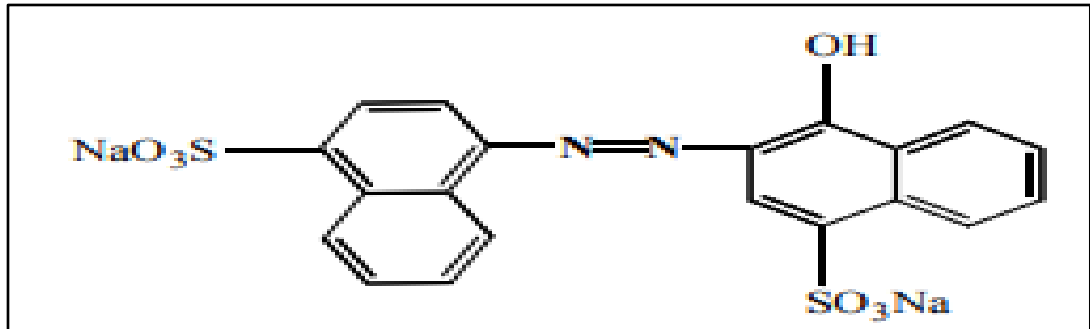


Fonte: Guaratini e Zanoni (2000)

c) corantes azoicos: insolúveis em água e coloridos, esse tipo de composto é sintetizado sobre a fibra no tingimento. Precisa ser adicionado um composto solúvel em água na fibra, chamado de agente de acoplamento, aumentando

a afinidade com a celulose, também é preciso adicionar um sal de diazônio que provocará uma reação com esse agente já fixado na fibra, produzindo o corante insolúvel em água. A estrutura dessa classe de corantes está exemplificada na Figura 6;

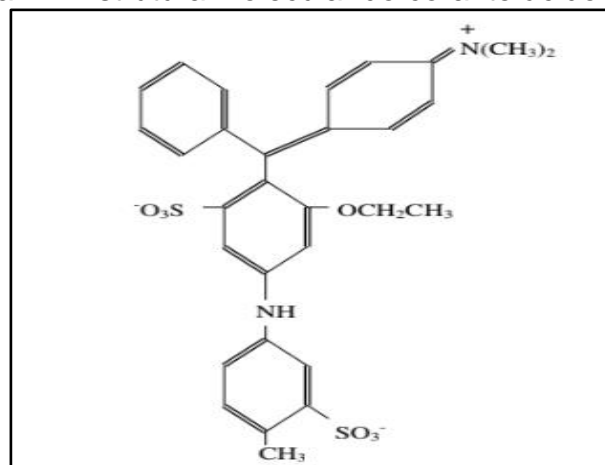
Figura 6 – Estrutura do corante ácido vermelho 14, classificado com corante azóico.



Fonte: Daneshvar et al. (2004)

d) corantes ácidos: grupo de corantes aniônicos, possuem um ou três grupos sulfônicos, é um corante solúvel em água e é muito utilizado no tingimento de seda, lã e fibras de poliamida sintética. O corante precisa ser neutralizado para se ligar à fibra por troca iônica pelo par de elétrons livres do grupo amino e o carboxilato das fibras proteicas. Apresenta uma ampla faixa de coloração e fixação permanente devido a sua estrutura química ser baseada em compostos azo, antraquinona, triarilmetano, azina, xanteno, ketonimina, nitro e nitroso. A estrutura do corante ácido está apresentada na Figura 7;

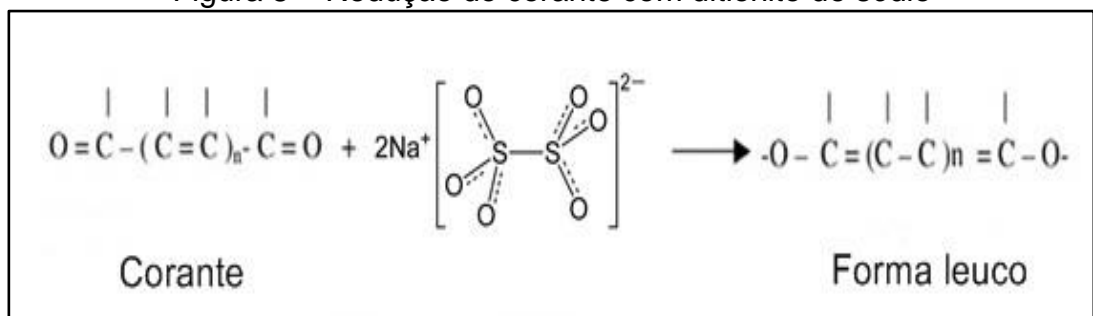
Figura 7 – Estrutura molecular do corante ácido Violeta



Fonte: Guaratini e Zanoni (2000)

e) corantes a cuba: Classe de corantes em que os índigos estão presentes, são aplicados insolúveis em água, sendo reduzidos através de uma solução alcalina chamada ditionito de sódio, tornando-o solúvel, conforme apresentado na Figura 8. Devido as suas excelentes propriedades de fixação são usualmente utilizados em tintura de algodão. Uma desvantagem do seu uso é o custo elevado e causa problemas ecológicos devido a produção de hidrossulfito;

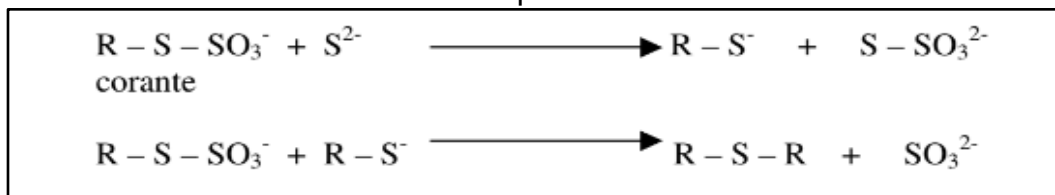
Figura 8 – Redução do corante com ditionito de sódio



Fonte: Guaratini e Zanoni (2000)

f) corantes de enxofre: Se caracterizam por compostos macromoleculares que são insolúveis em água, que pode ser resolvido por um banho de ditionito de sódio conferindo forma solúvel, são reoxidados sobre a fibra após o contato com o ar. Composto utilizado no tingimento de fibras celulósicas, é responsável por conferir cores como preto, verde, azul marinho e marrom, com boa fixação, porém geram resíduos altamente tóxicos. Na Figura 9, é apresentado um exemplo da reação que ocorre nessa classe de corantes;

Figura 9 - Corante contendo grupo tiosulfato com íon sulfeto e a formação dos corantes com pontes de dissulfeto.

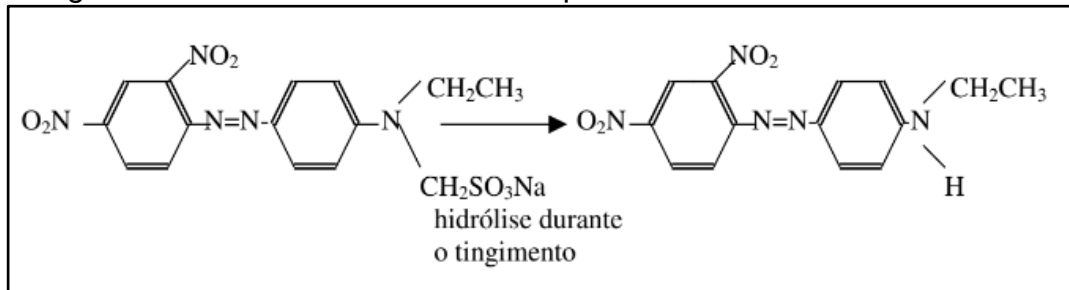


Fonte: Guaratini e Zanoni (2000)

g) corantes dispersos: Insolúveis em água, em vista disso, são aplicados em fibras por suspensão através da hidrólise, onde o corante é precipitado sobre o acetato de celulose. O processo de tingimento é feito na presença de

agentes dispersantes com cadeias longas, estabilizando a suspensão do corante, tornando o contato do corante com a fibra mais fácil. Conforme a Figura 10, pode ser observado a solubilização temporária do corante solubilizado após hidrólise;

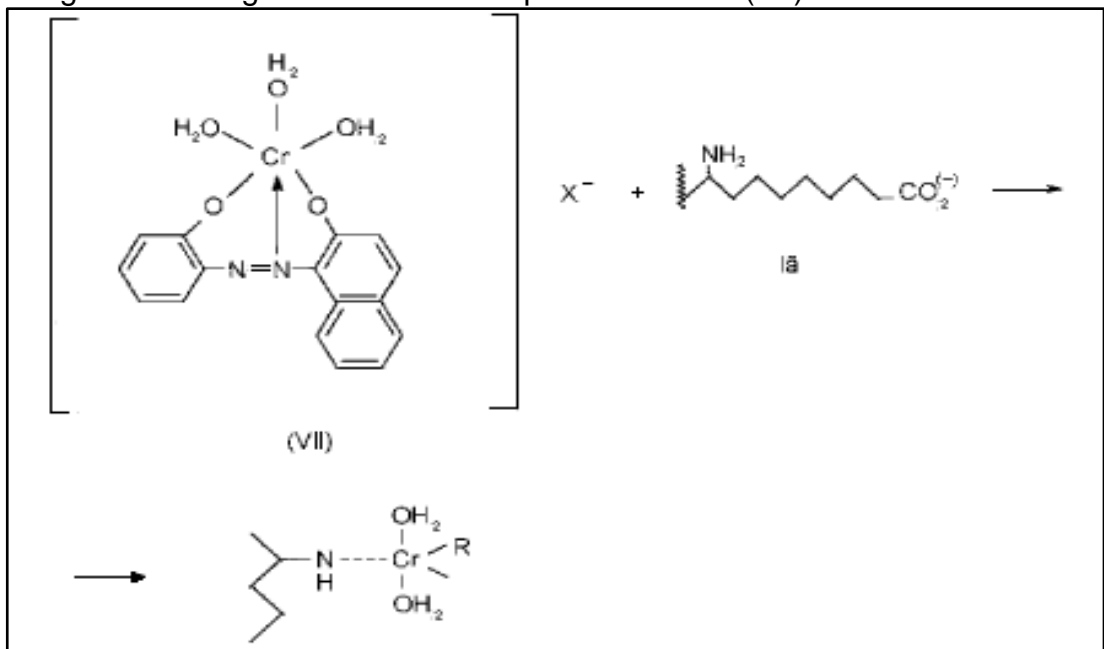
Figura 10 – Corante solubilizado temporariamente através de hidrólise



Fonte: Guaratini e Zanoni (2000)

h) corantes pré-metalizados: Apresentam na posição ortho em relação ao cromóforo azo um grupo hidroxila ou carboxila, formando complexos de íons metálicos. Na tinturaria, ocorre a interação entre o metal e os agrupamentos funcionais que contêm pares de elétrons livres. Devido ao conteúdo de metal cromo no efluente, essa classe de corante é altamente poluidora, todavia é utilizado para tingir fibras proteicas e de poliamida. A Figura 11 demonstra um exemplo de tingimento da lã com o corante pré-metalizado.

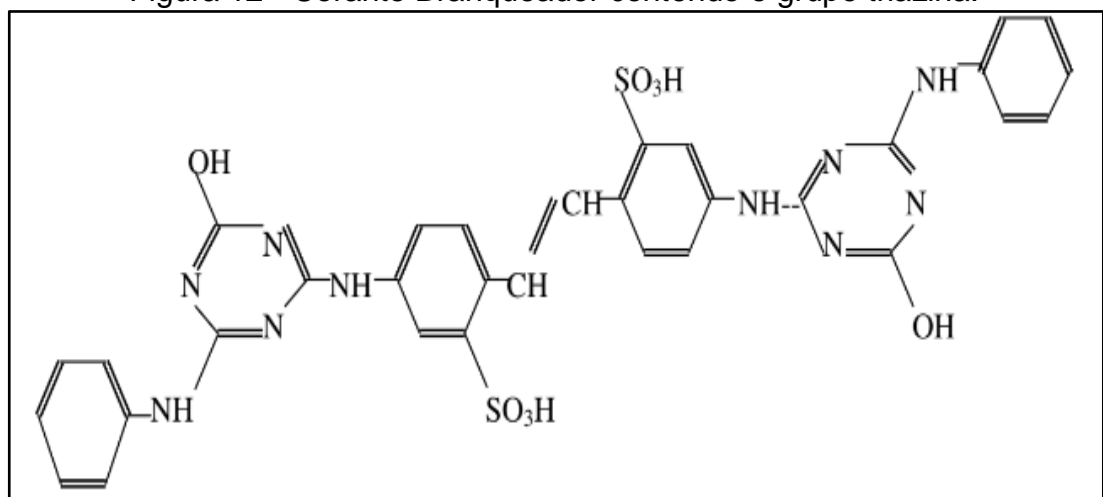
Figura 11 - Tingimento do corante pré-metalizado (VII) cromo/corante 1:1



Fonte: Guaratini e Zanoni (2000)

i) corantes branqueadores: Quando as fibras têxteis estão no seu estado bruto, apresentam uma cor amarelada porque absorvem luz na faixa de baixo comprimento de onda. Comercialmente, as fibras precisam ser brancas, para a diminuição da tonalidade pode ser oxidado a fibra com alvejantes químicos na lavanderia ou pode-se utilizar corantes brancos. Estes corantes apresentam grupos azometino ou etilênicos aliados a sistemas benzênicos, carboxílicos, pirênicos, naftalênicos e anéis aromáticos, que provocam reflexão por fluorescência quando excitados por luz ultravioleta. A estrutura do corante branqueador pode ser analisada na Figura 12.

Figura 12 - Corante Branqueador contendo o grupo triazina.



Fonte: Guaratini e Zanoni (2000)

2.4.1.2 Índigo blue

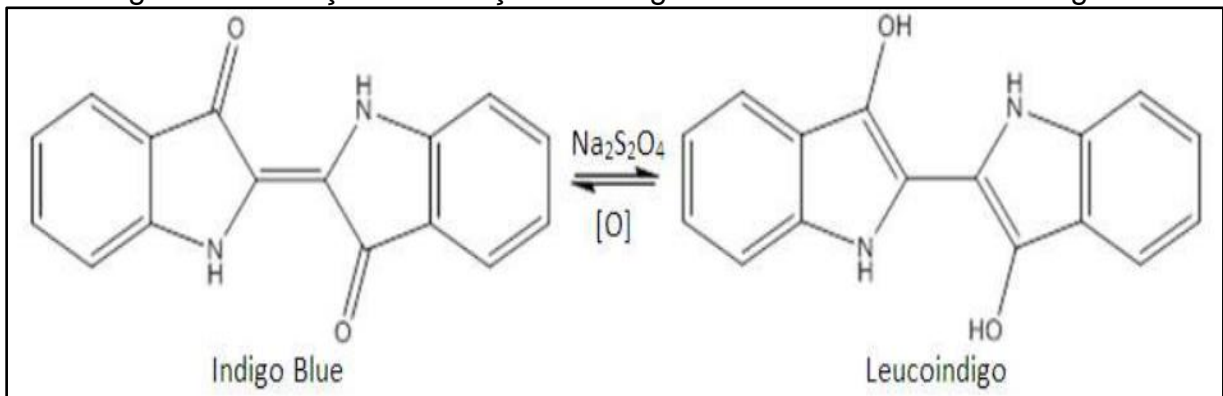
O nome índigo originou-se de uma planta indiana chamada “*indigus*”, que em sua raiz continha um pigmento azul, que na época era usado como base para tingimentos nas tribos (SILVA, 2007). Esse tipo de corante se define pelo tom de azul e também é o nome dado aos tecidos utilizados para confecção de peças em jeans. Em 1880, devido ao uso em larga escala do índigo, Karl Heumann descobriu uma rota sintética para sua produção. O mesmo autor afirma que a síntese era baseada na fusão cáustica da N-fenil-glicina, que podia ser obtida pela reação de ácido cloro acético com a anilina.

Silva (2007) explica que o índigo é um composto azul escuro e a estrutura química corresponde à fórmula $C_{16}H_{10}N_2O_2$, tem ponto de fusão em 390°C - 392°C ,

insolúvel na água, no álcool, ou no éter, mas solúvel no clorofórmio, no nitrobenzeno, ou no ácido sulfúrico concentrado. O corante é reduzido e aplicado as fibras do algodão por várias etapas de redução e oxidação. Além do algodão, o índigo pode ser utilizado para tingimento de outras fibras como lã, seda e fibras sintéticas (BAIG, 2012).

Albuquerque et al. (2013) definem que o índigo é classificado como corante a cuba, a característica química deste corante é a presença do grupo cetônico (C=O), tornando-o insolúvel em água. Mas, na presença de ditionito de sódio em solução alcalina, o corante é convertido em sua forma reduzida (C-OH), um leucoíndigo, tornando-se solúvel em água e exibindo afinidade química com a fibra de celulose, a reação de redução do corante Índigo Blue quando apresentado na forma leucoíndigo está exemplificada na Figura 13.

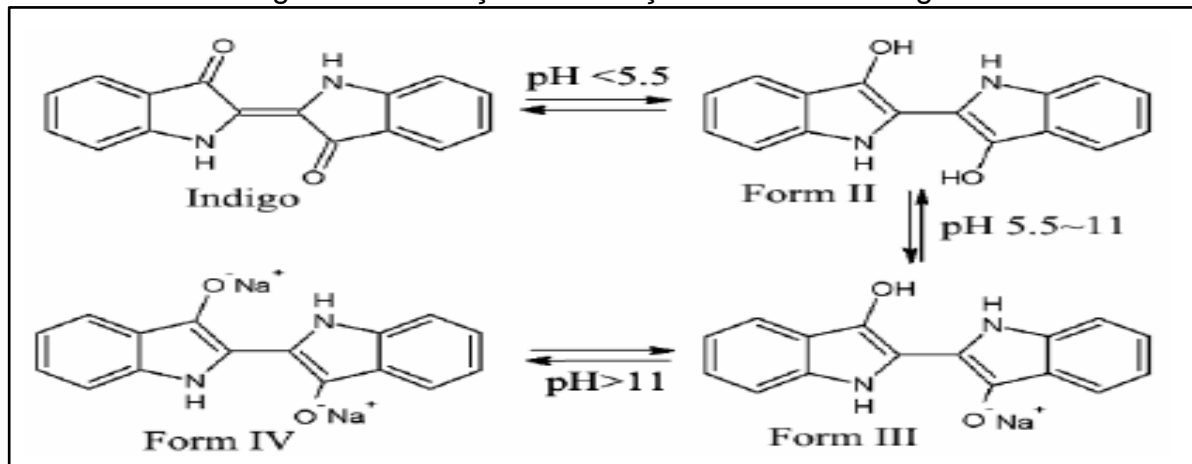
Figura 13 - Reação de redução do Índigo Blue a sua forma leucoíndigo.



Fonte: Meksi; Kechida e Mhenni (2007)

A reação de redução se dá pela troca de dois elétrons, após a reação, o tecido é imerso na solução contendo o corante reduzido, em seguida é exposto ao ar para oxidar, voltando a sua forma insolúvel, esse processo é repetido até que a cor esperada seja alcançada (MEKSI; KECHIDA E MHENNI, 2007). O mesmo autor ainda afirma que o processo de redução gera problemas relacionado à água residual, pois produzem enxofre como subprodutos, elevando o pH do efluente, conforme a Figura 14. O corante apresenta grupos carbonila, conferindo estabilidade de ressonância, tornando o processo de redução complexo.

Figura 14 – Reação de redução do corante Indigo.



Fonte: Baig (2012)

2.4.2 Resíduos sólidos

O processo produtivo têxtil gera resíduos sólidos provenientes de diversos processos, desde restos de algodão até restos de fios e tecido, podendo variar em quantidade e característica (QUEIROZ et al., 2016). O destino dessa classe de resíduos deverá ser realizado conforme a classificação do resíduo estabelecida pela norma NBR 10.004, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004). Nesse grupo deve ser incluso o lodo gerado e os resíduos remanescentes, como material dos equipamentos de controle de emissão atmosférica, cinzas oriundas das caldeiras, resíduos de embalagens, resíduos de manutenção (resto de óleo, agulhas, lâmpadas) e resíduos sanitários e administrativos (FEAM; FIEMG, 2014).

2.4.2.1 Lodo proveniente do tratamento de efluentes

Como o efluente líquido é abundante, a geração de lodo também é elevada, proveniente das estações de tratamento de efluentes (ETE) e tendo impacto ambiental significativo. Classificado como resíduo sólido não perigoso e não inerte (Classe IIA – segundo a NBR 1004), apesar de que o lodo originário da ETE não possui características definidas, devido aos processos que envolvem a geração desses efluentes apresentarem grande variedade de matéria prima e processos (FEAM; FIEMG, 2014).

Segundo Herek et al. (2005) o lodo gerado no processo de lavanderia é classificado de acordo com a norma brasileira NBR 10.004 (ABNT, 2004), essa

classificação se deve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e seus constituintes, sendo necessário ter uma disposição correta devido à sua composição conter corantes do processo de tingimento e pode conter soda, polímeros, sulfato de alumínio e outros produtos utilizados no tratamento do efluente. O lodo não pode ser descartado no ambiente pois é solúvel em água podendo poluir rios e solo.

2.5 MÉTODOS PARA REMOÇÃO DE POLUENTES UTILIZADOS NA INDÚSTRIA TÊXTIL

Existem diversos métodos para remover poluentes do efluente, esses métodos são divididos em cinco categorias: Tratamentos preliminares, primários, secundários, terciários e avançados, cada qual com suas características, vantagens e desvantagens. O Quadro 1 resume os diferentes métodos existentes para cada categoria.

Quadro 1 – Processos de tratamentos de efluentes

Tratamento	Processo	Operação Unitária
Preliminar	Químico	Precipitação Oxidação/Redução
Primário	Físico	Equalização Gradeamento Clarificação Sedimentação Flotação
	Químico	Neutralização Coagulação Precipitação
Secundário	Biológico	Lodos ativados Lagoas de esterilização Filtros biológicos
Terciário	Químico	Coagulação Precipitação Ozonização
	Físico	Clarificação (carvão ativo) Ultrafiltração
Avançado	Físico	Osiose inversa Evaporação

Fonte: Adaptado de Andrade, 2003.

Apesar de a indústria têxtil usualmente utilizar os processos de tratamento fundamentados na operação de sistemas físico-químicos de precipitação-coagulação,

seguidos de tratamento biológico via sistema de lodos ativados, diversos avanços tecnológicos vêm sendo empregados para a remoção de corantes. O Quadro 2 aponta as vantagens e desvantagens dos métodos de remoção de corantes que podem ser utilizados na indústria têxtil.

Quadro 2 – Métodos utilizados na indústria têxtil e suas vantagens e desvantagens

Método	Vantagem	Desvantagem
Reagente Fenton ^{1,2}	Efetiva descoloração de corantes	Geração de lodo
	Aplicado no estado gasoso, não alterando volume	Aumento da toxicidade de alguns intermediários de reação; Tempo de meia-vida curto (20 min)
Fotoquímico ⁴	Não há produção de lodo	Necessita tratamento biológico prévio; Formação de produtos
Carvão ativado ⁵	Boa remoção de uma ampla variedade de corantes	Expansivo
Turfa ⁵	Bom adsorvente devido à estrutura molecular	Baixas áreas de superfície de adsorção quando comparado a outros métodos
Lascas de madeira ⁵	Boa capacidade de sorção de corantes ácidos	Requerem longos tempos de retenção
Filtração / Membrana ⁶	Remove todos os tipos de corantes	Produção de lodo concentrado
Troca iônica ⁶	Regeneração: não perde adsorvente	Produção de lodo concentrado; Processo lento
Irradiação ⁷	Parâmetros físico-químicos e os corantes em 5 minutos de reação	Utilização de O ₂ dissolvido

Fonte: Adaptado de ¹ OLIVEIRA; LEÃO (2009); ² (MARTINS et al., 2011); ³ (KUNZ et al., 2001); ⁴ (HASSEMER, 2006); ⁵ (JODICKE; FISCHER; HUNGERBUHLER, 2001); ⁶ GUARATINI; ZANONI (2000); ⁷ (MANENTI et al., 2010)

2.5.1 Tratamento biológico

Método mais econômico quando comparado com outros processos, alguns exemplos desse tipo de tratamento são os métodos de biodegradação, como, descolorização por fungos, algas ou bactérias, degradação microbiológica, adsorção por biomassa microbiológica e sistemas de biorremediação, devido a capacidade de alguns microrganismos tem de degradar diferentes poluentes (CRINI, 2005). O

mesmo autor ainda afirma que os tratamentos biológicos empregam a oxidação através de bactérias em condições aeróbias ou anaeróbias. A principal desvantagem desse tipo de tratamento é que suas aplicações são restritas, precisam de grande extensão área e apresenta sensibilidade a toxicidade de produtos químicos.

De acordo com Pizato et al. (2017), utilizando um tratamento biológico para o efluente têxtil, através do fungo *Lasiodiplodia theobromae*, os valores de fenóis totais, DQO, DBO e sólidos sedimentáveis apresentaram-se em desacordo com os padrões de lançamento em corpos hídricos estipulados pela legislação brasileira, resolução 355/2017 do CONSEMA. Sendo efetivo apenas para a remoção de cor do efluente, apresentando eficiência de 91,2%.

2.5.2 Tratamento Físico

Immich (2006) aponta que os tratamentos físicos visam a eliminação do corante através da retenção do mesmo em algum meio adsorvente ou filtrante. São largamente utilizados para remoção de cor do efluente, alguns métodos desse tipo são: filtração com membrana (nanofiltração, osmose reversa, eletrodialise), troca iônica e diferentes técnicas de adsorção. A maior desvantagem de aplicar o método de membranas é o elevado custo de instalação e custo de reposição de membranas, visto que é necessário fazer periodicamente, e a desvantagem da troca iônica é a baixa eficiência do processo para determinados corantes e a geração de efluentes da regeneração das resinas.

Ströher et al. (2012) utilizaram o método de ultrafiltração com membrana cerâmica ($\text{TiO}_2/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) Shumacher GmbH-Ti 01070, no efluente de uma empresa têxtil. Houve uma diminuição do fluxo de permeado com o tempo, devido à ação do fouling, apesar disso o processo obteve uma redução de 80,10% para DBO e 73,97% para DQO. Obteve-se redução de 65,30% na quantidade de sólidos totais, já para os parâmetros cor e turbidez houve redução de 70,94% e 92,87%, respectivamente, embora a redução dos parâmetros estudados foram significativas, o efluente tratado não atende às normas para lançamento em corpos receptores, de acordo com a resolução 355/2017 do CONSEMA.

2.5.3 Tratamento Químico

Os tratamentos químicos baseiam-se na conversão do corante com uma substância, o qual se torne ambientalmente menos prejudicial. Dentro dessa classe de tratamentos estão a coagulação ou floculação, flotação e filtração, precipitação-floculação, eletroflotação, coagulação eletrocínética, métodos de oxidação por ozônio, irradiação e processos eletroquímicos. São consideradas técnicas caras, que acumulam concentração de lodo significativas porém apresentam elevada eficiência (IMMICH, 2006).

2.5.3.1 Tratamento eletroquímico

Esse tipo de tratamento é eficiente para reduzir ou oxidar íons metálicos, cianetos, hidrocarbonetos aromáticos e alifáticos, sendo o elétron o reagente, evitando qualquer outro composto químico. Um potencial que seja capaz de oxidar ou reduzir um substrato é aplicado, ocasionando eletro-oxidação direta de compostos orgânicos, é necessário ser feito em meio aquoso, apresentar elevado potencial e semicondutores como eletrodos, apresenta efetividade devido à boa condutividade e estabilidade em diferentes tipos de soluções (FREIRE et al., 2000).

Nos efluentes têxteis, esse tipo de processo é considerado moderno e eficaz devido à alta eficiência para remoção de corantes e degradação de outros poluentes. A vantagem essencial do processo é que não se faz necessário nenhum produto químico complementar. Os equipamentos e a instalação são moderadamente simples, os controles são fáceis e os reatores são compactos, não gerando subprodutos indesejáveis (IMMICH, 2006).

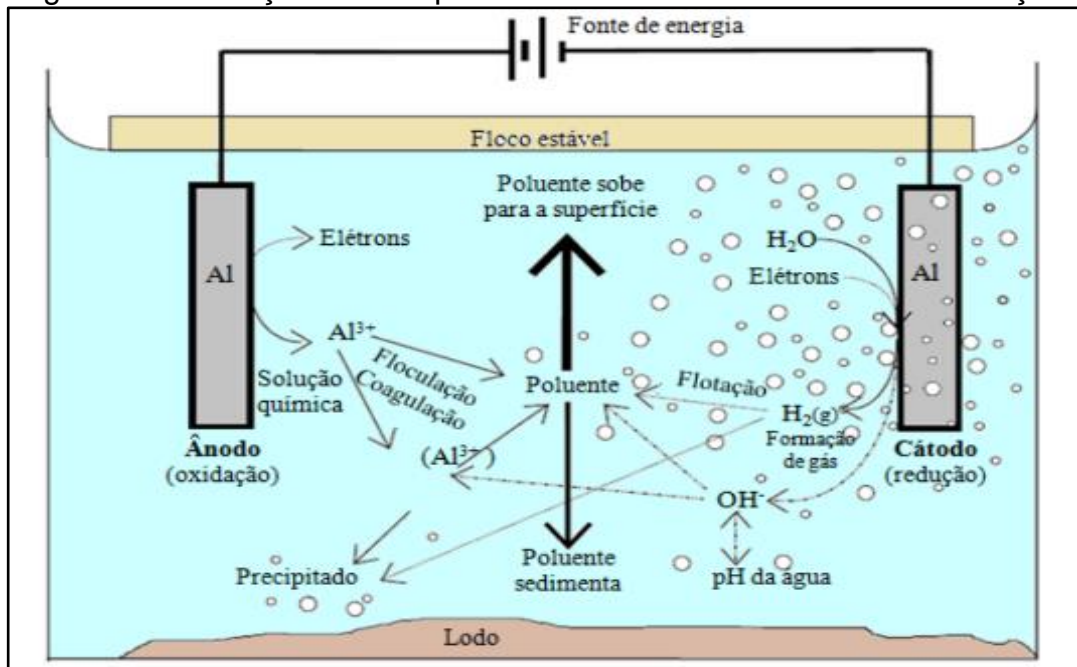
2.5.3.2 Eletrofloculação

A eletrofloculação apresenta diversas vantagens no tratamento de diferentes tipos de efluentes, uma vez que remove partículas coloidais menores, tem baixo custo operacional e energético, compatibilidade ambiental e versatilidade de manutenção e operação (COMETTI et al., 2014). Belan (2014) afirma que o processo é realizado em um reator que tem finalidade de uma célula eletrolítica, nesse reator dois eletrodos são interligados em paralelo, entrando em contato com o efluente a ser tratado.

O tratamento via eletrofloculação visa a flotação dos poluentes presentes no efluente através de pequenas bolhas de oxigênio e hidrogênio, gerado pela eletrólise da solução aquosa. Ocorrem reações eletroquímicas nos eletrodos, onde no ânodo são liberadas bolhas de oxigênio e no catodo bolhas de hidrogênio. Os materiais usualmente utilizados como ânodos de sacrifício são o ferro e o alumínio, devido a seu baixo custo, disponibilidade e eficácia (CHEN, 2004).

Sendo assim, o princípio de funcionamento do processo eletrolítico resume-se nos eletrodos de sacrifício aplicando um potencial elétrico na solução aquosa, promovendo a corrosão do metal do eletrodo, essa corrosão quando em pH adequado, gera íons e gases e forma reações de coagulação/floculação apropriada para o tratamento, como mostra a Figura 15 (CRESPILHO; SANTANA; REZENDE, 2004).

Figura 15 - Interações físico-químicas dentro do reator de eletrofloculação.

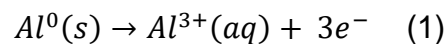


Fonte: HOLT et al., (2001)

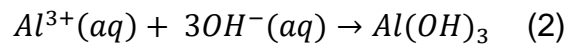
Esse processo também pode ser chamado de eletrocoagulação ou eletroflotação, que é baseado na desestabilização de poluentes emulsificados ou em suspensão em uma solução. Aquino Neto et al. (2011) define que o processo ocorre em três etapas:

- a) através da oxidação de um ânodo metálico um coagulante é gerado in situ, gerando cátions na fase anódica, os cátions reagem com moléculas de

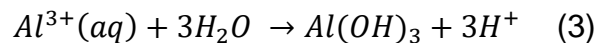
água, formando hidróxidos e poli-hidróxidos. Juntamente com a eletrólise da água, microbolhas de oxigênio no ânodo e hidrogênio no cátodo se originam. Belan (2014) define que o material ideal para os eletrodos é o alumínio, visto que, o ferro quando utilizado gera uma mudança na cor do efluente, tornando o processo inviável. Utilizando o alumínio como eletrodo de sacrifício e aplicando um potencial elétrico, ocorre o processo anódico, no qual o alumínio metálico é oxidado (Reação 1) gerando íons de Al^{3+} e liberando para o meio aquoso.



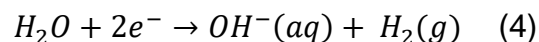
A formação de hidróxido de alumínio $Al(OH)_3$ é conduzida pelos íons de alumínio através de reações secundárias (Reação 2 e 3), o hidróxido é o agente coagulante responsável pela coagulação e formação das partículas coloidais. Em condições alcalinas, ocorre a reação 2.



Por intermédio da hidrólise da água, a solução se torna levemente ácida, ocorre a formação de hidróxido de alumínio ($Al(OH)_3$) e hidrogênio (H^+) (Reação 3).

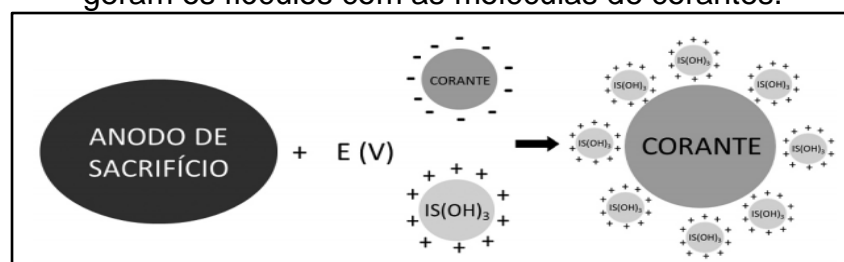


No cátodo há a formação de bolhas de hidrogênio (Reação 4), flotando os compostos particulados.



b) os hidróxidos formados adsorvem as partículas coloidais e os flóculos formados entram em contato com as impurezas. Através de complexação ou atração eletrostática e posterior coagulação os poluentes são removidos. O processo de adsorção e formação das partículas coloidais está exemplificado na Figura 16;

Figura 16 - Processo de adsorção e formação das partículas coloidais que geram os flóculos com as moléculas de corantes.

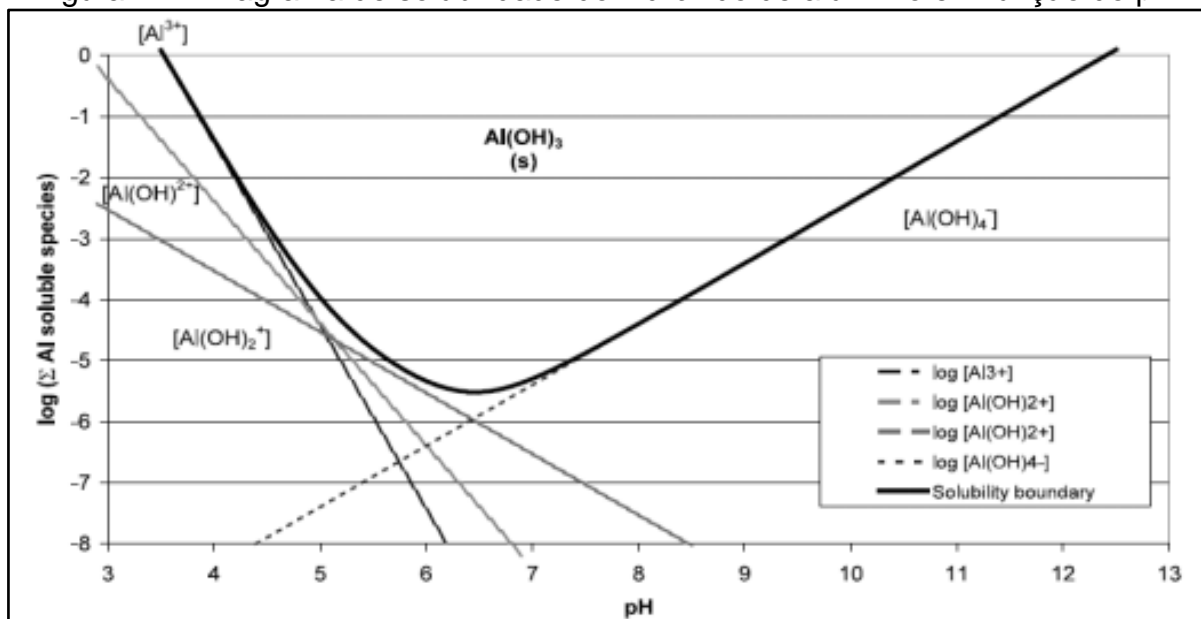


Fonte: Aquino Neto et al. (2011)

c) etapa onde ocorre a flotação em virtude da formação de microbolhas, essas bolhas conduzem o material floculado até a superfície.

Para ocorrer a formação do hidróxido de alumínio, o pH deve estar em uma faixa específica, como pode ser visualizado na Figura 17, o pH ideal para a formação de Al(OH)_3 está entre 6,5 e 7. Caso o pH não esteja nessa faixa, poderá se formar outros compostos iônicos não desejados como Al(OH)^{2+} , $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$ e Al(OH)_4^- , que são solúveis e que não formam flocos (BELAN, 2014).

Figura 17 – Diagrama de solubilidade do hidróxido de alumínio em função do pH



Fonte: Holt et al. (2002)

Cerqueira (2006) utilizou o processo de eletrofloculação no tratamento do efluente de uma indústria têxtil. O processo foi realizado em um reator de batelada com eletrodos de ferro e alumínio. Os resultados demonstram que o método de eletrofloculação nas condições operacionais aplicadas é uma alternativa viável para a remoção de DQO, cor e turbidez, a qual foi, respectivamente, de 87%, 95% e 100%, atendendo os parâmetros estipulados na resolução 128/2006 do CONSEMA.

2.6 PARÂMETROS DE CONTROLE DO PROCESSO

O desempenho do sistema é aferido pela eficiência na remoção de poluentes pelo consumo de energia, isso dependerá do tamanho de bolhas geradas, do projeto

de célula eletrodo material que compõe a célula e os eletrodos e a disposição e distância entre os eletrodos. A variação do tamanho das bolhas depende da condição superficial dos eletrodos, pH da solução e intensidade da corrente (BELAN, 2014).

Os dados listados a seguir são utilizados para qualificar, quantificar e otimizar processos e técnicas de tratamentos de efluentes.

- a) pH: cargas de partículas coloidais, formação de hidróxidos metálicos na coagulação/floculação e precipitação química são influenciados pelo pH da solução (CERQUEIRA, 2006);
- b) cor aparente: dependendo do corante utilizado no processo de tingimento, a concentração da cor do efluente impede a passagem de luz solar nos corpos da água, impossibilitando a fotossíntese de algas e outras plantas aquáticas, interferindo na geração de oxigênio (CERQUEIRA, 2006);
- c) turbidez: a turbidez também dependerá do corante utilizado, particulados maiores e coloidais ficam em suspensão, dificultando a passagem de luz, dificultando a produção de oxigênio (BELAN, 2014);
- d) condutividade elétrica: a capacidade de conduzir corrente elétrica é proporcional à quantidade de íons condutores presentes na solução. Quanto maior for a concentração de íons, mais corrente elétrica será conduzida, visto que na eletrofloculação é preferível que a condutividade seja alta para que o gasto de corrente elétrica seja menor, conseqüentemente o custo do processo será menor (BELAN, 2014);
- e) DQO: indica o conteúdo orgânico presente no efluente, está diretamente ligado a eficiência do processo. É medido pela quantidade de oxigênio necessário para oxidar toda matéria orgânica presente, biodegradável ou não, através de um agente químico oxidante, visto que, essa matéria orgânica é a principal fonte poluidora das águas (BELAN, 2014);
- f) surfactantes: compostos que alteram a tensão superficial, quando dissolvido em água ou solução aquosa. Apresentam um grupo polar hidrofílico e um apolar hidrofóbico e são ricos em fósforo, devido a isso o descarte na água doce dos mesmos levam a prejuízos de ordem estética e também exerce efeitos tóxicos provocados pela formação de espuma (GARDINGO, 2010).
- g) sólidos suspensos totais: porção da amostra que fica retida no filtro de fibra de vidro padrão após a filtração. Seu teor pode ser medido através da evaporação do efluente a 103 – 105°C até o peso constante. No efluente os

SST permanecem em suspensão por um determinado tempo até sedimentarem, quando em suspensão aumentam a turbidez da água, impedindo a fotossíntese. Ao sedimentar forma depósitos de lodo no leito do rio ou lago (BELTRAME, 2000);

h) alumínio total: concentração residual do metal no efluente (BELAN, 2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais que foram utilizados no trabalho experimental e a metodologia empregada para caracterizar as propriedades do efluente gerado no beneficiamento do jeans e viabilizar a aplicação do processo de eletrofloculação na remoção de cor, turbidez, DQO, surfactantes, pH e condutividade do efluente de uma indústria têxtil.

As análises foram realizadas no efluente bruto e nos tratados para fins de avaliação de eficiência da técnica.

3.1 MATERIAIS

O efluente estudado neste trabalho é proveniente de uma indústria têxtil, localizada no município de Alvorada (RS), sendo que a coleta do rejeito bruto foi efetuada no final do processo de beneficiamento do jeans no mês de setembro de 2018.

3.1.1 Coleta das amostras de efluente líquido

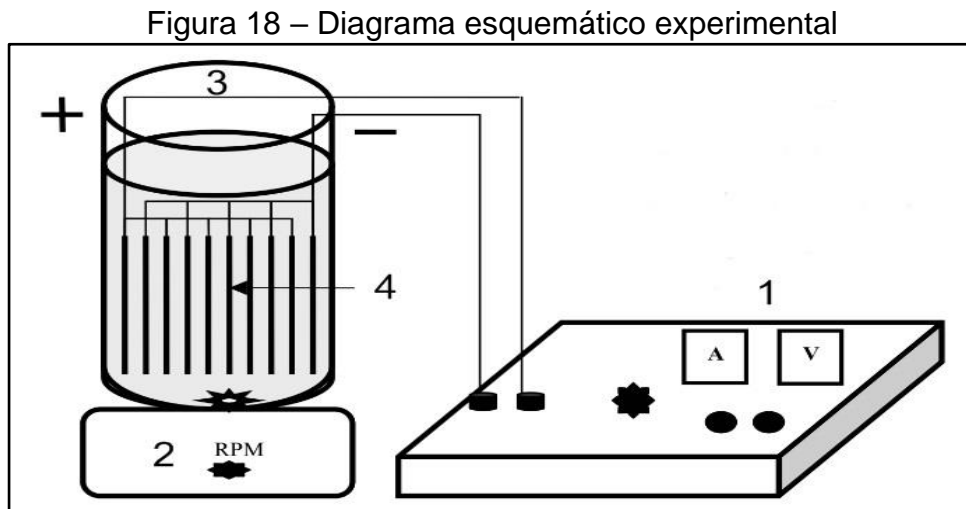
Realizou-se a coleta no tanque de equalização afluente à ETE, local onde os efluentes da produção são homogeneizados, para garantir maior eficiência do sistema de tratamento. Coletou-se uma amostra única em uma embalagem plástica com capacidade para 30 litros e preservou-se sob refrigeração.

3.1.2 Procedimento experimental

O procedimento experimental, apresentado na Figura 15, consiste no tratamento por meio de eletrofloculação do efluente coletado em um reator monopolar com arranjo em paralelo, operando em batelada, utilizando-se eletrodos de alumínio em uma célula eletrolítica. A escolha se dá ao baixo custo operacional e energético e a baixa geração de lodo ao final do tratamento.

O equipamento é composto por uma célula eletrolítica, uma fonte estabilizada de corrente contínua, um reator de vidro ou acrílico, eletrodos de alumínio composto por 4 placas que estarão dispostos verticalmente dentro do reator, conforme pode ser

visto na Figura 18. Utilizou-se uma tensão de 5 V, uma corrente de 4,5 A e 10 minutos de tratamento para todas as amostras. Após adicionar o efluente no reator, mantém-se uma agitação constante por meio de agitador magnético.



Fonte: Adaptado de Cerqueira, (2006)

- Nota: (1) Fonte de potencial
 (2) Agitador magnético
 (3) Célula eletroquímica
 (4) Eletrodos

Utilizou-se o tratamento via filtração e carvão ativado e também combinados com a eletrofloculação como comparativo para melhorias dos parâmetros a serem alcançados conforme estabelecido em legislação vigente, o tempo de tratamento para esses tratamentos foi de 10 minutos. As amostras com seus respectivos tratamentos estão listadas conforme a Figura 19 a seguir:

Figura 19 - Fluxograma das amostras e de seus respectivos tratamentos

1	Efluente Bruto
2	Efluente tratado via eletrofloculação
3	Efluente filtrado e tratado com carvão ativado
4	Efluente tratado via eletrofloculação, filtrado e tratado com carvão ativado
5	Efluente tratado via floculação e sedimentação

Fonte: O autor (2018)

Para a amostra 2 utilizou-se somente a eletrofloculação, procedimento citado anteriormente na figura 18. A amostra 3 primeiramente foi submetida a filtração a vácuo e depois utilizado a adsorção com 1 g/L de carvão ativado. Para a amostra 4 utilizou-se a eletrofloculação e depois o efluente foi filtrado e adsorvido com 1 mg/L carvão ativado. Para a amostra 5, tratou-se via floculação e sedimentação com 2 g/L de sulfato de alumínio.

3.2 MÉTODOS

A metodologia empregada para a elaboração dos ensaios executados é descrita detalhadamente neste item.

3.2.1 Parâmetros físicos químicos avaliados

Para a realização das análises dos parâmetros seguiu-se as técnicas do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998) e pelos procedimentos internos de ensaio do LAPAM – PE: Laboratório de Análises e Pesquisas Ambientais, afim de identificar se os parâmetros apresentam o padrão de lançamento conforme a legislação vigente. Pode-se visualizar na Tabela 1 os métodos de análise utilizados para cada parâmetro e o padrão de emissão conforme a Resolução 355 de 2017 do CONSEMA previsto no Art.10 (RIO GRANDE DO SUL, 2017).

Para efluentes líquidos, exceto efluentes domésticos, a Resolução N° 355/2017 do CONSEMA, estabelece variantes dos padrões de emissão para DQO e Sólidos Suspensos (SS), de acordo com as faixas de vazão, prevista no Art. 17 (RIO GRANDE DO SUL, 2017).

Tabela 1 – Métodos analíticos para quantificar os parâmetros físico-químicos e seus padrões de emissão conforme CONSEMA 355/2017

Parâmetro analisado	Referência metodológica	Padrão de emissão
pH	Método 4500 B - APHA (1998)	Entre 6,0 e 9,0
Cor aparente	Método 2120 B - APHA (1998)	Não deve conferir mudança de coloração (cor verdadeira) ao corpo hídrico receptor
Turbidez	Método 2130 B - APHA (1998)	-
Condutividade elétrica	Método 2510 B - APHA (1998)	-
DQO	Método 5220 B - APHA (1998)	Q<100 – 330 mg O ₂ L ⁻¹
Surfactantes (Substâncias tensoativas que reagem ao azul de metileno)	Método 5540 C - APHA (1998)	2,0 mg MBAS/L
Sólidos suspensos totais	Método 2540 B - APHA (1998)	Q<100 – 140 mg L ⁻¹
Alumínio total	Método 3030 E - APHA (1998)	10 mg/L

Fonte: Adaptado de Rio Grande do Sul (2017) e do Apha (1998).

3.2.2 Densidade de corrente

A densidade da corrente pode ser calculada pela Equação 1 (ARROYO, 2011).

$$\delta = \frac{i}{A_{\text{ânodo}}} \quad (1)$$

Sendo:

δ = densidade de corrente (A/m²);

i = corrente elétrica (A);

$A_{\text{ânodo}}$ = área total dos ânodos (m^2).

3.2.3 Densidade de carga

De acordo com Kumar et al. (2004) a densidade de carga é um parâmetro importante, sendo utilizado como parâmetro para o projeto de eletrofloculação e pode ser calculada de acordo com a Equação 2.

$$C_f = \frac{i \cdot t}{F \cdot V} \quad (2)$$

Sendo:

C_f = densidade de carga (F/m^3);

i = corrente elétrica aplicada (A);

t = tempo de aplicação da corrente (s);

F = constante de Faraday ($9,65 \times 10^4 \text{ C/mol.}$);

V = volume ocupado pelo efluente (m^3).

3.2.4 Consumo de energia

O consumo de energia elétrica é calculado através da Lei de Ohm, de acordo com a Equação 3.

$$P = V \cdot i \quad (3)$$

Sendo:

V = tensão aplicada (V);

i = corrente elétrica (A);

P = potência consumida no reator (W).

O consumo de energia de um reator operado em batelada pode ser calculado de acordo com a Equação 4 (CAN et al., 2006).

$$C_{\text{energia}} = \frac{P \cdot t}{V} \quad (4)$$

Sendo:

C_{energia} = consumo de energia ($W.h/m^3$);

P = potência consumida (W);

t = tempo da aplicação da corrente (h);

V = volume do efluente tratado (m^3);

U = tensão elétrica aplicada no sistema (V);

i = corrente elétrica aplicada (A).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões do trabalho realizado. Para avaliar a efetividade de cada método, os parâmetros foram analisados conforme o padrão de emissão estabelecido pela Resolução 355 de 2017 do CONSEMA previsto no Art. 10 (RIO GRANDE DO SUL, 2017).

4.1 pH

Nos ensaios realizados, o pH final apresentou variação quando comparado ao inicial. A Tabela 2 apresenta a mudança do pH de acordo com o tratamento que o efluente foi submetido.

Tabela 2 – Resultados do pH das amostras

Amostra	pH
1	5,56
2	6,15
3	6,78
4	7,58
5	3,35

Fonte: O autor (2018)

Nota: Amostra 1: efluente bruto

Amostra 2: efluente tratado via eletrofloculação

Amostra 3: efluente filtrado e tratado com adsorção em carvão ativado

Amostra 4: efluente tratado via eletrofloculação combinado com filtração e adsorção com carvão ativado

Amostra 5: efluente tratado via floculação e sedimentação.

Os efluentes submetidos a eletrofloculação (amostra 2) apresentaram pH maior que o inicial. Segundo Cerqueira (2006) esse aumento ocorre devido ao consumo de H^+ decorrente da formação de hidrogênio no cátodo proveniente da eletrólise da água e também a formação de íons OH^- , embora estes íons também sejam usados na formação do agente coagulante, a quantidade remanescente conduz ao aumento do valor do pH.

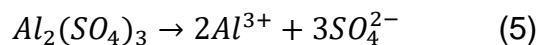
Ainda de acordo com Cerqueira (2006) para eletrodos de alumínio, o pH inicial 5 apresenta melhor remoção de cor, turbidez e DQO, este resultado se deve à formação de complexos de alumínio formados pelo processo eletrolítico com íons de OH^- , os quais são solúveis em pH maior que 7. O alumínio gerado é solúvel e não

reage na coagulação, permanecendo na solução, principalmente na forma de $[Al(OH)_4]^-$, conferindo alcalinidade ao efluente.

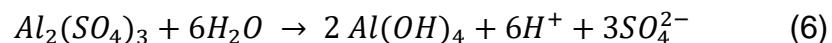
Crespilho e Rezende (2004) e Ferreira (2006) também observaram o aumento do pH após o tratamento eletroquímico, característico da produção de íons OH^- durante o processo. Ao comparar os dados obtidos com os da literatura, nota-se que se comportam de maneira prevista pela mesma.

O aumento do pH do efluente tratado por filtração e adsorção com carvão ativado (amostra 3) pode ser explicado através do mecanismo de adsorção de corantes no adsorvente. O processo de remoção de cor envolve três etapas: o corante migra através da solução para a superfície exterior das partículas do adsorvente, o corante move-se dentro dos poros das partículas e, então ele é adsorvido nos sítios no interior da superfície das partículas do adsorvente. Os íons de Hidrogênio (H^+) são adsorvidos fortemente, tornando a solução básica.

Pelo método de floculação e sedimentação (amostra 5), utilizou-se sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)_3$), coagulante muito utilizado no Brasil, obtido por meio da reação química entre o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o ácido sulfúrico (H_2SO_4) (SANTOS et al., 2011). O efluente após tratado apresentou pH menor que o inicial, apresentando caráter ácido. O mesmo autor afirma que esse fato se deve a reação que ocorre entre o sulfato de alumínio e a água, formando íons de alumínio, conforme a Reação 5.



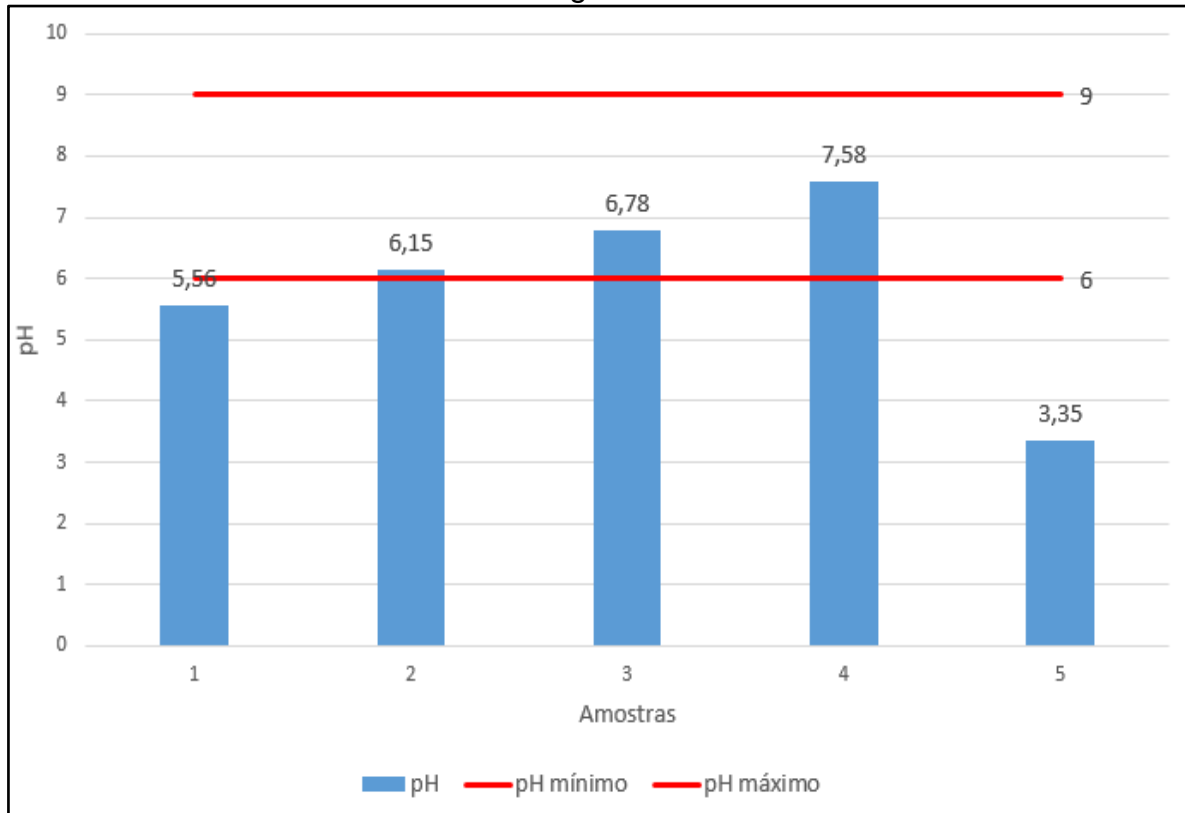
Os íons Al^{3+} atuam de duas formas: (1) a minoria desses cátions neutraliza as cargas negativas das impurezas presentes na água, e (2) a maioria desses cátions interage com os íons hidroxila (OH^-) da água, formando o hidróxido de alumínio, como mostra a Reação 6.



O hidróxido de alumínio carregado positivamente neutraliza as impurezas coloidais carregadas negativamente que estão na água, porém a reação forma também excesso de íons de hidrogênio, o que torna o meio ácido. Para evitar que o meio se torne ácido é necessário adicionar junto com o sulfato de alumínio o óxido de cálcio (CaO) que possui caráter básico.

A Figura 20 apresenta os valores de pH determinados em cada tratamento, no qual o efluente bruto e a amostra 5 não estão de acordo com o padrão de lançamento previsto pela legislação vigente que estabelece o pH entre 6,0 e 9,0.

Figura 20 – Determinação de pH de cada amostra e limite permitido pela legislação vigente

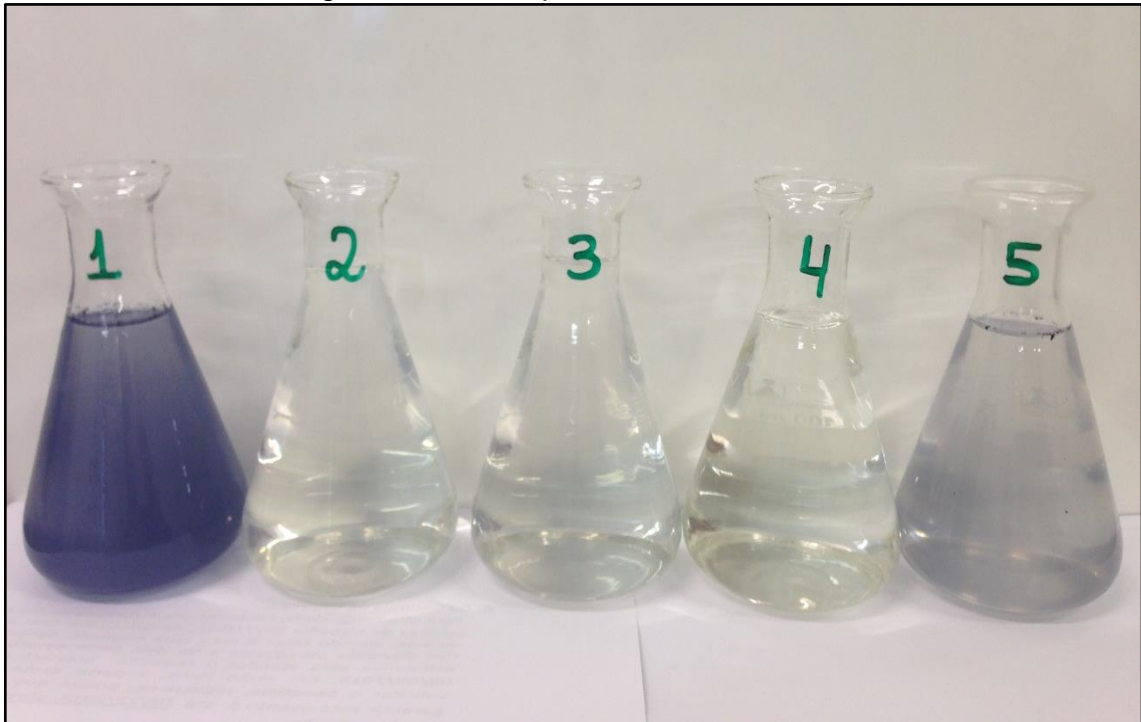


Fonte: O autor (2018)

4.2 COR APARENTE

O efluente bruto (amostra 1) apresentava cor azulada, de acordo com o LAPAM, a análise de cor aparente consta como prejudicado. Após o tratamento, as amostras 2, 3 e 4 apresentaram visivelmente remoção na cor, como pode ser visto na Figura 21, o tratado via floculação e sedimentação (amostra 5) não apresentou remoção de cor efetiva, tendo também sua análise prejudicada. As análises podem ser visualizadas na Tabela 3.

Figura 21 – Cor aparente das amostras



Fonte: O autor (2018)

Tabela 3 - Resultado da cor aparente das amostras

Amostra	Cor Aparente (uC)
1	Prejudicado
2	50
3	20
4	10
5	Prejudicado

Fonte: O autor (2018)

Nota: Prejudicado: análise prejudicada em função da característica da amostra (azulada)

Cerqueira e Marques (2010) obtiveram remoção de 96% da cor de água de produção pelo tratamento de eletrofloculação, Ewerling e Dominguês (2014) aplicaram o mesmo tratamento em um efluente de uma lavadeira industrial onde obtiveram eficiência de 65,7 a 93,6% de remoção de cor. Para este trabalho não foi possível calcular a eficiência devido a análise não determinar a cor aparente do efluente bruto, porém a legislação estabelece que o efluente não altere a cor do corpo hídrico receptor, sendo assim as amostras 2, 3 e 4 estão em acordo para o lançamento.

4.3 TURBIDEZ

Para a remoção de turbidez todos os tratamentos se mostraram efetivos, apresentando eficiência de 75 a 97,17%, conforme pode ser visto na Tabela 4.

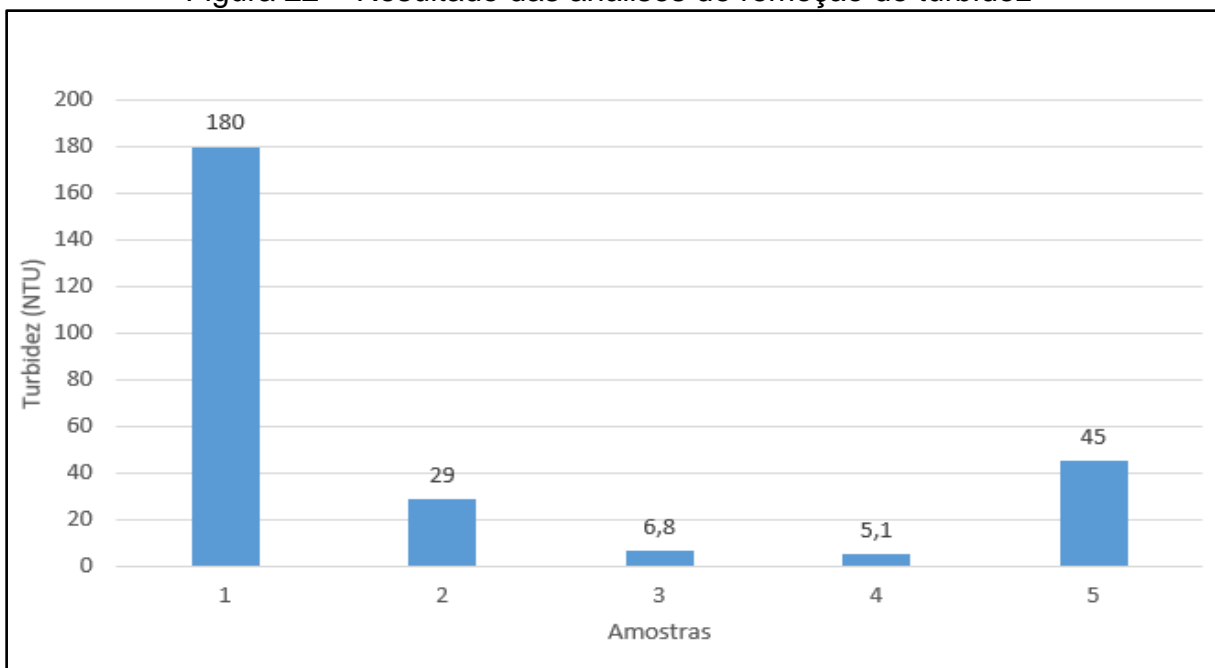
Tabela 4 – Eficiência de remoção de turbidez

Amostra	Eficiência de remoção (%)
2	83,89
3	96,22
4	97,17
5	75,00

Fonte: O autor (2018)

Os resultados das análises do efluente bruto e dos efluentes tratados podem ser visualizados na Figura 22. Crespilho e Rezende (2004) obtiveram resultados semelhantes ao aplicar a técnica de eletrofloculação para efluentes da indústria de processamento de coco utilizando eletrodos de alumínio, no qual observou-se uma remoção de 93% da turbidez no efluente tratado, já Cerqueira (2006) obteve uma eficiência de 100% na remoção de turbidez via eletrofloculação de um efluente têxtil tratado.

Figura 22 – Resultado das análises de remoção de turbidez



Fonte: O autor (2018)

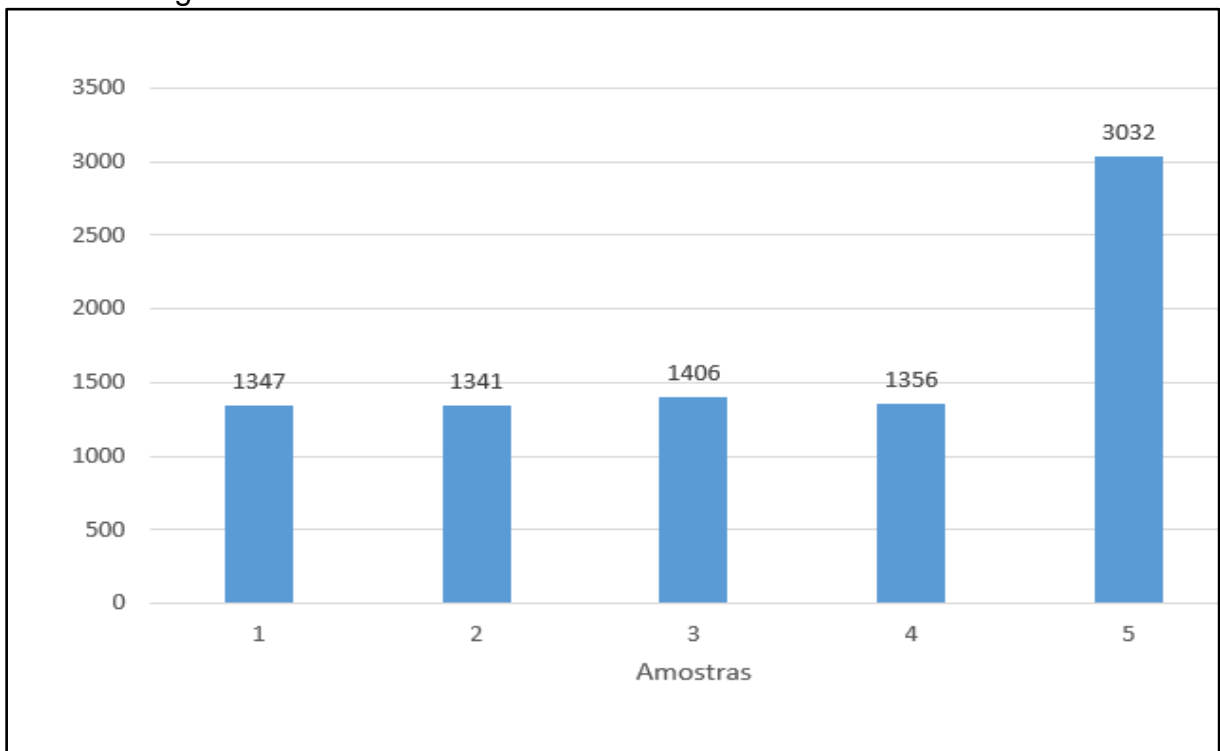
4.4 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

A elevada condutividade elétrica apresentada pelo efluente favorece para que ocorra a eletrofloculação. É uma variável que afeta a eficiência de corrente, a tensão da célula e o consumo de energia elétrica, além de ser importante no momento de otimizar os parâmetros do sistema, pois um alto valor de condutividade associado ao menor distanciamento entre os eletrodos minimiza o consumo de energia, porém, não interfere na eficiência de remoção dos contaminantes.

A condutividade não é um parâmetro controlado pela legislação, contudo serve de medida indireta de ambientes impactados, podendo representar um indicativo da concentração de poluentes.

O efluente bruto apresentou 1347 $\mu\text{S}/\text{cm}$, as amostras 2, 3 e 4 não apresentaram um aumento considerável, porém a amostra 5 apresentou um aumento relevante, conforme demonstra a Figura 23. Cerqueira (2006) aponta que tal aumento pode ser explicado devido a condutividade depender da quantidade de íons condutores presentes na solução, como foi adicionado sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) no tratado 4, essa concentração de alumínio (Al) é maior quando comparada aos outros tratamentos, aumentando consideravelmente a condutividade.

Figura 23 – Resultado da análise de condutividade das amostras



Fonte: O autor (2018)

Ferreira (2006) obteve uma condutividade de 1510 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no efluente bruto, após 10 minutos de tratamento a condutividade reduziu para 1367 $\mu\text{S}/\text{cm}$, o parâmetro foi analisado até os 60 minutos, apresentando 1087 $\mu\text{S}/\text{cm}$. O autor afirma que para evitar a diminuição da condutividade é necessário a adição de cloreto de sódio.

4.5 DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO

Como a estação de tratamento onde o efluente foi coletado opera a uma vazão de 8m³/dia, o limite estabelecido pela legislação para vazão menor ou igual a 100m³/dia é de 330 mg O₂/L. Sendo assim todas amostras, incluindo o efluente bruto, estão de acordo com o padrão estabelecido pela legislação, como pode ser observado na Figura 24, porém as amostras 2 e 4 foram os que apresentaram maior eficiência para remoção de DQO, 63,09 e 55,56% respectivamente, conforme observado na Tabela 5.

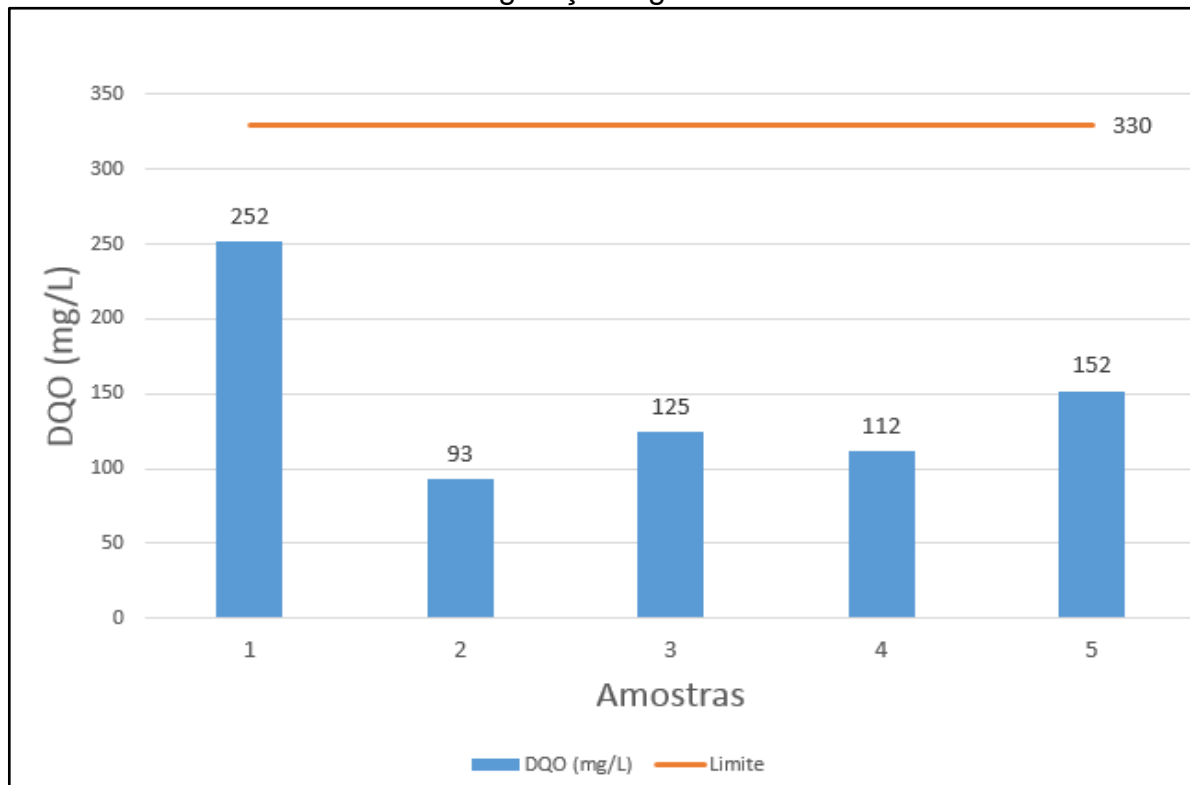
Tabela 5 - Resultado da determinação de DQO e eficiência de remoção

Amostras	DQO (mg/l)	Eficiência de remoção (%)
2	93	63,09
3	125	50,39
4	112	55,56
5	152	39,68

Fonte: o autor (2018)

Os autores Chen et al. (2000) obtiveram eficiência de 90% e Ferreira (2006) relatou uma eficiência de 83% na redução de DQO para eletrodos de alumínio, onde também relata que a remoção de DQO por eletrofloculação pode ser atribuída à remoção de sólidos suspensos e também a precipitação das moléculas orgânicas dissolvidas.

Figura 24 – Gráfico de determinação de DQO e limite máximo permitido pela legislação vigente



Fonte: o autor (2018)

4.6 SURFACTANTES

Pelas análises todas as amostras estão de acordo com o que a legislação vigente estabelece, inclusive o efluente bruto, de acordo com a Figura 25.

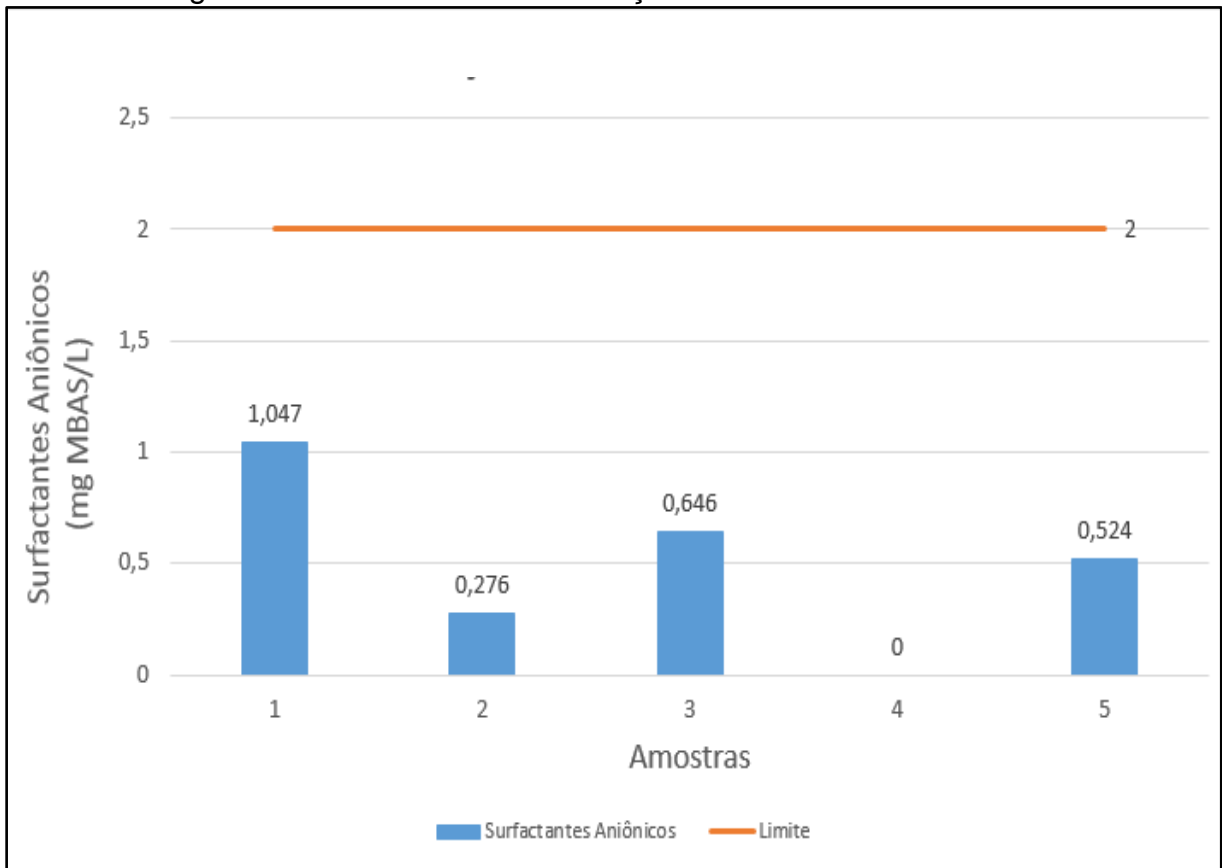
O tratamento que apresentou maior eficiência foi a amostra 4 e a amostra 3 apresentou baixa eficiência, conforme pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6 – Eficiência da remoção de surfactantes aniônicos

Amostra	Eficiência
2	73,63 %
3	38,29 %
4	100 %
5	49,95 %

Fonte: O autor (2018)

Figura 25 – Gráfico de determinação de surfactantes aniônicos



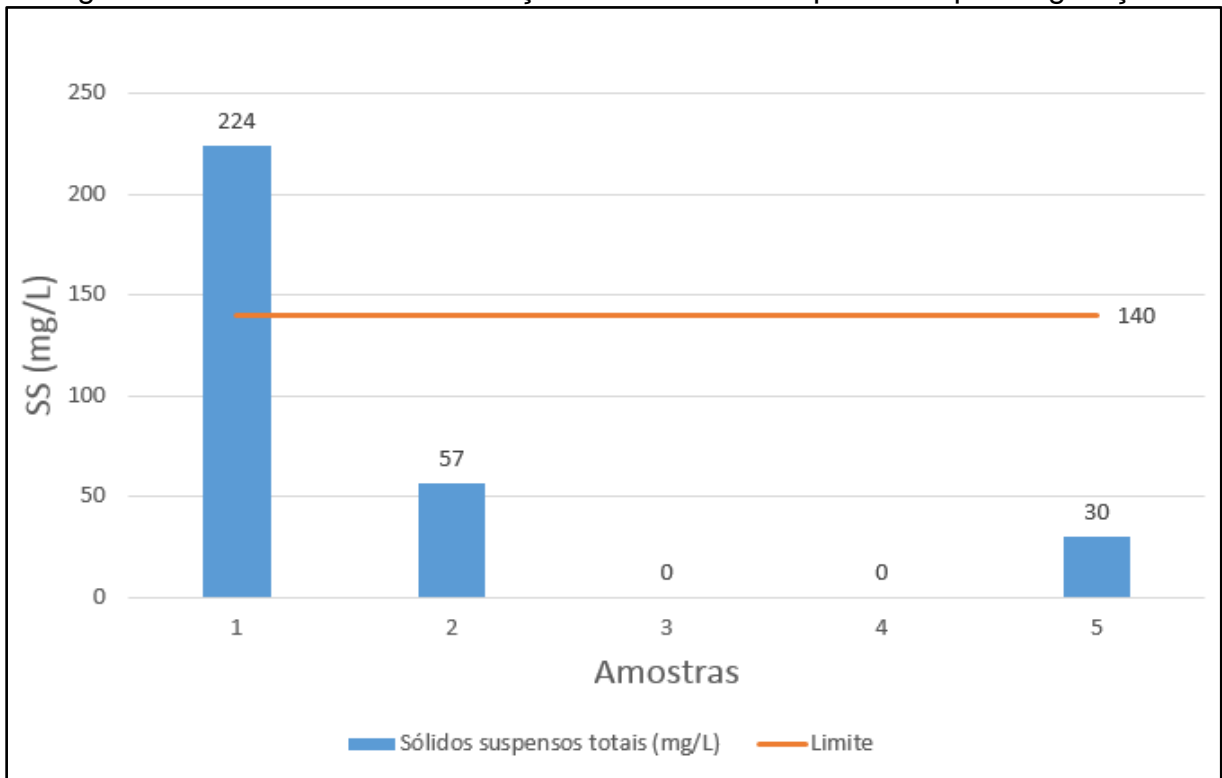
Fonte: O autor (2018)

4.7 SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS

A determinação de sólidos suspensos totais é importante para fornecer a quantidade de resíduo presente no efluente. Fernandes et al. (2016) afirma que com o aumento da diferença de potencial aumenta a liberação de íons de Al^{3+} ao meio, consequentemente aumentando a formação do agente coagulante $Al(OH)_3$, o qual coagula os poluentes do meio por flotação decorrente da formação de O_2 e H_2 , assim reduzindo as partículas sedimentáveis do meio, confirmando eficiência elevada encontrada.

Para redução de sólidos suspensos totais obteve-se eficiência de 74,55% para o efluente tratado por eletrofloculação, 100% para o tratado com filtração e carvão ativado, 100% para o tratado por eletrofloculação, filtração e com carvão ativado e 86,60% para o tratado via floculação e sedimentação. O limite estabelecido pela legislação é de 140 mg/L, ou seja, todos os tratamentos estão de acordo com o padrão de emissão, como pode ser visto na Figura 26.

Figura 26 – Gráfico de determinação de SS e o limite permitido pela legislação



Fonte: o autor (2018)

Andrade (2017) obteve eficiência de 100% na remoção de sólidos suspensos totais em um efluente de cabide de lavagem.

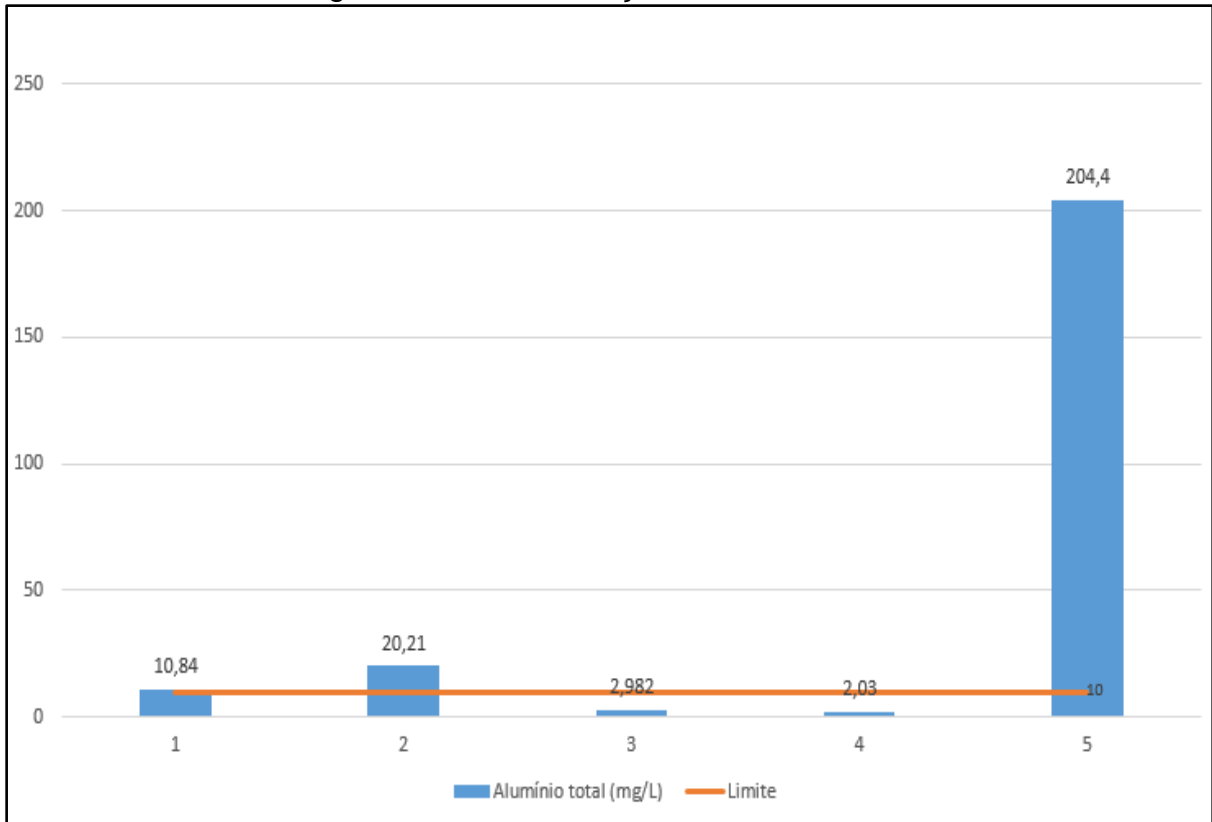
4.8 ALUMÍNIO TOTAL

Os sais de alumínio são os coagulantes químicos largamente utilizados no processo de tratamento de águas, apresentando maior eficiência quando o pH da suspensão estiver entre 5,0 e 8,0 (MATOS et al., 2007). O mesmo autor ainda descreve que a maior desvantagem desses sais refere-se ao fato de que a disposição do lodo formado causa impacto ambiental considerável, uma vez que o alumínio é um elemento tóxico para plantas e microrganismos.

A Figura 27 apresenta a quantidade de alumínio residual remanescente respectiva a cada amostra. Apenas as amostras 3 e 4 ficaram abaixo de 10 mg/L, quantidade permitida pela legislação vigente. A amostra 2, teve um aumento de 86,44% na quantidade de alumínio remanescente, o que pode ser explicado por Cerqueira (2016), onde o processo eletrolítico forma complexos de alumínio, uma parte desse alumínio gerado não reage, tendendo a ficar em solução. Outra hipótese

que pode ser considerada é a quantidade de sulfato de alumínio utilizado (2 mg/L), como o tempo de tratamento foi relativamente curto, poderia ter sido utilizado uma quantidade menor de sulfato de alumínio.

Figura 27 – Determinação do alumínio total



Fonte: O autor (2018)

Castilhos, Dalsasso e Rohers (2010) afirmam que a filtração tem eficiência de 60 a 96% na remoção de metais pesados, confirmando assim que é necessário aplicar a filtração como pós tratamento para a concentração de alumínio estar de acordo com o permitido pela legislação. Na amostra 3 e 4, utilizando a filtração, obteve-se a eficiência de 72,49 e 81,27% respectivamente na remoção de Al. No tratamento via floculação, o agente coagulante aumentou consideravelmente a concentração de Al no efluente. Os mesmos autores obtiveram igual resultado, visto que mesmo com a filtração, o efluente tratado com sulfato de alumínio como agente coagulante, está acima do limite permitidos para descarte.

4.9 DENSIDADE DA CORRENTE

A densidade foi calculada de acordo com a Equação 1, onde:

$$\delta = \frac{4,5 A}{3,75 m^2} \quad (1)$$

$$\delta = 1,2 A/m^2$$

Crespilho e Rezendo (2004) afirmam que a densidade de corrente deve estar entre 20 e 25 A/m² para uma menor manutenção dos eletrodos, como o tratamento foi efetuado em escala laboratorial, utilizou-se uma corrente elétrica menor, conseqüentemente a carga de corrente encontrada também é menor do que a mencionada na literatura.

4.10 DENSIDADE DE CARGA

.A densidade foi calculada de acordo com a Equação 2.

$$C_f = \frac{4,5 A \cdot 600s}{9,65 \cdot 10^4 \frac{C}{mol} \cdot 0,005 m^3} \quad (2)$$

$$c_f = 5,59 \frac{F}{m^3}$$

A densidade de carga é um dos parâmetros mais corretos que podem ser utilizados como parâmetro de projeto na eletroflotação, pois a densidade de carga afeta diretamente a eficiência do tratamento.

De acordo com Fornari (2007), quando maior a densidade de corrente na eletrofloculação maior será a remoção de DQO, enxofre, cromo e sulfatos. Dallago et al. (2017) afirmam que quanto maior a densidade de corrente, maior será a remoção de cor e DQO.

4.11 CONSUMO DE ENERGIA

A potência consumida no reator foi calculada através da Equação 3.

$$P = 5 V \cdot 4,5 A \quad (3)$$

$$P = 22,50 W$$

O consumo de energia do reator foi calculado de acordo com a Equação 4.

$$C_{energia} = \frac{22,5 W \cdot 0,167 h}{0,005 m^3} \quad (4)$$

$$C_{energia} = 751,50 \frac{Wh}{m^3}$$

Avaliando a potência consumida encontrada, pode-se notar que a potência do tratamento é menor que a potência consumida em uma lâmpada LED, visto que o tratamento foi efetivo para a remoção de todos os parâmetros avaliados em apenas 10 minutos. Neste contexto, para aplicação do método estudado em escala industrial, o consumo energético para a eletrofloculação seria relativamente baixo.

4.12 RESUMO DOS RESULTADOS ENCONTRADOS

Neste item, estão apresentados os parâmetros analisados em todas as amostras, conforme a Tabela 7. Sendo os métodos avaliados de acordo com o limite estabelecido pela Resolução 355/2017.

Tabela 7 – Parâmetros analisados e limite estabelecido pela Resolução 355/2017 (continua)

Parâmetro	Resolução 355/2017 CONSEMA	Amostras				
		1	2	3	4	5
pH	6 a 9	5,56	6,15	6,78	7,58	3,35
Cor aparente (uC)	Não deve conferir mudança de coloração ao corpo hídrico receptor	Prejudicado	50	20	10	Prejudicado

(conclusão)

Turbidez (NTU)	Não estabelece limite	180	29	6,8	5,1	45
Condutividade elétrica	Não estabelece limite	1347	1341	1406	1356	3032
DQO ($\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$)	$Q < 100 \text{ m}^3\text{d}^{-1} - 330$	252	93	125	112	152
Surfactantes (MBAS L^{-1})	2	1,047	0,276	0,646	0	0,524
Sólidos suspensos totais (mg L^{-1})	140	224	57	0	0	30
Alumínio total (mg L^{-1})	10	10,84	20,21	2,982	2,03	204,40

Fonte: O autor (2018)

5 CONCLUSÃO

A eletrofloculação mostrou-se um tratamento eficaz para este tipo de efluente, 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 uma célula eletrolítica em escala piloto com uma corrente elétrica de 4,5 A e aplicando uma tensão de 5 V. Como proposta de melhorias nos parâmetros, utilizou-se filtração e adsorção com carvão ativado acrescidos a eletrofloculação e, como meio comparativo, utilizou-se também esses dois métodos sem o processo eletrolítico. Para comparação dos métodos propostos, avaliou-se também o método de floculação e sedimentação, usualmente utilizado pela lavadeira industrial do presente estudo.

O método que apresentou maior eficiência para remoção de cor, turbidez, surfactantes, sólidos suspensos totais e remoção de alumínio remanescente foi a eletrofloculação acrescida de filtração e adsorção com carvão ativado como pós tratamento (amostra 4). Apesar de ter sido utilizado tempo de tratamento de apenas 10 minutos, o mesmo apresentou remoção de cor praticamente total, com apenas 10 uC após tratado, eficiência de 97,17% para turbidez, 55,56% para DQO, 100% para remoção de surfactantes, 100% para remoção de sólidos suspensos totais e 81,27% para remoção de Al.

O tratamento via floculação e sedimentação (amostra 5) que é usualmente utilizado para este tipo de efluente, foi o que apresentou menor eficiência para todos os parâmetros analisados, sendo que a quantidade de Al remanescente no efluente tratado está muito acima do limite permitido pela legislação vigente. O pH apresentou caráter ácido, sendo necessário a utilização de CaO, para equilibrar o pH do efluente.

Em relação as condições de operação, com 5 V e 4,5 A, a corrente apresentou uma densidade de $1,2 \text{ A/m}^2$ e densidade de carga de $5,59 \frac{F}{m^3}$. Em 10 minutos de tratamento, apresentou uma potência de $22,50 \text{ W}$ e um consumo energético de $751,50 \frac{W \cdot h}{m^3}$.

Apesar da eletrofloculação ser pesquisada há bastante tempo e apresentar elevada eficiência, sua aplicação em escala industrial ainda não é muito utilizada, argumento este que justifica uma intensificação das pesquisas acerca deste tema.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, tem-se a inversão periódica da polaridade devido a passivação dos eletrodos, pois um dos principais problemas verificados nos eletrodos de alumínio é a passivação do eletrodo. Para desacelerar a formação do filme passivo faz-se a inversão periódica da polaridade, o eletrodo se comporta como cátodo por um determinado tempo e após a inversão se comportará como cátodo.

REFERÊNCIAS

ABIT – Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção. **Perfil do setor: Dados gerais do setor referentes a 2017**. Disponível em:<
<http://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>> Acesso em 25 de abril de 2018.

ABIT - Associação brasileira da indústria têxtil, **O setor têxtil e de confecções e os desafios da sustentabilidade**, Brasília, p. 108, 2017.

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ALBUQUERQUE, L.f. et al. Coagulation of indigo blue present in dyeing wastewater using a residual bittern. **Separation And Purification Technology**, [s.l.], v. 104, p.246-249, fev. 2013. Elsevier BV.

AMORIN, A. H.. **Competitividade internacional do complexo têxtil brasileiro no período 1998 a 2006**. 2. ed. Rio de Janeiro: Redige, 2011.

ANDRADE, E. A. **TRATAMENTO DE EFLUENTE DE CABINE DE LAVAGEM ATRAVÉS DA ELETROFLOTAÇÃO**. 2017. 75 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2017.

ANDRADE, F. de. **Remoção de cor de efluentes têxteis com tratamento de lodos ativados e um polieletrólito orgânico**. 2003. 121 f. TCC (graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

APHA (1998). **Standard Methods for the examination of water and wastewater**. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 20th ed. Washington.

AQUINO NETO, Sidney de et al. Tratamento de resíduos de corante por eletrofloculação: um experimento para cursos de graduação em química. **Química Nova**, Ribeirão Preto, v. 34, n. 8, p.1468-1471, maio 2011.

ARROYO, M. G. **Tratamiento de disoluciones que contienen cromo hexavalente mediante electrocoagulación con ánodos de hierro**. 2011. 340 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química e Nuclear, Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, 2011.

AVELAR, N. V. **Potencial dos resíduos sólidos da indústria têxtil para fins energéticos**. 2012. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

BAIG, G. A. Effect of pH on the coloration of synthetic fibres with indigo blue. **Indian Journal Of Fibre & Textile Research**, Punjab, v. 37, n. 1, p.265-272, Sep. 2012.

BASTIAN, E. Y. ONISHI; ROCCO, J. L. S. **Guia técnico ambiental da indústria têxtil**. São Paulo: CETESB, Sinditêxtil, 2009, 81 p.

BELAN, A. L. D. **Eletrofloculação aplicada ao tratamento de efluentes têxteis: Revisão Bibliográfica**. 2014. 40 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Gestão Ambiental em Municípios, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2014.

BELTRAME, Leocádia Terezinha Cordeiro. **Caracterização de efluente têxtil e proposta de tratamento**. 2000. 31 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Rio Grande do Norte, Natal, 2000.

CAN, O.t. et al. **Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation**. Chemosphere, [s.l.], v. 62, n. 2, p.181-187, jan. 2006.

CARVALHO, T. E. M. de. **Adsorção de corantes aniônicos de solução aquosa em cinza leve de carvão e zeólita de cinza leve de CARVÃO**. 2010. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

CASTILHOS JUNIOR, A. B. de; DALSSASSO, R. L.; ROHERS, F. Pré-tratamento de lixiviados de aterros sanitários por filtração direta ascendente e coluna de carvão ativado. **Eng. Sanitária Ambiental**, Florianópolis, v. 15, n. 4, p.385-392, out. 2010.

CERQUEIRA, A. A. **Aplicação da Técnica de Eletrofloculação no Tratamento de Efluentes Têxteis**. Dissertação de Mestrado Instituto de Química Programa de Pós-Graduação em Química. Rio de Janeiro. 2006.

CERQUEIRA, A. A.; MARQUES, M. R. da Costa. AVALIAÇÃO DO PROCESSO ELETROLÍTICO EM CORRENTE ALTERNADA NO TRATAMENTO DE ÁGUA DE PRODUÇÃO. **Química Nova**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 1, p.59-63, nov. 2010.

CHEN, Guohua. Electrochemical technologies in wastewater treatment. **Separation And Purification Technology**, [s.l.], v. 38, n. 1, p.11-41, jul. 2004. Elsevier BV.

CHEN, X. , CHEN, G. , YUE, P. L. **Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation**. Sep. Purif. Technol., n. 19, p.65-76 , 2000.

COMETTI, Ma. F. et al. Eletrofloculação com diferentes eletrodos de alumínio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20., **Anais...** Florianópolis: Cobeq, 2014. 8 p.

CRESPILHO, F.N.; SANTANA, C.G.; REZENDE, M.O.O.. Tratamento de efluente de indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação. **Química Nova**, v.27, p.387-392. 2004.

CRINI, G. Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: a review. **Bioresource Technology**. v. 97, n. 9, p. 1061-1085, Jun 2005.

DALLAGO et. al. **Eletrofloculação Aplicada ao Tratamento de Efluentes: efeito do eletrólito sobre a densidade de corrente**. Sociedade Brasileira de Química (SBQ), 37., 2017, Natal. . Erechim: Sociedade Brasileira de Química (sbq), 2017. 1 p.

DANESHVAR, N; SALARI, D; KHATAEE, A.r. Photocatalytic degradation of azo dye acid red 14 in water on ZnO as an alternative catalyst to TiO₂. **Journal Of Photochemistry And Photobiology A: Chemistry**, [s.l.], v. 162, n. 2-3, p.317-322, mar. 2004. Elsevier BV.

DIMOGLO, A , AKBULUT, H. Y. , CIHAN, F. , KARPUZCU, M. **Petrochemical wastewater treatment by means of clean electrochemical technologies**. *Clean Technol. Environ. Policy*, 6, p.288-295, 2004.

FEAM; FIEMG. **Guia Técnico Ambiental da Indústria Têxtil**. Minas Gerais, 2014

FERNANDES, T. F. et al. **SISTEMA CONTÍNUO DE ELETRFLOCULAÇÃO PARA TRATAMENTO DO EFLUENTE GERADO NA PURIFICAÇÃO DO BIODIESEL**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 21. , 2016, Fortaleza. Anais... Fortaleza: COBEQ, 2016. P.1-8.

FERREIRA, L. H. **Remoção de sólidos em suspensão de efluente da indústria de papel por eletroflotação**. 2006. 99 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

FORNARI, M. M. T. **APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ELETRO-FLOCULAÇÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE CURTUME**. 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2007.

FREIRE, R.S. et al. Novas tendências para o tratamento de resíduos industriais contendo espécies organocloradas. **Química Nova**, [s.l.], v. 23, n. 4, p.504-511, ago. 2000. FapUNIFESP. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422000000400013>.

GARDINGO, M. de F. **Tratamento de águas e efluentes contendo surfactantes através do sistema peróxido de hidrogênio/hipoclorito**. 2010. 82 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - Puc-rio, Rio de Janeiro, 2010.

GORINI, A. P. F. **Panorama do Setor Têxtil no Brasil e no Mundo: Reestruturação e Perspectivas**. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social Setorial, Rio de Janeiro, n. 12, p. 17 - 50, Setembro 2000.

GORINI, A. P. F.; SIQUEIRA, S. H. G. de. **O segmento de fiação no Brasil**. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 1997.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, Maria Valnice B.. Corantes têxteis. **Química Nova**, Araraquara, v. 23, p.71-78, jan. 2000.

HARRELKAS, F.; AZIZI, A.; YAACOUBI, A.; BENHAMMOU, A.; PONS, M. N. Treatment of textile dye effluents using coagulation–flocculation coupled with membrane processes or adsorption on powdered activated carbon. **Desalination**, v. 235, n. 1-3, p. 330-339, 2009.

- HASSEMER, M. E. N. **Oxidação fotoquímica - uv/h₂o₂ - para degradação de poluentes em efluentes da indústria têxtil.** 2006. 175 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- HEREK, L. C. S. et al. Estudo da Solidificação/Estabilização do Lodo da Indústria Têxtil em Material Cerâmico. **Cerâmica Industrial**, Maringá, v. 10, n. 4, p.41-46, julho/agosto 2005.
- HOLT, P. K.; BARTON, G.W.; WARK,M.; MITACHELL,C.A., A quantitative comparison between chemical dosin and eletrocoagulation. **Colloides and Surfaces A: Physicochemicals Engineering Aspectos**. n. 211, p. 233-248, 2002.
- IMMICH, A. P. S. **Remoção de corantes de efluentes têxteis utilizando folhas de azadirachta indica como adsorvente.** 2006. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- JODICKE, G.; FISCHER, U.; HUNGERBUHLER, R., Wastewater reuse: a new approach to screen for designs with minimal total costs. **Computers and Chemical Engineering**, v. 25, 2001.
- KARCI, Akin. Degradation of chlorophenols and alkylphenol ethoxylates, two representative textile chemicals, in water by advanced oxidation processes: The state of the art on transformation products and toxicity. **Chemosphere**, [s.l.], v. 99, p.1-18, mar. 2014. Elsevier BV.
- KUMAR, P Ratna et al. **Removal of arsenic from water by electrocoagulation.** Chemosphere, [s.l.], v. 55, n. 9, p.1245-1252, jun. 2004.
- KUNZ, A. et al. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química Nova**, Curitiba, v. 25, n. 1, p.78-82, jun. 2001.
- LEDAKOWICZ, S.; SOLECKA, M.; ZYLLA, R.. Biodegradation, decolourisation and detoxification of textile wastewater enhanced by advanced oxidation processes. **Journal Of Biotechnology**, Lodz, Poland, v. 89, p.176-184, jan. 2001.
- MANENTI, D. R. et al. Otimização das variáveis do processo foto-Fenton utilizando irradiação artificial na degradação de efluente têxtil. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, 2., 2010, Toledo. **Anais...** Bento Gonçalves, 2010, p. 8.
- MARTINS, L. M. et al. Aplicação de Fenton, foto-Fenton e UV/H₂ O₂ no tratamento de efluente têxtil sintético contendo o corante Preto Biozol UC. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Teresina, v. 16, n. 3, p.261-270, jun/set 2011.
- MATOS, Antonio T. et al. Efeito da concentração de coagulantes e do pH da solução na turbidez da água, em recirculação, utilizada no processamento dos frutos do cafeeiro. **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 27, n. 2, p.544-551, ago. 2007.

MEKSI, N.; KECHIDA, M.; MHENNI, F.. Cotton dyeing by indigo with the borohydride process: Effect of some experimental conditions on indigo reduction and dyeing quality. **Chemical Engineering Journal**, [s.l.], v. 131, n. 1-3, p.187-193, jul. 2007. Elsevier BV.

OLIVEIRA, D. M.; LEÃO, M. M. D.. Avaliação da biodegradabilidade de efluentes têxteis do beneficiamento secundário de malhas de poliéster tratados com reagente de fenton. **Química Nova**, Belo Horizonte, v. 32, n. 9, p.2282-2286, nov. 2009.

OLIVEIRA, M. H. de. **Principais matérias-primas utilizadas na indústria têxtil**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 5, p. 71-109, mar. 1997.

ONU. Assembleia Geral das Nações Unidas. **A ONU e a água**. 2017. Disponível em <<https://nacoesunidas.org/acao/agua/>>. Acesso em 20 mai. 2018.

PASCHOAL, F. M. M.; TREMILIOSI-FILHO, G. Aplicação da tecnologia de eletrofloculação na recuperação do corante índigo blue a partir de efluentes industriais. **Química Nova**, São Carlos, v. 28, n. 5, p.766-772, jun. 2005.

PEIXOTO, F. et al. Corantes têxteis: uma revisão. **Holos**, Fortaleza, v. 5, n. 29, p.98-106, out. 2013.

PIZATO, E. et al. Caracterização de efluente têxtil e avaliação da capacidade de remoção de cor utilizando o fungo *Lasiodiplodia theobromae* MMPI. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s.l.], v. 22, n. 5, p.1027-1035, 20 abr. 2017. FapUNIFESP.

QUEIROZ, M.T. A. et al. Gestão de resíduos na indústria têxtil e sua relação com a qualidade da água: estudo de caso. **Revista Iberoamericana de Engenharia Industrial**, Florianópolis, v. 8, n. 15, p.114-135, jan. 2016.

RIO GRANDE DO SUL. Resolução Consema nº 355/2017, de 19 de setembro de 2017. Dispõe sobre os critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para as fontes geradoras que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017a. Disponível em: <<http://www.sema.rs.gov.br/upload>>. Acesso em: 15 mai. 2018.

SANTOS, T. M. et al. Estudo do tratamento físico químico da água produzida utilizando *Moringa oleifera* Lam em comparação ao sulfato de alumínio. **Exacta**, [s.l.], v. 9, n. 3, p.317-322, 28 dez. 2011. University Nove de Julho.

SILVA, K. K. de O. S. **Caracterização do efluente líquido no processo de beneficiamento do índigo têxtil**. 2007. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

SOARES, I. C. da C. **Estudo da influência de diferentes grupos funcionais em corantes têxteis na aplicação de processos eletroquímicos oxidativos avançados (PEOAs) para descoloração e remediação de seus efluentes**. 2016. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

STRÖHER, A. P. et al. Tratamento de efluente têxtil por ultrafiltração em membrana cerâmica. **Exacta**, Maringá, v. 5, n. 1, p.39-44, jul. 2012.

TWARDOKUS, R. G. **Reuso de água no processo de tingimento da indústria têxtil**. 2004. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.