



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA ANALÍTICA E FÍSICO-QUÍMICA

CURSO DE QUÍMICA BACHARELADO

IGOR ALVES MARTINS

**APLICAÇÃO DE TRATAMENTO ELETROLÍTICO NA REMOÇÃO DE COR DE
EFLUENTE TÊXTIL**

FORTALEZA

2016

APLICAÇÃO DE TRATAMENTO ELETROLÍTICO NA REMOÇÃO DE COR DE EFLUENTE TÊXTIL

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Química do Departamento de Química Analítica e Físico-química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Química com Habilitação Industrial.

Orientador Pedagógico: Prof. Dr. Ronaldo Ferreira do Nascimento

Orientador Vocacional: Dr. Eliezer Fares Abdala Neto

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M343a Martins, Igor Alves.
Aplicação de tratamento eletrolítico na remoção de cor de efluente têxtil / Igor Alves Martins. – 2016.
70 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências,
Curso de Química, Fortaleza, 2016.

Orientação: Prof. Dr. Ronaldo Ferreira do Nascimento.

Coorientação: Prof. Dr. Eliezer Fares Abdala Neto.

1. Tratamento de efluentes. 2. Remoção. 3. Eletrocoagulação. I. Título.

CDD 540

IGOR ALVES MARTINS

APLICAÇÃO DE TRATAMENTO ELETROLÍTICO NA REMOÇÃO DE COR DE
EFLUENTE TÊXTIL

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Química do Departamento de Química Analítica e Físico-química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Química com Habilitação Industrial.

Aprovada em 08/07/2016

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ronaldo Ferreira do Nascimento (Orientador pedagógico)
Universidade Federal do Ceará

Dr. Eliezer Fares ^{el}Abdalá Neto (Orientador profissional)
Fábrica de Redes Isaac

Ms. Jefferson Pereira Ribeiro
Laboratório de Processos Oxidativos Avançados – Universidade Federal do Ceará

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, seguidamente a minha mãe, Vera Alves, que sempre me acompanha apesar de tudo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus e Nossa Senhora de Fátima dos quais sou fiel.

Aos meus familiares, principalmente minha mãe, meu pai e minha tia, Lucimar Alves, pela confiança depositada em mim durante todo prosseguimento de minha vida colegial e agora acadêmica.

Agradeço ao Programa de Educação Tutorial, incluindo todos os meus colegas de grupo, pelos esforços contínuos e juntos de forma a realizar sempre as melhores atividades a que se dispomos, as conversas, noites mal dormidas estudando e momentos eternos de aprendizado.

Agradeço também a minha tutora de PET, professora Wladiana Matos, pelos sinceros momentos de aprendizado mútuo, observações sempre feitas nas melhores horas e por fim ensinamentos que levarei para minha vida.

Ao grupo do Laboratório de Processos Oxidativos Avançados (LabPOA) da UFC pela grande oportunidade cedida à minha pessoa, o aprendizado, o convívio e as conversas sempre prazerosas.

Ao professor Dr. Ronaldo, ao meu orientador profissional Dr. Eliezer Abdala e ao doutorando Jefferson Ribeiro pela oportunidade de troca de conhecimentos e realizações junto ao grupo POA UFC.

Aos monografistas (Luiza, Davi, Amanda, Thiago e Licia) deste semestre (2016.1) que me acompanharam durante a árdua tarefa de escrever, tratar e discutir os dados obtidos durante o estágio os transcrevendo ao trabalho de conclusão de curso.

Agradeço especialmente ao grupo fraterno (são muitos nomes, por isso citarei subjetivamente o todo), ou melhor minha segunda família, que construí de amizades durante a minha graduação em química pela UFC, que neste momento tão corrido e estressante me proporcionou diversos momentos de lazer e esquecimento dos problemas que surgiam a cada dia.

Agradeço também as coisas simples no qual me deparei durante toda minha graduação, auxílios cotidianos, paisagens diárias vistas da janela de um ônibus, gentilezas urbanas e risos soltos, isso só demonstra quão bonita pode ser a vida e as sociedades quando observamos pequenos gestos que o viver pode nos proporcionar.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê” (Arthur Schopenhauer)

RESUMO

A legislação ambiental mostra-se cada vez mais rígida quanto aos resíduos gerados por diversas indústrias. A indústria têxtil em especial, possui a característica de utilizar grandes volumes de água e conseqüentemente produzir grandes quantidades de efluentes com uma alta carga de cor, além de substâncias orgânicas e inorgânicas que podem segundo estudos causar uma série de problemas ambientais. A degradação de compostos produzidos por esses tipos de indústria nos efluentes finais de produção vem sendo necessária. A eletrocoagulação por meio da oxidação dentre as técnicas em mercado atualmente apresenta-se como inovadora, de custo reduzido e atuação efetiva. Nesse trabalho, foi avaliado a eficiência de remoção de cor de dois efluentes distintos produzidos pela Fábrica de Redes Isaac, situada em Jaguaruana. O processo de remoção se deu através da tecnologia de eletrocoagulação/flotação por meio de uma Unidade de Tratamento Piloto, composta por três compartimentos de tratamento diferenciados, sendo um destes o reator, onde se realizava o processo eletrolítico. Os experimentos foram realizados em duas bateladas, sendo a primeira utilizando o efluente proveniente do beneficiamento geral da fibra e o segundo exclusivamente do tingimento, visando observar além da remoção de cor os parâmetros: pH, condutividade, temperatura, turbidez, alumínio, ferro, manganês e sólidos totais dissolvidos por meio de análises na fábrica e em laboratório. Os resultados demonstram que a técnica de eletrocoagulação na batelada 2 tratando o efluente proveniente do tingimento provocou o decréscimo de 60% no parâmetro cor real em relação ao valor bruto durante 45 minutos, enquanto a batelada 1 que utilizou-se o efluente proveniente do beneficiamento têxtil geral realizado pela fábrica, os resultados foram mantidos em 27% de remoção de cor real em relação ao efluente bruto durante 60 minutos. O pH em ambos os tratamentos oscilou de forma muito pequena e se manteve na faixa alcalina, a temperatura manteve-se estável, obtendo leve variação para o efluente da batelada 2, enquanto a condutividade devido ao excesso de sal no descarte final de ambos os efluentes tratados manteve-se elevada durante todo o tempo de tratamento. Os sólidos totais dissolvidos acompanharam os resultados de condutividade e se mantiveram elevados no efluente que possui maior condutividade. Nos elementos analisados obtiveram-se menores concentrações de cada um no tratamento com eficácia de 60%, batelada 2.

Palavras-chave: efluentes, eletrocoagulação/flotação e Unidade de Tratamento Piloto.

ABSTRACT

Environmental legislation gets stricter towards the residue generated by diverse industries. The textile industry, specially, has the characteristic of using big amounts of water and, therefore, it produces big quantities of highly colored effluents, besides organic and inorganic substances, which can generate a series of environmental disorders. It is being necessary the degradation of the compounds that are produced by this kind of industry on the final effluents. The oxidative electrocoagulation, among the techniques used nowadays, displays itself as an innovating technique, effective and a low cost technique. In this work, the efficiency of color removal from two different effluents was evaluated; both effluents were produced by Fábrica de Redes Isaac, sited in Jaguaruana. The removal process was based on the electrocoagulation/flotation technology in a Pilot Treatment Unity, which was composed by three compartments of differing treatments, being of these the reactor, in which the electrolytic process was done. The experiments were done in two batches, the first one being using the effluent from the general processing of the fiber and the second batch being using, exclusively, the dyeing, aiming to observe besides color removal, the parameters: pH, conductivity, temperature, turbidity, aluminum, iron, manganese, and total solid dissolved. It was done analysis in laboratory and at the factory. The results showed that the electrocoagulation technique on batch 2, which is the batch that used the effluent from the general processing of the factory, the results were kept in 27% of color removal in comparison to the brute effluent over 60 minutes. The pH in both treatments had very little oscillation and remained alkaline, the temperature stayed stable, with little variation on the batch 2 effluent, while the conductivity stayed high over all treatments, because of the salt excess of the final discard. The total of solids dissolved corroborate the conductivity results and remained high on the effluent that had the highest conductivity. The results obtained from the analyzed elements showed fewer concentrations of each of them on the 60% efficacy treatment, batch 2.

Keywords: effluents, electrocoagulation/flocculation, Pilot Treatment Unity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de uma estrutura química característica de um grupo cromóforo de um azocorante - em cor azul tem-se em destaque o grupo azo e em cor vermelho os auxocromos (grupos hidroxila e amino)	20
Figura 2 - Exemplo do processo de tintura do algodão com corante reativo contendo o grupo sulfatoetilsulfonila como centro reativo da molécula.	21
Figura 3 - Exemplo de corante direto: Vermelho Congo – contendo grupos diazo como cromóforos.....	21
Figura 4 - Diagrama representativo das disposições dos mecanismos que compõem a eletrocoagulação/flotação. (ECF: eletrocoagulação/flotação – EF: eletroflotação – EC: eletrocoagulação).....	26
Figura 5 - Diagrama de célula de eletrocoagulação-flotação com dois eletrodos.....	28
Figura 6 - Representação esquemática da dupla camada elétrica.....	29
Figura 7 - Fluxograma dos processos de beneficiamento dos fios de algodão Redes Isaac LTDA	35
Figura 8 - Unidade de Tratamento Piloto – Fábrica de Redes Isaac LTDA.....	36
Figura 9 - Gráfico que representa a evolução da cor conforme o tratamento realizado no efluente misto (processo de beneficiamento geral do algodão) contido no tanque 2. Em preto tem-se a cor aparente, em vermelho tem-se a cor real.	43
Figura 10 - Gráfico que representa a evolução da cor conforme o tratamento realizado no efluente proveniente do tingimento, contido no tanque 1. Em preto tem-se a cor aparente, em vermelho tem-se a cor real.....	44
Figura 11 - Eficiência de remoção de cor no tratamento do efluente misto (corrente contínua pulsada, agitação média).....	45
Figura 12 - Eficiência da remoção de cor no tratamento do efluente proveniente do tingimento (corrente contínua, agitação média).....	45
Figura 13 - Alíquotas tratadas por eletrocoagulação do efluente têxtil proveniente do beneficiamento completo têxtil da Fábrica de Redes Isaac.....	46
Figura 14 - Alíquotas tratadas por eletrocoagulação do efluente têxtil proveniente do tingimento da Fábrica de Redes Isaac.....	46

Figura 15 - Estrutura química do corante Reactive Orange 107.....	47
Figura 16 - Estrutura química do corante Reactive Blue 19.....	47
Figura 17 - Espectro de absorção na região do UV-Vis para as alíquotas do tratamento do efluente contido no tanque 2. Cada cor representa um tempo diferente na coleta da alíquota seguida para este efluente em específico.....	49
Figura 18 - Espectro de absorção na região do UV-Vis para as alíquotas do tratamento do efluente contido no tanque 1. Cada cor representa um tempo diferente na coleta da alíquota seguida para este efluente em específico.....	50
Figura 19 - Ampliação dos espectros de absorção no ultravioleta-visível das alíquotas coletadas durante o processo de tratamento por eletrocoagulação. (a) efluente misto proveniente do beneficiamento total do algodão – (b) efluente proveniente da etapa de tingimento.....	51
Figura 20 - Curva de distribuição de espécies do corante Reactive Orange 107.....	54
Figura 21 - Curva de distribuição de espécies do Corante Reactive Blue 19.....	55
Figura 22 - Variação da condutividade elétrica durante os 60 minutos de eletrocoagulação....	57
Figura 23 - Variação da condutividade elétrica do efluente proveniente do tingimento durante os 45 minutos de eletrocoagulação.....	59
Figura 24 - Representação gráfica dos valores contidos na tabela 11 para [Al], [Fe] e [Mn] durante os 60 minutos de eletrocoagulação.....	61
Figura 25 - Representação gráfica dos valores contidos na tabela 12 para [Al], [Fe] e [Mn] durante os 45 minutos de eletrocoagulação.....	62
Figura 26 - Representação do efluente bruto comparado ao efluente tratado, ambos provenientes do tingimento, por eletrocoagulação durante 45 minutos.....	64
Figura 27 - Resultados de turbidez obtidos durante o processo de eletrocoagulação. (a) efluente proveniente do beneficiamento geral da fibra, 60 minutos – (b) efluente proveniente do tingimento, 45 minutos.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sistemas de tratamento convencionais de efluentes e suas respectivas configurações	23
Tabela 2 - Composição química dos eletrodos de aço inoxidável 304 utilizado no reator de eletrocoagulação (% máximo em peso)	36
Tabela 3 - Especificações dos códigos adotados durante o procedimento experimental	38
Tabela 4 - Resultados de cor aparente e real para o processo de tratamento do efluente contido no tanque 2 (beneficiamento geral do algodão)	42
Tabela 5 - Resultados de cor aparente e real para o processo de tratamento do efluente contido no tanque 1 (processo de tingimento).....	43
Tabela 6 - Comprimento de onda da absorção de luz relacionado com a cor emitida em corantes orgânicos.....	48
Tabela 7 – Resultados das medições de pH para o tratamento do efluente contido no tanque 2 (efluente misto)	52
Tabela 8 - Resultados das medições de pH para o tratamento do efluente contido no tanque 1 (efluente proveniente do tingimento).	53
Tabela 9 - Medidas de condutividade elétrica, temperatura e sólidos totais dissolvidos obtidos durante o processo de tratamento do efluente misto (beneficiamento geral da produção fabril).....	57
Tabela 10 - Medidas de condutividade elétrica, temperatura e sólidos totais dissolvidos obtidos durante o processo de tratamento do misto proveniente do tingimento.....	58
Tabela 11 - Resultados das análises via método colorimétrico de alumínio, ferro e manganês para o efluente proveniente do beneficiamento geral da Fábrica de Redes Isaac (batelada 1)..	61
Tabela 12 - Resultados das análises via método colorimétrico de alumínio, ferro e manganês para o efluente proveniente do tingimento da Fábrica de Redes Isaac (batelada 2).....	61

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
2.	OBJETIVOS.....	16
2.1	Objetivo Geral.....	16
2.2	Objetivos Específicos	16
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	Caracterização do setor têxtil	17
3.2	Meio ambiente e procedimentos base na indústria têxtil	18
3.3	Tratamento de efluentes têxteis	22
3.3.1	<i>Remoção de cor por oxidação química</i>	23
3.3.2	<i>Remoção de cor por adsorção.....</i>	24
3.3.3	<i>Remoção de cor por membranas</i>	25
3.4	Eletrocoagulação	25
3.4.1	<i>Mecanismos do processo de eletrocoagulação</i>	26
3.5	Parâmetros físico-químicos avaliados	30
3.5.1	<i>Cor</i>	30
3.5.2	<i>Turbidez.....</i>	31
3.5.3	<i>Sólidos Totais dissolvidos</i>	31
3.5.4	<i>Ferro, Manganês e Alumínio</i>	32
3.5.5	<i>pH</i>	32
3.5.6	<i>Condutividade</i>	33
3.5.7	<i>Temperatura.....</i>	33
3.5.8	<i>Absorção no ultravioleta-visível</i>	34
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1	Realização da remoção de cor e tratamento do efluente na fábrica de Redes Isaac LTDA em Jaguaruana	35
4.1.1	<i>Batelada de tratamento do efluente misto (descarte 2).....</i>	37

<i>4.1.2 Batelada de tratamento do efluente proveniente do tingimento (descarte 1)</i>	37
4.2 Obtenção dos resultados dos parâmetros físico-químicos selecionados	38
<i>4.2.1 Parâmetros realizados in loco na Fábrica de Redes Isaac</i>	39
<i>4.2.2 Parâmetros realizados no Laboratório de Processos Oxidativos Avançados</i>	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1 Cor (real e aparente)	42
5.2 Absorção no Ultravioleta-Visível (UV-Vis)	48
5.3 pH	51
5.4 Condutividade, temperatura e sólidos totais dissolvidos (STD)	56
5.5 Alumínio, ferro e manganês	60
5.6 Turbidez	64
6. CONCLUSÃO	67
BIBLIOGRAFIA	68

1. INTRODUÇÃO

A atividade humana, seja ela industrial ou não é um grande agente gerador de resíduos. Os problemas devido a ação antrópica desenfreada no planeta vem causando a este sérios danos que continuamente são sentidos na forma de intempéries pelas sociedades. Um dos principais problemas que afeta as civilizações atualmente é o manejo e tratamento de altas cargas de efluentes gerados por indústrias e residências domiciliares, pois a oferta de água está cada vez mais escassa, mesmo em países como o Brasil que detém uma das maiores reservas hídricas do planeta Terra.

Dentro deste contexto o setor têxtil representa um dos grandes agentes geradores de resíduos, principalmente aquosos. As águas residuais provenientes das indústrias têxteis impõem sérios problemas ambientais e são fonte de potencial contaminação aquosa quando não tratados corretamente. O tingimento e as operações de acabamento da indústria têxtil produzem grandes quantidades de efluentes com altas cargas orgânica e inorgânica, além de elevada coloração. A quantidade de agentes eutrofizantes, como por exemplo surfactantes pode causar um desequilíbrio completo caso este tipo de efluente seja despejado em um corpo hídrico, a perturbação do equilíbrio ecológico é quase que inevitável. Estima-se que durante o tingimento cerca de 10-15% de corante seja perdido para o efluente (GUARATINI, ZANONI., 2000). Efluentes provenientes das etapas do processo fabril têxtil podem alterar propriedades físicas (turbidez, temperatura, condutividade, viscosidade, etc.), químicas (pH, DQO, DBO, concentração de metais e sais, etc.) e biológicas (espécies microscópicas em colônia na reserva hídrica natural).

A legislação empreende ao tratamento de efluentes de indústrias uma série de normas e regulamentações que cada vez mais vem se tornando rígidas. No caso da indústria têxtil a legislação aplicada ao controle dos rejeitos coloridos tem causado grandes impactos no processo produtivo devido a readequação de muitas fábricas ao modelo correto de responsabilidade ambiental.

Diante desses problemas, tecnologias associadas ao tratamento de efluentes são necessárias. Atualmente diversos métodos físicos, químicos e biológicos estão relatados em literatura, além de serem aplicados em grande escala visando a remoção dos resíduos gerados pelas sociedades. O objetivo principal da maioria destes tratamentos citados é realizar a transferência de fase do material que se interessa eliminar do efluente, além de se possível transformar substâncias que possuem elevado grau de toxicidade em compostos inertes

(mineralização) ou menos agressivos ao ambiente. Coagulação, flotação, adsorção e a utilização de membranas são técnicas físicas mais utilizadas. O tratamento biológico é mais utilizado no processo de remoção de resíduos dissolvidos no efluente, entretanto a cinética de degradação é limitada a alguns compostos, o que inviabiliza muitas vezes dependendo da matriz do resíduo seu tratamento por meio biológico.

O tratamento eletrolítico surge como uma alternativa para realizar a oxidação do material orgânico e mineralização do material inorgânico contido no efluente. A literatura demonstra que a utilização dos chamados Processos Oxidativos Avançados vem sendo mais implementada na remoção de uma gama diversa de poluentes, estes processos realizam a geração de radicais a base de oxigênio, dentre eles o destaque encontra-se com o radical hidroxila, que são potencialmente oxidantes para provocar a degradação da matéria orgânica ao dióxido de carbono e água, além da mineralização de elementos inorgânicos (ABDALA NETO, 2012). Comparado a outros métodos a eletrocoagulação (EC), apresenta-se como um mecanismo de tratamento de efluentes que envolve a liberação de agentes coagulantes *in situ* devido a oxidação dos eletrodos que montam o sistema, estes agentes coagulantes atuam como desestabilizantes dos poluentes emulsificados (coagulação-floculação) e por fim a ocorrência da sedimentação ou flotação dependendo da densidade do floco formado. Em relação a coagulação a EC elimina a necessidade de adição de produtos extras ao sistema, evitando uma carga maior de poluição secundária.

Dessa forma, a eletrocoagulação apresenta-se como alternativa potencial para o tratamento implementado a indústrias têxteis, pois atua diretamente na remoção da carga de cor gerada por partículas suspensas e coloides contidos no efluente final, possibilitando a adequação das fábricas a legislação ambiental, além de muitas vezes possivelmente promover o reuso de volumes de efluente tratado novamente no processo gerando economia de custos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Aplicar o processo de tratamento eletrolítico afim de realizar a remoção de cor do efluente gerado nas etapas dos processos que envolvem o beneficiamento têxtil realizado pela fábrica de Redes Isaac Ltda.

2.2 Objetivos Específicos

Operar a Unidade de Tratamento Piloto visando implementar a remoção de cor por meio de processo eletrolítico

Analisar *in situ* o parâmetro Cor aparente visando observação preliminar da eficácia do tratamento eletrolítico na remoção de cor do efluente em estudo.

Realizar outras medidas que correspondem a importantes parâmetros físico-químicos visando observar a evolução do processo de tratamento por eletrocoagulação.

Comparar os resultados de cor do efluente bruto inicial com os obtidos via processo de eletrocoagulação.

Avaliar os parâmetros físico-químicos extras selecionados do efluente inicial com os obtidos via processo de eletrocoagulação.

Apresentar possível destinação do efluente tratado após realizado o processo de tratamento por eletrocoagulação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Caracterização do setor têxtil

O surgimento da vestimenta remonta a tempos longínquos da humanidade, a necessidade de cobrir-se sempre foi condição tanto de sobrevivência quanto de apreço estético para o homem. Fiar e tecer constituem uma das formas mais antigas de trabalho humano, sendo que o aprimoramento destas técnicas remontam ao progresso de diversas sociedades (SINDITÊXTIL, 2014).

O processo de produção de tecidos antes da revolução industrial era baseado em teares que consumiam muito tempo de produção, além de exigirem muito do operário. Com o processo de industrialização o processo fabril têxtil ganhou roupagem mecanizada que empreende mais velocidade na fiação, grandes quantidades de produto final e maior qualidade dos tecidos.

A modernização que contempla este tipo de segmento atualmente possibilitou verdadeiras transformações no processo gerencial e de fabricação destas indústrias, grandes redes de infraestrutura foram criadas de forma que os segmentos produtivos foram bem estruturados e diversificados. Os processos como beneficiamento e fiação de fibras naturais e sintéticas além dos departamentos de malharias, tecidos, tingimento e estamparia apresentam grande empenho no quesito inovação e tecnologia (SINDITÊXTIL, 2014).

Os lançamentos são constantes no mercado têxtil e de confecções mundial, cerca de quatro vezes no mínimo por ano são lançados novos produtos, em 2010 o consumo *per capita* mundial de fibras era de 11,6 Kg/habitante (ABIT, 2013).

O setor têxtil brasileiro reúne 32 mil empresas em seu território, das quais mais de 80% são confecções de pequeno e médio porte, além disso emprega cerca de 1,7 milhão de pessoas (ABIT, 2013), todos esses dados colocam o Brasil como quarto maior produtor mundial de artigos de vestuário e quinto colocado quanto se trata de manufaturas têxteis.

Grande parte da produção de artigos de vestuário do Brasil é voltada para o consumo interno, e somente cerca de 2,5% é destinada à exportação (ABIT, 2013), o consumo dessa produção interna vem apresentando queda devido ao mercado instável e principalmente afetado pela concorrência de produtos importados.

A industrialização de tecidos no Ceará em específico somente ocorreu nas duas últimas décadas do século XIX, apresentando uma conotação histórica voltada a suprir demandas mais tarde das duas grandes guerras mundiais (SINDITÊXTIL, 2014). Durante o processo de estabelecimento das indústrias têxteis no estado do Ceará diversos pólos foram criados visando unir forças contra as ameaças externas e intempéries pelo qual estado passava, um destes pólos trata-se do implantado em Jaguaruana, município localizado no Vale do Jaguaribe.

Jaguaruana abriga 56 unidades produtivas no setor de tecidos, em sua maioria essas unidades fabricam redes de dormir e mantas além de fios para tecer. Este tipo de atividade representa 41,2% do Produto Interno Bruto (PIB) do município, ressaltando assim a importância deste pólo a nível regional (SINDITÊXTIL, 2014).

O setor têxtil em especial o cearense tem investido tempo e recursos para se posicionar perante redes internacionais de fabricantes. Com o impulso de novas tecnologias observa-se a tendência a agregação de valor maior aos produtos internos, o que possibilita investimento em aprimoramento de gestão, rapidez na produção, e uma comunhão entre produto final e a consciência ambiental.

3.2 Meio ambiente e procedimentos base na indústria têxtil

Nas últimas décadas os problemas ambientais têm se tornado cada vez mais críticos devido em sua maioria ao grande crescimento das sociedades e a intensificação da atividade industrial, junto a essas duas problemáticas pode-se inserir a atividade antrópica desenfreada. É explícito que a contaminação das águas naturais trata-se de um grande problema das civilizações contemporâneas, a economia de água vem ganhando bastante atenção devido a legislações e ao grande valor agregado a este bem (KUNZ *et al.*, 2002).

O processo de produção da indústria têxtil é conhecido mundialmente pelo alto consumo de água (80-100 m³/ tonelada de tecido acabado), consequentemente altas cargas de efluente provenientes da produção dessas unidades são geradas (MARCELINO, *et al.*, 2013). A água em sua maioria é utilizada para a limpeza da matéria prima, além de diversas lavagens ao longo da produção, o resultado dessas etapas caracterizam efluentes com grande presença de cor devido em muitos casos a não fixação do corante a fibra no processo de tingimento (KUNZ *et al.*, 2002).

Além da alta carga de corantes, efluentes têxteis são caracterizados ainda pela variedade de insumos químicos extras utilizados durante o beneficiamento de tecidos. A principal composição final pode conter: corante residual, sais, composição alcalina/ácida, substâncias químicas auxiliares e solventes de limpeza (KHANDEGAR; SAROHA., 2013), isso confere a tal resíduo uma complexidade que pode dificultar seu tratamento.

Os principais processos que caracterizam a indústria têxtil de forma geral são: dimensionamento, lavagem, mercerização, tingimento, impressão e acabamento (KHANDEGAR; SAROHA., 2013). Dos processos citados anteriormente o que mais impacta na característica ambiental em relação ao efluente final gerado é o tingimento.

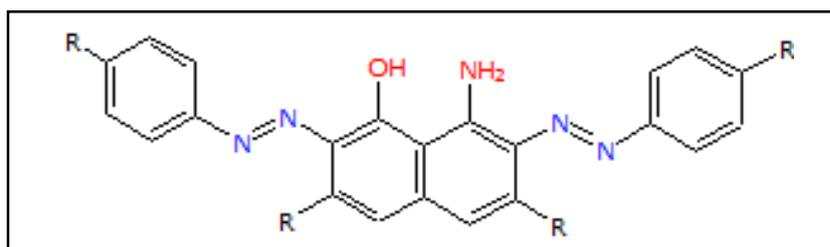
A etapa do tingimento representa a fase de utilização dos corantes responsáveis pela cor e estética da peça final. Nesta etapa uma grande quantidade de corante não adere a fibra como desejado, esse excedente é perdido para a água de lavagem, dessa forma, altas cargas de corantes são liberados no efluente final, esses corantes em sua maioria possuem boa hidrossolubilidade e são hidrolisados a formas insolúveis que são mantidas na água residual final do processo de tingimento. Estima-se que cerca de 10-15% de corante é perdido para o efluente (KHANDEGAR; SAROHA., 2013). Segundo pesquisa da *Ecological and Toxicology Association of the Dyestuffs Manufacturing Industry* (ETAD) que testou 120 corantes utilizados na produção mundial de fibras coloridas, cerca de 90 apresentaram toxicidade, podendo conter substâncias cancerígenas, mutagênicas ou teratogênicas para várias espécies de um ecossistema, incluindo o ser humano (MARCELINO, *et al.*, 2013).

Apesar das contraposições corantes são de grande importância para a civilização humana, que os utiliza extensivamente na indústria têxtil, gráfica, fotográfica e como aditivos (KUNZ *et al.*, 2002).

É de grande importância obter conhecimento sobre a composição estrutural dos corantes utilizados durante o tingimento, pois diversas especificações, que incluem o tipo de corante utilizado, podem levar a um dimensionamento correto sobre o tratamento do efluente final gerado. A molécula do corante pode ser dividida em duas partes principais, o grupo cromóforo e a estrutura responsável pela fixação da fibra. Em corantes têxteis, a parte da molécula que representa o cromóforo pode variar, entretanto, o grupo cromóforo mais representativo e amplamente utilizado pertence à família dos azocorantes, que são caracterizados por apresentarem um ou mais grupamentos azo (-N=N-) ligados a sistemas aromáticos (GUARATINI; ZANONI., 2000). Além dos cromóforos outra parte estrutural importante da molécula são os auxocromos, representados tipicamente no caso de corantes

têxteis pelos grupamentos: carbonila ($-C=O$), hidroxila ($-OH$) e amino ($-NH_2$). Esses grupos de uma forma geral são responsáveis modificar as absorções dos corantes no visível, conseqüentemente atuam diretamente na cor refletida definindo o padrão de cor comercial do corante utilizado (KHANDEGAR; SAROHA., 2013).

Figura 1. Exemplo de uma estrutura química característica de um grupo cromóforo de um azocorante - em cor azul tem-se em destaque o grupo azo e em cor vermelha os auxocromos (grupos hidroxila e amino).

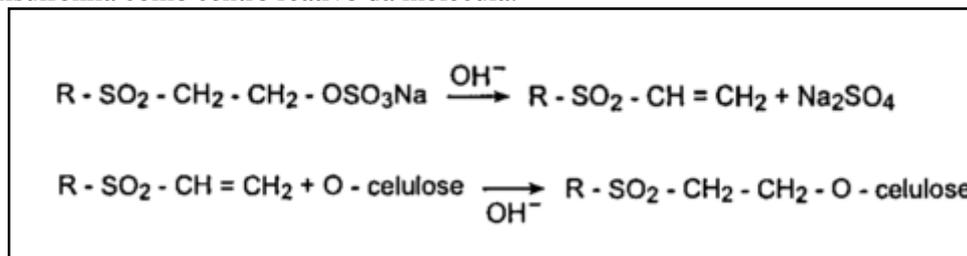


Fonte: GUARATINI; ZANONI, 2000.

A classificação dos corantes pode ser realizada de duas formas: de acordo com a sua estrutura química ou conforme o método de fixação na fibra têxtil. O método de classificação a partir da fixação na fibra é mais utilizado devido à restrição simples ao tipo de matéria-prima que se está utilizando, ou seja, isso confere uma agilidade no processo fabril com uma gama menor de denominações. Os principais tipos são os corantes do tipo reativos e os do tipo diretos devido a ampla utilização nos galpões de indústrias têxteis.

Corantes reativos são assim denominados pois em sua estrutura molecular possuem um grupo eletrofílico (reativo) capaz de formar ligações covalentes com grupos hidroxila das fibras celulósicas, com grupos amino, hidroxila e tióis de fibras proteicas, além de grupos aminos de poliamidas (GUARATINI; ZANONI., 2000). Uma grande gama de corantes desse tipo encontra-se disponível, entretanto os mais representativos são os que contém a função azo e antraquinona como grupos cromóforos e grupos clorotrizilina e sulfatoetilsulfonila como grupos reativos. São mais duráveis devido a formação de ligação química, além de possuírem boa solubilidade em água.

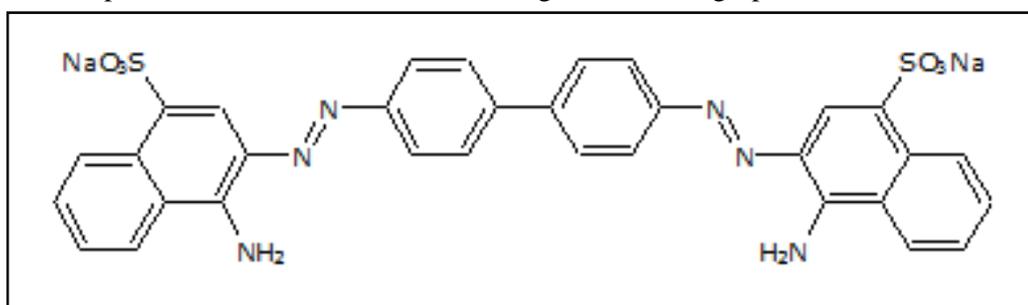
Figura 2. Exemplo do processo de tintura do algodão com corante reativo contendo o grupo sulfatoetilsulfonila como centro reativo da molécula.



Fonte: GUARATINI; ZANONI, 2000.

Corantes diretos caracterizam-se pela solubilidade em água, sendo capazes de tingir fibras de celulose (algodão, viscose, etc.) através de interações de Van Der Waals (GUARATINI; ZANONI, 2000). Este tipo de corante tem uma afinidade pela fibra no processo de tingimento aumentada pelo uso de eletrólitos como sais, a adsorção portanto é favorecida. Esta classe de corantes é constituída principalmente por corantes contendo mais de um grupo azo (diazó, triazo, etc.), ainda fazem partes moléculas pré-transformadas em complexos metálicos.

Figura 3. Exemplo de corante direto: Vermelho Congo – contendo grupos diazo como cromóforos.



Fonte: GUARATINI; ZANONI, 2000.

As principais diferenças a nível industrial entre os dois tipos de corantes anteriormente citados se dá em relação ao custo, sendo o corante direto mais acessível, porém devido a sua fraca interação com a fibra necessita de grandes volumes de banhos durante a etapa de tingimento, provocando a geração de uma quantidade exacerbada de efluente final (KUNZ *et al.*, 2002).

O restante da classificação dos corantes traz estruturas bem específicas que demandam atenção especial em relação ao processo de tingimento, pois em alguns casos a síntese do corante necessário para imprimir cor a fibra é sintetizado no próprio tecido, sendo portanto necessário controles de banhos de tingimento.

A eficácia na descolorização de um efluente que contém corantes no geral está diretamente atrelada ao grupo cromóforo que compõe a estrutura molecular do corante, além desses, os auxocromos podem afetar a remoção de cor (KHANDEGAR; SAROHA., 2013). A quebra ou possível degradação desses sítios na molécula está ligada a diminuição de cor emitida pelo corante ou formação de outras espécies que não mais emitem cor no visível, isso portanto pode justificar a importância de se ter conhecimento da estrutura do corante de trabalho.

A baixa biodegradabilidade de insumos da indústria têxtil aliada a legislação ambiental bem mais severa leva ao contingenciamento de estudos nessa área. Estudos apontam alguns corantes azo como potencialmente mutagênicos para organismos que vivem em ambientes aquáticos, cuja a estabilidade das estruturas moleculares provenientes deste tipo de corante são altamente recalcitrantes e de resistência a degradação natural do qual entra em contato (AOUDJ *et al.*, 2010).

3.3 Tratamento de efluentes têxteis

Diante de uma maior atenção em relação aos problemas ambientais que o efluente gerado durante o processo de beneficiamento têxtil pode causar, o tratamento desse tipo de água residual torna-se indispensável. Como anteriormente citado, parcialmente o principal problema que envolve o tratamento de efluente têxtil corresponde ao alto nível de cor final que este apresenta.

Na maioria das vezes, estações convencionais de tratamento biológico de efluentes possuem remoção insuficiente de compostos que estão atrelados a geração de cor no efluente, uma vez que em sua maioria são substâncias orgânicas não biodegradáveis (MARCELINO, *et al.*, 2013).

Na tabela 1 encontram-se simplificados tipos de tratamento, processo e operações unitárias de uma forma geral que podem ser utilizadas para os mais diversos tipos de efluentes.

Tabela 1. Sistemas de tratamento convencionais de efluentes e suas respectivas configurações

Tratamento	Tipo de processo	Operação Unitária
Primário	Físico	Equalização, Gradeamento, Clarificação, Sedimentação, Flotação
	Químico	Neutralização, Precipitação
Secundário	Biológico	Lodos ativados, Lagoas de estabilização, Filtros biológicos
	Físico	Cravão ativado, Ultrafiltração
Terciário	Químico	Coagulação, Ozonização, Processo Oxidativo Avançado, Eletrocoagulação.
	Físico	Osmose reversa, Evaporação
Avançado	Físico	Osmose reversa, Evaporação

Fonte: ANDRADE, 2003.

Os processos convencionais de tratamento físico-químico de clarificação de efluentes têm por objetivo aglutinar partículas em suspensão (1-100 μ m) com adição de coagulantes ou floculantes de forma a promover a redução de sólidos em suspensão e coloidais para uma fase sólida única (CAVALCANTI, 2009). Estes tipos de processos demandam etapas que garantem a eficiência de remoção, coagulação química, floculação e sedimentação/flotação unidos a neutralização representam uma marcha sensível a fatores do efluente de trabalho, principalmente ao pH.

Apesar de reduzir significativamente o nível de material em suspensão, os processos convencionais são ditos não destrutivos, limitando-se ao caso de não se ter um efluente muito colorido (corantes dissolvidos), conseqüentemente sua utilização individual para o caso do efluente gerado no processo fabril têxtil é limitado (KUNZ *et al.*, 2002).

Guarati & Zanoni (2000), Kouba & Ping (1994), Robinson et al (2000) realizaram investigações em relação a remoção de cor de efluentes têxteis, Estas envolvem processos de adsorção, precipitação, degradação química, eletroquímica e fotoquímica entre outros, um resumo dos principais aspectos e processos são descritos a seguir:

3.3.1 Remoção de cor por oxidação química

Como o próprio título já sugere este tipo de processo se baseia em reações oxidativas como mecanismo de degradação de compostos recalcitrantes presentes no efluente. Os Processos Oxidativos Avançados (POA) são os representantes mais fidedignos a essa técnica de remoção, cujo objetivo se centra na geração de radicais livres a base de oxigênio *in situ* que agem como fortes agentes oxidantes de compostos que dificilmente iriam ser oxidados

via depuração biológica (AMORIM, *et al.*, 2009). As técnicas de degradação baseadas por exemplo no uso de ozônio tem-se mostrado mais eficiente em relação a técnicas que fazem uso de cloro quando se leva em conta a remoção de alguns tipos de corantes (dispersos e diretos), além de uma grande vantagem de não produzirem íons inorgânicos. Remoções utilizando processos de Fentom e Foto-Fentom vem relatando remoções de até 100% de cor e 98% de Carbono Orgânico Total (COT) (PÉREZ, *et al.*, 2002).

Sendo assim é observado que bons resultados de descolorização e mineralização em estudos com efluentes têxteis são obtidos via degradação por oxidação química. Dentro dos Processos Oxidativos Avançados a oxidação via eletroquímica também vem sendo desenvolvida e mais utilizada quando se trata de efluentes têxteis, a eletrocoagulação tem uma grande capacidade de adsorção e degradação removendo tanto matéria orgânica solúvel como material em suspensão ou insolúvel (MARTINS, *et al.*, 2007).

3.3.2 Remoção de cor por adsorção

A adsorção envolve um mecanismo de separação de substâncias orgânicas e inorgânicas contidas no efluente sobre uma interface entre um líquido e um sólido, ou seja o contato entre o sólido e um fluido propicia uma transferência de massa de fase fluída para a superfície do sólido, havendo portanto acumulação de material sobre a superfície do sólido (CAVALCANTI, 2009). Apesar da dinâmica simples o processo de adsorção pode sofrer a ação de diversos fatores que vão desde o tempo de contato até a concentração do material que se deseja remover, além disso em muitos casos custos elevados com adsorventes específicos e a não possibilidade de recuperar o material adsorvente em alguns casos revelam desvantagens deste tipo de processo de remoção de cor (GROVER, *et al.*, 2011).

O carvão ativado é o adsorvente mais utilizado, porém sua ineficácia na remoção de corantes dispersos e pigmentos limita sua aplicação (ANDRADE, 2003). Suas formas mais utilizadas são em formato granular e em pó, em ambos formatos sólidos suspensos representam uma problemática no processo de utilização.

3.3.3 Remoção de cor por membranas

Os processos que se baseiam na remoção por membrana envolvem a separação líquido/líquido e são denominadas segundo as dimensões moleculares da substância que se deseja separar do meio. Assim, através de aplicação de elevadas pressões na solução, esta permeia por meio da membrana que funciona como filtro molecular (CAVALCANTI, 2009). Sendo assim, as membranas representam um fator crucial neste tipo de tratamento, dependendo de qual está sendo utilizada, substâncias de distintos pesos moleculares pode ser separadas.

Membranas de nanofiltração ou ultrafiltração são as mais convenientes quando se trata de efluentes têxteis, cujo as cores finais podem ser concentradas em até 1% do seu volume original (ANDRADE, 2003). Vale ressaltar que a disponibilidade e o despendimento monetário serão fatores não vantajosos para o caso dessa técnica de remoção.

3.4 Eletrocoagulação

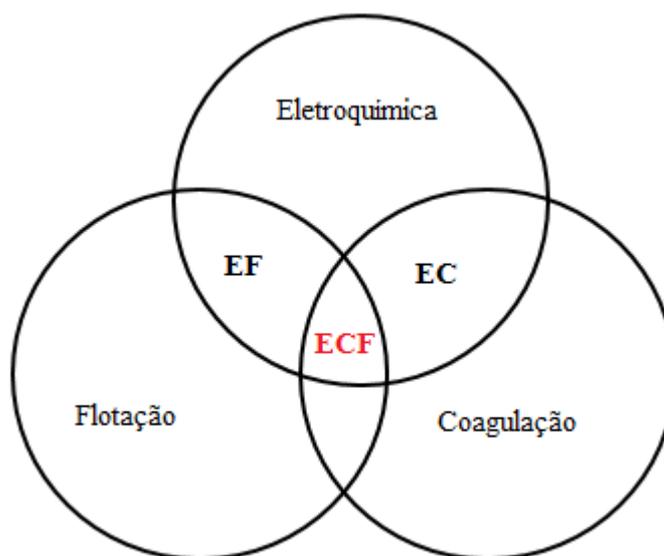
Em um histórico simplificado a técnica de eletrocoagulação se intensificou a partir do século XIX na área de tratamento de efluentes nas fábricas de Londres. Entretanto, plantas piloto de estações de tratamento com esse tipo de processo somente vieram a se perpetuar a partir de 1911 nos Estados Unidos, estas estações utilizavam anodos consumíveis de ferro e alumínio viabilizando geração *in loco* de íons metálicos por meio de processo eletroquímico, posteriormente estes íons eram hidrolisados e funcionavam como agentes coagulantes (COMNINELLIS, GUOHUA., 2010).

De uma forma geral, o processo de eletrocoagulação/flotação trata-se de uma técnica de remoção de poluentes que consiste em um tratamento eletrolítico no qual eletrodos de sacrifício consumíveis são utilizados para produzir agentes coagulantes em solução (EMAMJOMEH; SIVAKUMAR., 2009). Isso somente é possível a partir da aplicação de uma tensão elétrica através dos eletrodos que compõem a célula de eletrocoagulação, assim os íons metálicos que correspondem a composição dos eletrodos que estão sendo utilizados como anodos representam uma alternativa a utilização de sais metálicos ou polímeros responsáveis por desestabilizar as emulsões e suspensões contidas no efluente.

Comparado ao processo de coagulação química, a eletrocoagulação possui a vantagem de gerar *in situ* os íons que funcionam como agente coagulante, além disso segundo

Silva, (2013) partículas coloidais de tamanho reduzido são removidas. NETO (2012), ressalta que a passagem de corrente elétrica pelo efluente que contém contaminantes diversos, além de representar a coagulação imediata de partículas suspensas, promove a oxidação de compostos dissolvidos, substituição iônica entre os eletrólitos inorgânicos e os sais orgânicos com a redução drástica da matéria orgânica dissolvida. Dessa forma, esta técnica apresenta viabilidade característica quando se leva em conta efluentes têxteis, cujo a remoção de corantes dissolvidos responsáveis em sua maioria pela cor é de suma importância.

Figura 4. Diagrama representativo das disposições dos mecanismos que compõem a eletrocoagulação/flotação. (ECF: eletrocoagulação/flotação – EF: eletroflotação – EC: eletrocoagulação)



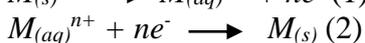
Fonte: EMAMJOMEH; SIVAKUMAR, 2009 – adaptado.

2.4.1 Mecanismos do processo de eletrocoagulação

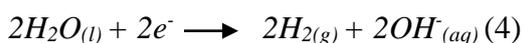
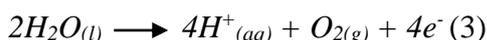
Os processos que contemplam a técnica de eletrocoagulação possuem mecanismos que operam simultaneamente afim de remover partículas e poluentes de um efluente (MOLLAH *et al.*, 2004) e envolvem diretamente fenômenos físico-químicos.

A figura 5 demonstra os principais mecanismos que ocorrem no processo de eletrocoagulação (EC), podendo ser resumidos em: coagulação, precipitação, sedimentação e floculação.

Segundo Comninellis, Guohua., (2010), o metal que compõe o ânodo é hidrolisado instantaneamente ao ser liberado em solução e forma hidróxidos poliméricos na vizinhança do ânodo, a especiação do coagulante representa grande importância na eletrocoagulação (EC), pois dependendo da espécie o cátion metálico liberado pode formar complexos monoméricos ou poliméricos, como também hidróxido de metal. O pH e a concentração do íon metálico em solução são fatores determinantes dessa especiação. A coagulação, portanto, acontece quando os cátions metálicos liberados em solução se combinam com as partículas carregadas negativamente movidas para o ânodo pelo efeito eletroforético, causando sua desestabilização. Contaminantes e sólidos em suspensão presentes na água residual são tratados tanto por reações químicas e precipitação ou interações físicas e químicas aos materiais coloidais que estão sendo gerados na oxidação do eletrodo (MOLLAH *et al.*, 2004). As reações que representam a oxidação e redução do metal (M) que ocorrem na superfície do eletrodo durante a eletrocoagulação estão representadas pelas equações (1) e (2) respectivamente.

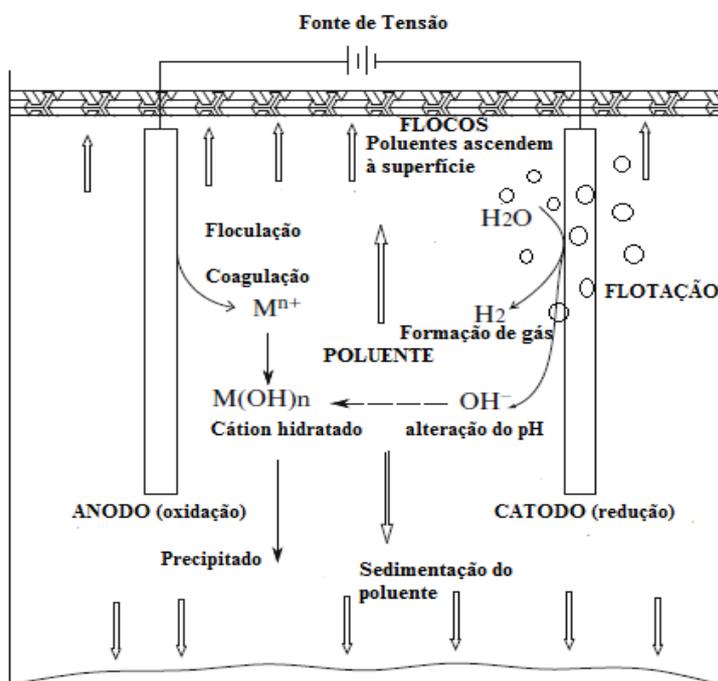


Em paralelo ao processo descrito acima, ocorrem a oxidação e a redução da molécula de água, notadamente pela produção de bolhas observadas durante o processo. No catodo gás hidrogênio (H₂) é produzido, já no anodo gás oxigênio (O₂). O processo é mais facilmente observado nas equações (3) e (4).



Esse gás produzido é responsável pelo arraste dos flocos formados no processo de eletrocoagulação promovendo a clarificação do efluente (eletroflotação), vale ressaltar que este tipo de mecanismo depende da densidade do floco, em alguns casos a sedimentação é mais observada.

Figura 5. Diagrama de célula de eletrocoagulação-flotação com dois eletrodos.



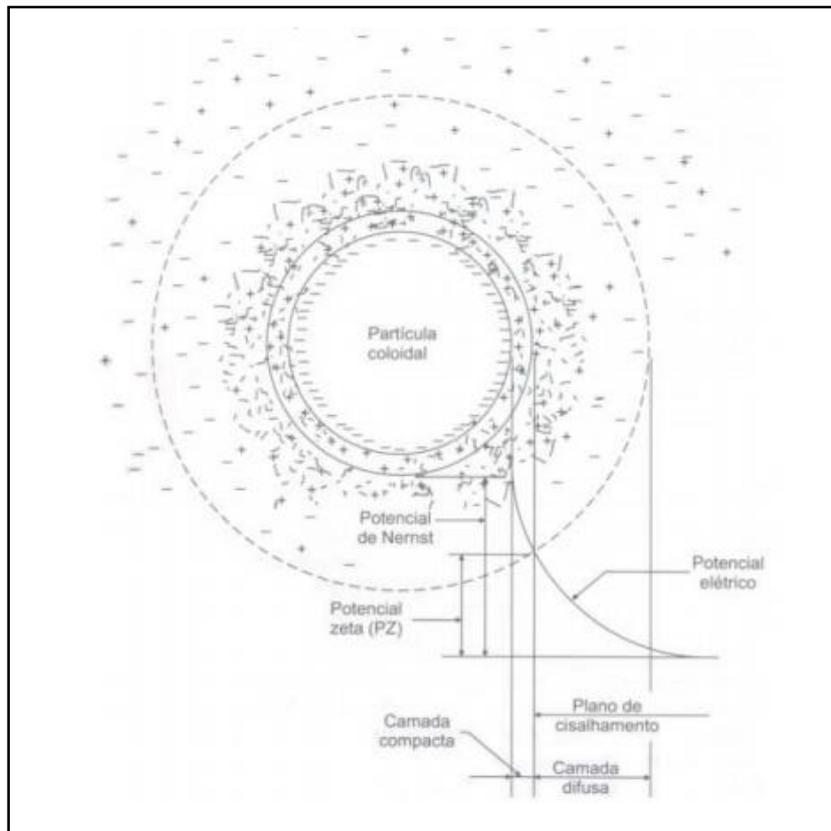
Fonte: CHEN, 2010

O mecanismo de coagulação está inserido dentro dos processos que ocorrem simultaneamente durante a eletrocoagulação, este tipo de mecanismo é resultado de quatro ações distintas descritas a seguir:

a) Compressão da dupla camada elétrica

A introdução de um eletrólito indiferente, ou seja, o qual não tem característica de hidrólise ou de adsorção em um sistema coloidal causará o aumento na densidade de cargas na camada difusa e diminuirá a esfera de influência das partículas, ocorrendo a coagulação da partícula por meio da compressão da dupla camada difusa. Cargas elevadas de íons em solução provocam a redução máxima dessa esfera, eliminando a estabilização eletrostática e aumentando as forças de Van Der Waals, essas últimas possuem uma força menor e propiciam a ação do coagulante de uma forma mais eficaz (DI BERNARDO, 2005).

Figura 6. Representação esquemática da dupla camada elétrica.



Fonte: DI BERNARDO, 2005.

a) Adsorção e Neutralização

Três tipos de interações podem ocorrer quando se trata de efluentes industriais: coagulante-coloide, coagulante-solvente e coloide-solvente (DI BERNARDO, 2005). Como o coagulante se dissolve, os cátions servem para neutralizar a carga negativa que o coloide possui, isso ocorre antes da formação visível do floco, sendo que a agitação vigorosa é eficaz nessa etapa. No caso de espécies hidrolisadas de alumínio e ferro, metais mais tipicamente utilizados como eletrodos em eletrocoagulação é comum ocorrer adsorção específica causadas pela interação coagulante-coloide.

b) Varredura

Dependendo da quantidade adicionada de coagulante, pH do efluente e a concentração de certos íons na água, hidróxido de metais $M(OH)_n$ podem ser formados e iniciar a precipitação imediata (ECKENFELDER, 2000). Flocos obtidos com esses hidróxidos são maiores podendo aumentar a aglomeração de coloides favorecendo a eficácia de remoção dos contaminantes do efluente. Coloides não adsorvidos inicialmente podem ser removidos por emaranhamento no floco final.

Sendo assim, Mollah *et al.*, (2004) descreveu o processo de desestabilização de contaminantes, partículas em suspensão e quebra de emulsões em estágios. Primeiramente ocorre o processo já descrito da compressão da dupla camada difusa em torno das espécies carregadas pela interação com os íons gerados pela oxidação do ânodo consumível. A neutralização das cargas das espécies iônica presente no efluente representa o segundo estágio, os contra-íons liberados pela dissolução eletroquímica do anodo de sacrifício diminuem a repulsão eletrostática entre partículas, as interações de Van Der Waals prevalecem, estas últimas são de pouca força, favorecendo o processo de coagulação do contaminante. O terceiro e último estágio representa a formação do floco. Os coágulos formados durante a coagulação unem-se em aglomerados criando uma manta de lodo que arrasta as partículas coloidais que ainda não foram desestabilizadas. Os flocos formados podem sedimentar ou flotar dependendo da densidade.

3.5 Parâmetros físico-químicos avaliados

Parâmetros físico-químicos são importantes formas de avaliação da eficácia do tratamento que se está realizando em um tipo de efluente. O controle de cada parâmetro está associado ao possível destino final que se dará ao efluente tratado, ressaltando que dependendo disso a reutilização poderá ser viabilizada.

3.5.1 Cor

A cor de uma amostra de água está associada ao grau de redução da intensidade que a luz sofre ao atravessá-la, devido à presença de sólidos dissolvidos, principalmente material em estado coloidal orgânico e inorgânico. Além do aspecto estético desagradável, este parâmetro pode esconder substâncias em potencial altamente tóxico devido a matéria orgânica

dissolvida, muitas vezes principal responsável pela cor em um efluente. Um exemplo de que a cor deve ser utilizada como um indicador importante se dá em processos de cloração. A matéria orgânica oxidada pelo cloro (Cl_2) pode gerar substâncias conhecidas como trihalometanos (THMs), estas últimas têm características de serem cancerígenas (VON SPERLING, 1995).

Segundo APHA, 2005 o parâmetro cor se difere em duas classificações: cor real e aparente. A turbidez interfere diretamente neste tipo de parâmetro, portanto efluentes com elevada turbidez causam erros nas medidas de cor, sendo assim a medida de cor aparente representa um resultado no qual as partículas em suspensão (turbidez) causam reflexão e dispersão da luz somando-se a carga de cor real que o efluente possui. A cor real é obtida com a eliminação desses índices de turbidez. A unidade que representa cor é uH (unidade de Hazen) ou padrão Pt-Co (Platina – Cobalto).

3.5.2 Turbidez

Representa o grau de atenuação de intensidade que um feixe de luz sofre ao atravessar uma determinada amostra de água, devido à presença de sólidos em suspensão, tais como partículas inorgânicas e detritos orgânicos, algas, bactérias, plâncton, dentre outros. Apesar de como a cor representar diretamente um parâmetro estético, apresenta uma importante característica operacional quando se está realizando o mecanismo de eletrocoagulação (EC) - sedimentação. O acompanhamento direto deste parâmetro quando tem-se a EC demonstra a carga de flocos e sedimentos que se está inserindo no efluente, isso é obtido em comparação ao efluente bruto sem tratamento, ao final da carga de experimentos e medidas de turbidez tem-se um indicativo do aspecto que se encontra o efluente (APHA, 2005). A unidade que representa a turbidez é a uT (Unidade de turbidez – Unidade de Jackson ou Nefelométrica UNT) (VON SPERLING, 1995).

3.5.3 Sólidos Totais dissolvidos

Sólidos correspondem a toda matéria que permanece como resíduo dissolvido ou em suspensão em um efluente. Águas com alto teor de sólidos dissolvidos são de potabilidade baixa podendo causar severas contaminações dependendo do poluente ou da matéria orgânica que esta contém. A avaliação desse parâmetro revela a distribuição das partículas com relação ao tamanho (suspensão ou dissolvidos), natureza (fixos ou minerais – voláteis ou orgânicos), não sendo uma forma totalmente definitiva, trata-se de uma informação preliminar importante,

pois metas poderão ser tomadas a partir dos resultados observados. Em tratamentos biológicos representam importantes informações em relação a concentração de organismos decompositores de matéria, além de avaliar a quantidade de sólidos fixos ou minerais do lodo (APHA, 2005).

3.5.4 Ferro, Manganês e Alumínio

Esses três elementos são encontrados naturalmente em amostras de águas naturais devido em grande parte a processos de lixiviação dos solos que contém concentrações significativas dos mesmos. Vale ressaltar que ocorre uma variação devido aos tipos de solo e ao contato direto com os espelhos de água ou lençóis freáticos (VON SPERLING, 1995). Na ausência de oxigênio dissolvido no corpo d'água, manganês e ferro se apresentam na forma solúvel, entretanto a exposição desta água a livre atmosfera provoca a oxidação desses íons solúveis e conseqüentemente provoca a formação de espécies insolúveis que prejudicam diretamente outros parâmetros físico-químicos. Cor está entre um dos parâmetros mais afetados devido à presença destes dois metais no corpo d'água em sua forma insolúvel. Para o caso do alumínio tem-se uma característica especial em relação ao pH. A espécie solúvel (Al^{3+}) é modificada conforme o pH se torna mais básico, conseqüentemente este afeta diretamente no processo de alcalinidade/acidez do corpo hídrico. O cátion Al^{3+} prevalece em pH menor que 3, já em valores de pH acima de neutro a espécie $Al(OH)_4^-$ é majoritária (POHLING, 2009).

3.5.5 pH

Potencial hidrogênionico representa a concentração de íons hidrogênio H^+ , e, escala anti-logarítmica, dando uma condição sobre a acidez, neutralidade ou alcalinidade do efluente ou amostra analisado (VON SPERLING, 1995). Este tipo de parâmetro é um dos mais importantes quando se realiza a análise de amostras de água. Por influir em diversos equilíbrios químicos que ocorrem naturalmente ou em processo de tratamento, possui uma atenção especial ao ser realizado estudos na área. Diversos fatores dentre eles: gases, sólidos dissolvidos, entre outros provocam variação em valores na escala de pH (APHA, 2005).

No processo de tratamento por eletrocoagulação é fator crucial nos mecanismos de coagulação pois nitidamente interfere nas reações químicas que ocorrem durante a utilização desta técnica, além de contribuir para a variação de solubilidade de diversas espécies, inclusive contaminantes contidos na amostra de efluente a ser tratada (COMNINELLIS, GUOHUA., 2010).

3.5.6 Condutividade

É um parâmetro que está associado a capacidade da amostra água ou efluente transportar corrente elétrica, sendo que esta capacidade depende da presença dos íons, sua concentração, mobilidade e valência são fatores determinantes no processo de condutância. A unidade que representa este parâmetro é o Siemens (S)/cm (APHA, 2005).

A condutividade tem ação direta no processo de eletrocoagulação, quando apresenta-se em valores baixos a eficiência do sistema de tratamento irá diminuir, altos potenciais para barrar esse problema são requeridos, entretanto outro impasse pode ser gerado, a passivação do eletrodo prejudicando mais ainda o tratamento via método eletrolítico (COMNINELLIS, GUOHUA., 2010).

3.5.7 Temperatura

A temperatura é uma condição muito importante para processos biológicos e industriais em relação à questão de tratamento de efluentes. Reatores que contenham biotas como processo de tratamento por exemplo necessitam de temperaturas mais elevadas, além disso tem-se o fato de que processos físico-químicos e reações em relação a espontaneidade são altamente dependentes deste fator. A unidade que representa este parâmetro no Brasil, corresponde ao grau °C (VON SPERLING, 1995).

De maneira isolada a temperatura representa um parâmetro comum e que pode ficar em segundo plano em alguns casos, entretanto, este tipo de fator atua diretamente nos processos em relação a condutividade e gases dissolvidos, esses processos representam uma parte importante em relação aos mecanismos que ocorrem na eletrocoagulação/flotação, por exemplo. Outra atuação geral da temperatura na eletrocoagulação se dá ao fato de que a utilização de eletrodos de alumínio gera uma passivação destes à medida que se procede com o tratamento, em temperaturas mais elevadas o rompimento da camada de passivação (óxido de alumínio) é mais efetiva garantindo a eficácia na remoção de poluentes utilizando essa composição nos eletrodos (COMNINELLIS, GUOHUA., 2010).

3.5.8 Absorção no ultravioleta-visível

A absorção de energia depende diretamente da estrutura da molécula, e por isso, a espectroscopia de absorção na região do UV-Vis tem ampla aplicação na caracterização de uma série de propriedades de diversas espécies orgânicas e inorgânicas, além de poder ser utilizada para quantificar a espécie no local de estudo. O aspecto do espectro de UV-Vis é de uma substância corresponde a uma banda larga, isso se deve ao fato de que a absorção eletrônica se sobrepõe a subníveis rotacionais e vibracionais quando tal absorve energia quantizada. A absorção da radiação eletromagnética está associada aos seguintes comprimentos de onda: ultravioleta (100-400 nm) e visível (400-800 nm). A quantidade de luz absorvida quando um feixe de radiação monocromática atravessa o meio absorvente depende da concentração, do coeficiente de absorvidade molar da espécie absorvente e do percurso ótico da radiação (SKOOG, *et al.*, 2006). O estudo da variação da absorbância com a concentração permite: determinar quantitativamente um grande número de substâncias químicas e biológicas, estudo cinético de reações lentas, identificação e verificação do grau de pureza de compostos e calcular a diferença de energia entre os estados eletrônicos e do momento dipolar de transição de espécies químicas. Nos Estados Unidos por exemplo, 95% das análises clínicas são feitas por métodos espectrofotométricos (VOGEL, 2002). A caracterização quantitativa da espécie em uma matriz analítica a partir da absorção no UV-Vis, se dá diretamente através da Lei de Beer.

A intensidade de um feixe de radiação eletromagnética é atenuada ao atravessar um meio que contém uma espécie absorvente, a intensidade I do feixe transmitido, relaciona-se com o feixe da incidente I_0 (paralelo e monocromático, de comprimento de onda λ) pela Lei de Beer, representada na equação 5.

$$I = I_0 \cdot 10^{-\xi(\lambda)cb} \quad (5)$$

Na equação 5, c (mol.L^{-1}) é a concentração da espécie absorvente, ξ ($\text{l.mol}^{-1}.\text{cm}^{-1}$) é o coeficiente de absorvidade molar ao comprimento de onda λ , e b (cm) o percurso ótico. Experimentalmente mede-se a razão das intensidades como representado pela equação 6, designada de transmitância.

$$T = I / I_0 \quad (6)$$

A transmitância por sua vez pode ser substituída por outra medida, chamada de absorbância, representada pela equação 7, sua grande vantagem é a variação linear com a concentração.

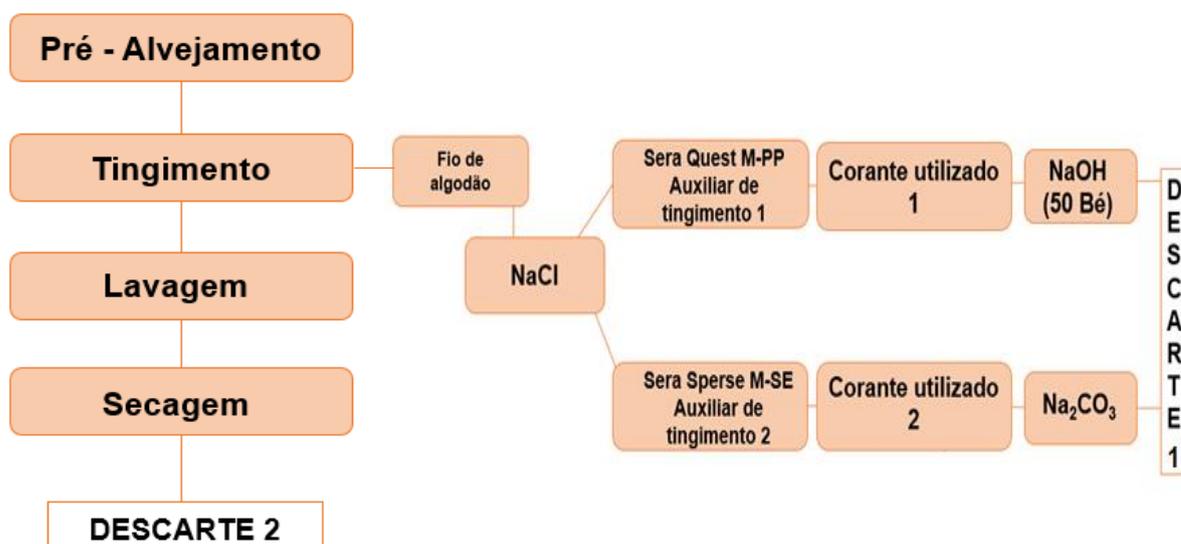
$$A = -\log_{10}T = \xi(\lambda)bc \quad (7)$$

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Realização da remoção de cor e tratamento do efluente na fábrica de Redes Isaac LTDA em Jaguaruana

O processo de tratamento eletrolítico somente foi aplicado após todo o procedimento de beneficiamento dos fios de algodão utilizados pela fábrica de redes Isaac LTDA. Os fluxogramas descrito na figura 7 demonstra as etapas geradoras de efluente, essas etapas possuíam dutos interligados que traziam os efluentes para dois tanques de armazenamento na parte externa da fábrica. Um dos dutos trazia somente o efluente gerado no procedimento de tingimento e estava interligado ao tanque 1, excluindo assim etapas de lavagem e aplicação de insumos químicos extras. Outros dutos estavam interligados ao tanque 2 e traziam tanto o efluente gerado durante a etapa de tingimento, quanto a água residual com a carga de insumos químicos extras utilizados durante o beneficiamento geral do fio de algodão.

Figura 7. Fluxograma dos processos de beneficiamento dos fios de algodão Redes Isaac LTDA.



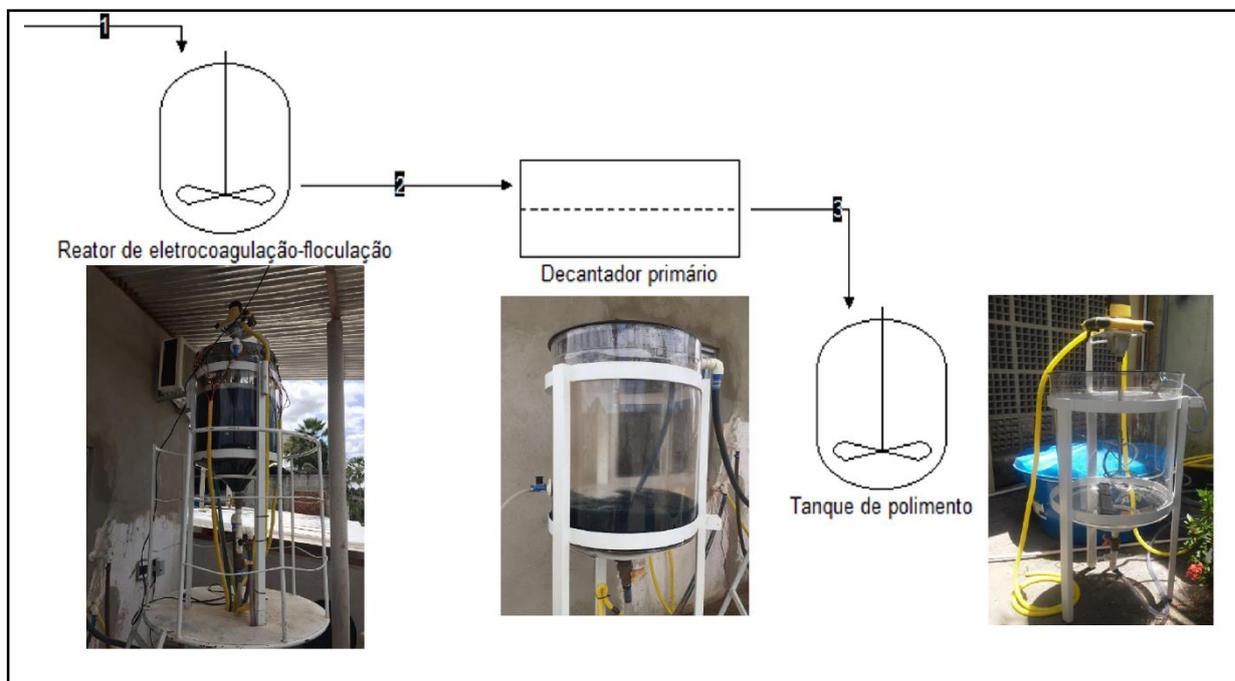
*50°Bé (700 g.L⁻¹)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Foram realizadas duas bateladas de tratamento na Unidade Piloto, na etapa 1 o efluente tratado era o gerado pelo beneficiamento total dos fios de algodão armazenado no tanque 2. Na segunda etapa foi utilizado o efluente gerado pelo descarte no tanque 1, ou seja

especificadamente do processo de tingimento. A Unidade de Tratamento Piloto encontra-se descrita de forma específica na figura 8.

Figura 8. Unidade de Tratamento Piloto – Fábrica de Redes Isaac LTDA.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

No compartimento que compreende ao reator de coagulação, o efluente sofre a ação dos eletrodos que promovem a eletrólise da água através da aplicação de um campo elétrico uniforme entre as placas, igualmente espaçadas verticalmente e distribuídas em formato circular no reator de eletrocoagulação. Foram 10 (dez) conjuntos de eletrodos, sendo 7 de aço inoxidável do tipo 304 e 3 de alumínio comercial (99% Al). Cada conjunto possuía 8 placas espaçadas de 1,5 mm entre si, com cada placa medindo 5x40x0,3 cm. A composição química do aço inoxidável 304 utilizado é encontrada na tabela 2.

Tabela 2. Composição química dos eletrodos de aço inoxidável 304 utilizado no reator de eletrocoagulação (% máximo em peso)

Composição química aço inox 304 (%)							
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Fe
0,08	2,00	1,00	0,045	0,03	18,00	8,00	70,80

Fonte: ABINOX, 2014.

Cada conjunto de eletrodos que compõem o sistema descrito anteriormente foi ligado em arranjo monopolar do tipo paralelo e posteriormente interligado ao circuito em dupla. Este circuito teve como objetivo a geração do campo elétrico uniformemente variado a partir

de uma corrente contínua pulsada (este equipamento encontra-se em processo de patente, por isso da simplicidade nas informações anteriormente citadas). A corrente contínua era fornecida ao circuito por meio da fonte de alimentação de marca Hayama modelo HY-125 (220-13,8V). Um agitador mecanizado também estava inserido neste reator, suas velocidades apresentavam ordem de rotação: baixa, média e alta.

O tanque 2 na figura 8 representa o decantador primário, cuja a função foi segmentar o efluente tratado no reator de eletrocoagulação, ou seja, nesta etapa o tanque separou o sedimentos gerados do efluente sobrenadante. O tanque de polimento (3) foi utilizado da mesma forma que o tanque (2) nas duas bateladas de experimentos.

4.1.1 Batelada de tratamento do efluente misto (descarte 2)

Nesta batelada o efluente do descarte no tanque 2 foi bombeado para o reator de eletrocoagulação até o recobrimento total do sistemas de eletrodos circulares. Iniciou-se o processo com agitação em média rotação por 5 minutos. As configurações da Unidade Piloto de Tratamento foram mantidas da mesma forma que descritas anteriormente. Decorridos 5 minutos, foi iniciado o processo de tratamento eletrolítico.

4.1.2 Batelada de tratamento do efluente proveniente do tingimento (descarte 1)

Nesta batelada o efluente de descarte no tanque 1 foi bombeado para o reator de eletrocoagulação mantendo as características de preenchimento do item 4.1.1. Nesta etapa as ligações dos conjuntos de eletrodos foram modificadas de monopolar em paralelo para uma associação do tipo mista (paralelo e série) e foram desligadas do circuito descrito anteriormente, de forma que sua interligação foi direta com a fonte de tensão descrita no item 4.1. Os eletrodos também foram retirados e distanciados de uma forma maior (3-4mm) entre si. O restante das configurações da Unidade de Tratamento Piloto foram mantidas como no item 4.1.1. A agitação utilizada nesta batelada também foi de ordem média. Novamente esperou-se 5 minutos em agitação para iniciar o tratamento do efluente proveniente do descarte 1 via método eletrolítico. Vale ressaltar que antes de iniciar esta batelada o reator de eletrocoagulação e os eletrodos foram lavados para retirar incrustações e impurezas que podiam ficar aderidas da batelada 1.

4.2 Obtenção dos resultados dos parâmetros físico-químicos selecionados

Os experimentos foram segmentados em duas etapas devido à especificação técnica que alguns exigiam em sua realização. Os de realização rápida e direta foram feitos durante o tratamento eletrolítico de cada efluente na Fábrica de Redes Isaac LTDA, o restante foi realizado no laboratório de Processos Oxidativos Avançados situado na Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici.

Os tempos de coleta e os códigos que correspondiam cada um foram estipulados como na tabela 3, para o caso dos tratamentos o código com a numeração seguido da letra (V) foi adotada para o efluente do tanque 2 (processo de beneficiamento geral), já o código com a numeração seguido da sigla (ES) foi adotada para o efluente do tanque 1 (processo de tingimento)

Tabela 3. Especificações dos códigos adotados durante o procedimento experimental

	Tempo (min)	Código		Tempo (min)	Código
E F L U E N T E TANQUE 2	0	1V	E F L U E N T E TANQUE 1	0	1ES
	10	2V		5	2ES
	20	3V		10	3ES
	30	4V		15	4ES
	40	5V		20	5ES
	50	6V		25	6ES
	60	7V		30	7ES
	*	8V		35	8ES
	*	9V		40	9ES
	*	10V		45	10ES
-	-	**	11ES		

Fonte: O autor, 2016.

* Estes códigos correspondem aos três reatores que formam a Unidade Piloto de Tratamento, cada um ficou 12 horas com o efluente do tanque 2 tratado na tarde anterior, sendo (8V) correspondente ao reator de coagulação, (9V) correspondente ao decantador primário e o (10V) correspondente ao tanque de polimento.

** Este código (11 ES) corresponde a alíquota 10 ES adicionando 15 min de submissão ao tratamento com ozônio.

4.2.1 Parâmetros realizados in loco na Fábrica de Redes Isaac

Diante dos tempos de retirada de alíquotas descritos na tabela 3 controlados a partir de um cronômetro cada amostra de efluente foi retirada por uma torneira acoplada no fundo do reator de eletrocoagulação com uma auxílio de um béquer de 2 litros, de forma que a cada retirada a primeira alíquota a preencher o béquer era descartada pois poderia haver restante de material da coleta anterior. Uma parte de amostra foi transferida para um frasco coletor de 150 mL servindo assim como padrão para as análises realizadas em laboratório. Outra alíquota de 200 mL serviu de padrão para os seguintes parâmetros realizados na Fábrica: Cor aparente, turbidez, pH, condutividade e temperatura.

a) pH, condutividade e temperatura

Os três parâmetros acima foram medidos simultaneamente auxílio do medidor multiparâmetros HI 9829 HANNA (Sonda de registro). Inseriu-se o béquer junto aos sensores do equipamento que foi previamente calibrado de acordo com as instruções do fabricante, o resultado foi indicado na tela do registrador de dados.

b) Cor aparente

Preencheu-se o tubo de Falcon (50 mL) com 1 mL de amostra proveniente da coleta auxiliado por uma pipeta automática e completou-se o volume até 50 mL com água destilada, realizando-se assim uma diluição prévia de 50 vezes. 10 mL foi transferido para a cubeta do equipamento DM-COR da Digimed (medidor colorimétrico de campo) e realizou-se as leituras. A diluição foi corrigida em relação ao valor real após os resultados. Previamente o equipamento foi calibrado de acordo com as instruções do fabricante. Vale ressaltar que o próprio manual chama atenção para a realização de diluição no caso de efluentes que possuam cor elevada a olho nu, que foi o caso do utilizado neste estudo.

c) Turbidez

Preencheu-se a cubeta com 10 mL da alíquota proveniente da coleta transferindo-a para o equipamento HI 98713 HANNA (medidor portátil de turbidez) e realizou-se as medidas. Previamente o equipamento foi calibrado de acordo com as instruções do fabricante.

Todas as leituras foram realizadas simultaneamente de forma a obter resultados do processo de tratamento que se estava realizando. Os processos descritos acima foram adotados nas duas bateladas de experimentos realizadas.

4.2.2 *Parâmetros realizados no Laboratório de Processos Oxidativos Avançados*

O transporte das amostras foi feito da fábrica situada em Jaguaruana para o LabPOA na Universidade Federal do Ceará em frascos de 150 mL. Os mesmos foram mantidos em refrigeração de forma a preservar condições parecidas com as análises realizadas *in loco*. Os parâmetros medidos no laboratório foram: cor real, alumínio, ferro, manganês sólidos totais dissolvidos e por fim a absorção no UV-Vis. Um Pré-tratamento de amostras foi realizado com cada alíquota a ser analisada. Primeiramente recolheu-se 50 mL de cada amostra e realizou-se a centrifugação em centrífuga de marca Eppendorf modelo 5702 RH com rotações em 2500 rpm por 5 minutos. Separou-se o sobrenadante do material sedimentado, o sobrenadante foi utilizado para as demais análises descritas anteriormente.

a) Cor Real

Realizou-se a diluição das amostras transferidas da seguinte maneira: retirou-se 1 mL de volume da amostra e transferiu-se para um balão volumétrico de 50 mL, preencheu-se o restante do volume até o menisco com água destilada e posteriormente agitou-se. Após o conteúdo de 10 mL foi transferido para a cubeta de 10 mL do equipamento DM - COR Digimed (medidor colorimétrico de campo) e efetuou-se as medidas.

b) Alumínio, ferro e Manganês

Para realizar as medidas desses três parâmetros realizou-se a diluição das amostras transferidas da seguinte forma: Retirou-se 1 mL de volume da amostra e transferiu-se para um balão de 10 mL, após completou-se o volume até o menisco e agitou-se. O equipamento que efetuou as medidas utiliza métodos colorimétricos para determinar diversos parâmetros (colorímetro multianálise DM-50 Digimed). Cada análise possui uma marcha analítica a ser seguida segundo fabricante, abaixo vem descrito os procedimentos:

1. Análise de Alumínio: 10 mL de amostra diluída na cubeta, 2 gotas do reagente A (ácido sulfúrico), 2 gotas do reagente B (ácido ascórbico) – agitou-se – 10 gotas do reagente C (solução tampão) – agitou-se vigorosamente- 10 gotas do reagente D (solução de Eriocromo cianina – R), inseriu-se no equipamento e efetuou-se a leitura.

2. Análise de Ferro: 10 mL de amostra diluída na cubeta, conteúdo do sachê com o agente redutor A – agitou-se vigorosamente – 5 gotas do agente complexante B, inseriu-se no equipamento e efetuou-se a leitura.
3. Análise de Manganês: 10 mL de amostra diluída na cubeta, conteúdo do sachê 1 – agitou-se até diluição – conteúdo do sachê 2 – agitou-se vigorosamente – inseriu-se no equipamento e efetuou-se a leitura.

c) Sólidos Totais dissolvidos

A leitura de sólidos totais dissolvidos foi realizada com as alíquotas centrifugadas sem diluição. Primeiramente calibrou-se o equipamento EDGE HANNA (condutivímetro com parâmetros de salinidade e STD extras) conforme o fabricante indica nas instruções. Inseriu-se 20 mL de amostra colocada em um béquer junto ao sensor (eletrodo) que constitui o equipamento e posteriormente obteve-se o valor de sólidos totais dissolvidos. Vale ressaltar que a cada leitura o eletrodo era lavado com água deionizada e se possível retirava-se possíveis bolhas de ar contidas próximo a superfície do eletrodo que poderiam interferir na leitura real.

d) Absorção no UV-Vis

A leitura de absorção foi realizada com as amostras que foram centrifugadas. O equipamento utilizado foi um espectrofotômetro Shimadzu UV-1800. Realizou-se as medidas com a cubeta de quartzo visto que era necessário fazer uma varredura completa devido à complexidade da matriz dos efluentes. Uma alíquota da amostra foi transferida para a cubeta de quartzo e posteriormente realizou-se a inserção desta no equipamento. O branco utilizado foi água destilada. Após as leituras as absorções foram identificadas pelo detector que compõem o equipamento e observada através do software de trabalho que acompanha o equipamento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Cor (real e aparente)

Uma das grandes problemáticas quando se realiza o tratamento de efluentes provenientes do beneficiamento têxtil é a alta carga de cor que o efluente final descartado após os diversos processos, em especial o tingimento, apresenta. Os corantes dissolvidos no efluente descartado representam sólidos dissolvidos que geram uma determinada carga de cor, esse parâmetro varia de acordo com a concentração destes pigmentos no efluente final. No caso deste trabalho em específico o processo de eletrocoagulação foi utilizado como forma de geração dos agentes coagulantes que posteriormente iriam provocar a desestabilização dos coloides e concomitantemente a floculação e dependendo da densidade do floco formado a possível sedimentação. Os cátions liberados nos anodos de sacrifício no processo de eletrocoagulação podem agir diretamente sobre os poluentes, serem hidrolisados, formando complexos ou remover o contaminante via precipitação direta (varredura). Além da promoção do fenômeno de coagulação imediata a vantagem principal de se aplicar a eletrocoagulação em efluentes com altas cargas de cor (corantes dissolvido) se dá em relação a oxidação química (NETO., 2012) esta última aumenta a eficácia da remoção de partículas de menor tamanho e contaminantes dissolvidos.

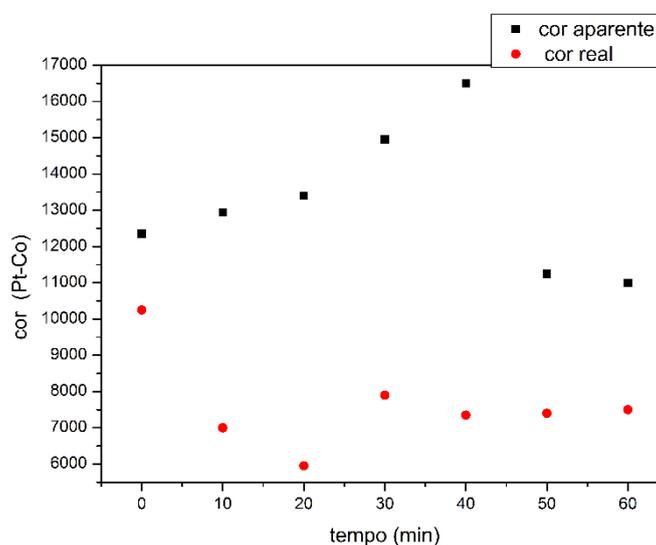
Na tabela 4 tem-se os resultados de cor real e aparente obtidos no processo de tratamento do efluente misto (processo de beneficiamento do algodão geral) contido no tanque 2 devidamente corrigidos segundo a diluição realizada. A figura 9 apresenta os dados da tabela 4 de forma gráfica.

Tabela 4. Resultados de cor aparente e real para o processo de tratamento do efluente contido no tanque 2 (beneficiamento geral do algodão).

Tempo (min)	Cor Aparente (Pt-Co)	Cor Real (Pt-Co)
0	12350	10250
10	12950	7000
20	13400	5950
30	14950	7900
40	16500	7350
50	11250	7400
60	11000	7500

Fonte: O autor, 2016.

Figura 9. Gráfico que representa a evolução da cor conforme o tratamento realizado no efluente misto (processo de beneficiamento geral do algodão) contido no tanque 2. Em preto tem-se a cor aparente, em vermelho tem-se a cor real.



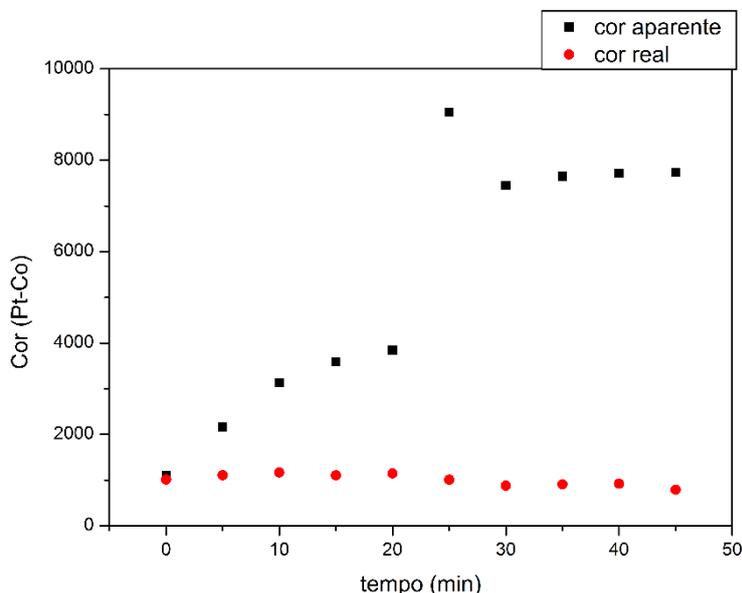
Na tabela 5 encontram-se os resultados obtidos com o processo de tratamento eletrolítico no efluente proveniente do tingimento, contido no tanque 1. A figura 10 apresenta os dados da tabela 4 de forma gráfica.

Tabela 5. Resultados de cor aparente e real para o processo de tratamento do efluente contido no tanque 1 (processo de tingimento).

Tempo (min)	Cor Aparente (Pt-Co)	Cor Real (Pt-Co)
0	1105	1015
5	2165	965
10	3135	980
15	3590	935
20	3845	900
25	9050	810
30	7450	760
35	7650	710
40	7710	575
45	7740	435

Fonte: O autor, 2016.

Figura 10. Gráfico que representa a evolução da cor conforme o tratamento realizado no efluente proveniente do tingimento, contido no tanque 1. Em preto tem-se a cor aparente, em vermelho tem-se a cor real.



Diante dos resultados expressos anteriormente de cor é possível observar que a cor real tem um decréscimo em relação ao valor obtido no parâmetro aparente, tanto nos resultados obtidos com o tratamento do efluente misto quanto do efluente proveniente do tingimento. A realização da centrifugação trata-se de um método que pode ser realizado para reduzir a interferência da turbidez (partículas com diâmetro superior a 1,2 μm), sendo assim o que se observa após a realização da centrifugação são somente as dissolvidas, responsáveis majoritárias pela cor do efluente. Como os valores de cor aparente somam-se aos aspectos de turbidez, tem-se que o nível de partículas no momento do tratamento foi maior no caso do efluente misto, isso ficou nítido na observação em prática, o efluente misto possuía altas cargas de partículas, mas pouca eficiência de remoção de cor. Diferentemente do que ocorreu com o efluente proveniente do tingimento, as partículas formadas rapidamente sedimentavam e ocorria uma diminuição nos níveis de cor aparente.

A comparação entre os dois resultados de experimentos feitos em batelada demonstra que a eficiência da remoção de cor foi maior para o caso em que se tratou o efluente proveniente do tingimento (tanque 1). Nas figuras 11 e 12 tem-se os gráficos de eficiência na remoção de cor do efluente em função do tempo para o efluente misto e efluente proveniente do tingimento, respectivamente. Vale ressaltar que os valores de percentuais foram obtidos utilizando a equação 8.

$$\text{Remoção (\%)}: \left(\frac{C(0) - C(t)}{C(0)} \right) * 100 \quad (8)$$

Na equação (5), $C(0)$ representa o valor inicial de cor (tempo zero), e $C(t)$ apresenta-se como o valor de cor no tempo t minutos.

Figura 11. Eficiência de remoção de cor no tratamento do efluente misto (corrente contínua pulsada, agitação média).

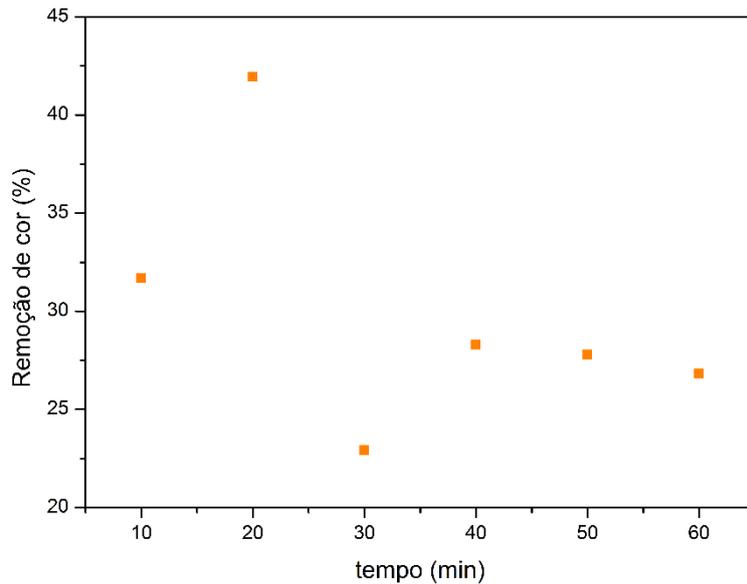
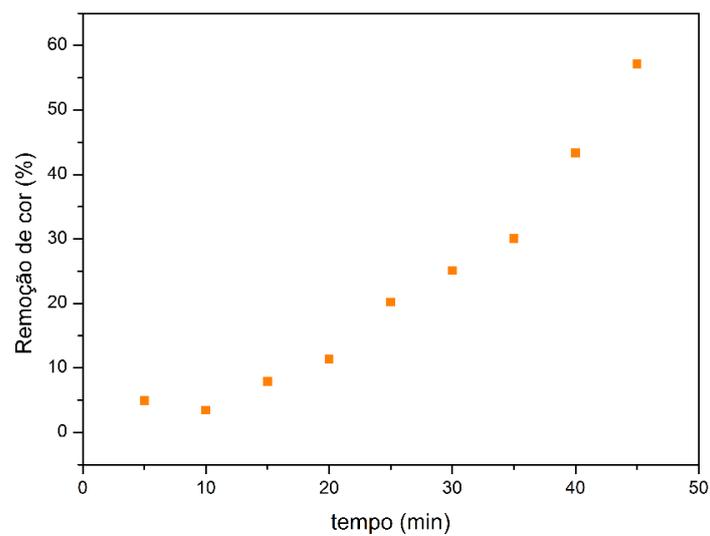


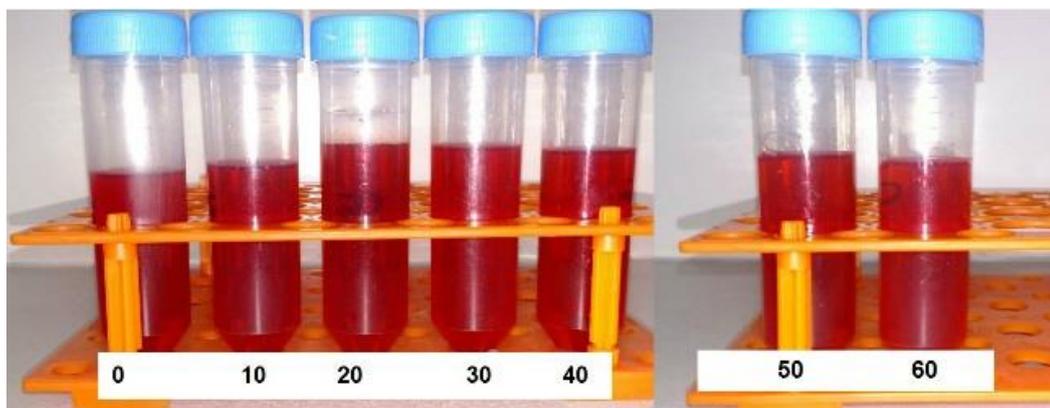
Figura 12. Eficiência da remoção de cor no tratamento do efluente proveniente do tingimento (corrente contínua, agitação média).



Observando as figuras 11 e 12 tem-se que a remoção de cor no experimento realizado com o efluente têxtil alcançou aproximadamente 60% de remoção do referido

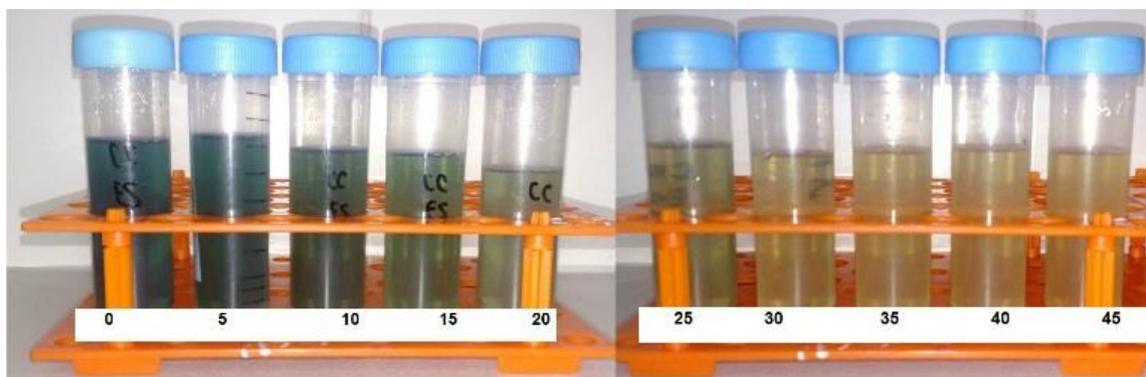
parâmetro, diferente do caso em que o efluente misto foi utilizado, este último obteve de uma forma geral remoções menores que 30% do referido parâmetro.

Figura 13. Alíquotas tratadas por eletrocoagulação do efluente têxtil proveniente do beneficiamento completo têxtil da Fábrica de Redes Isaac.



Fonte: O autor, 2016.

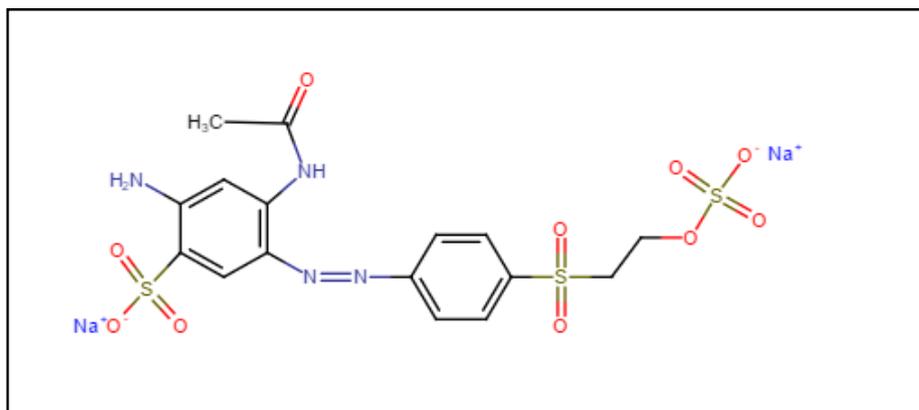
Figura 14. Alíquotas tratadas por eletrocoagulação do efluente têxtil proveniente do tingimento da Fábrica de Redes Isaac.



Fonte: O autor, 2016.

O corante utilizado no tingimento que estava contido no tanque 2 (processo de beneficiamento têxtil geral) foi o Reactive Orange 107, sua estrutura química encontra-se na figura 15.

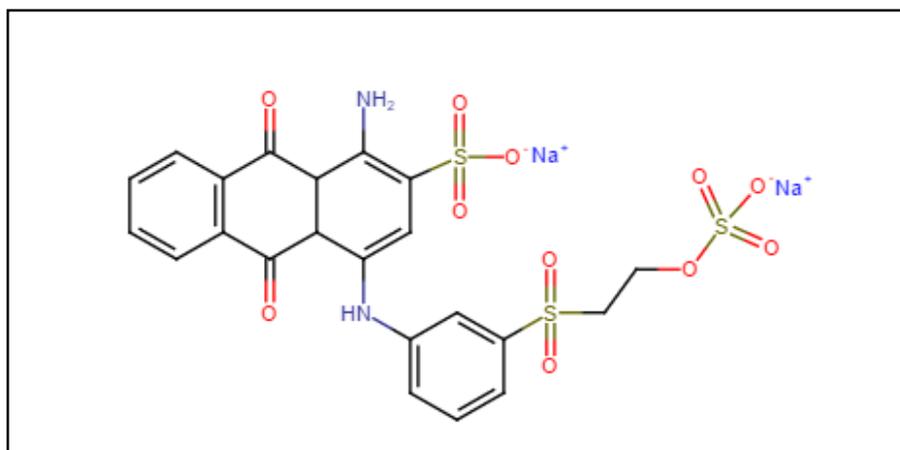
Figura 15. Estrutura química do corante Reactive Orange 107.



Fonte: www.chemicalize.org

Para o caso do efluente proveniente exclusivamente do tingimento, o corante utilizado foi o Reactive Blue 19, cuja estrutura química encontra-se na figura 16.

Figura 16. Estrutura química do corante Reactive Blue 19



Fonte: www.chemicalize.org

Ambos os corantes descritos acima como próprio nome já sugere tratam-se de espécies reativas, contendo um grupo eletrofílico (reativo) capaz de formar ligações covalentes com os grupos hidroxilas das fibras celulósicas (algodão). Neste tipo de corante a reação química se procede através da substituição do grupo eletrofílico pela hidroxila da celulose, exigindo assim a eliminação do grupo sulfato em meio alcalino. A presença de dois ou mais grupos (-SO₃Na) confere a esta classe de corantes boa solubilidade em água e mais de uma opção de sítios nucleofílicos reativos, porém isso favorece a hidrólise da sulfona (SO₃⁻) tornando este sítio eletrofílico inativo e assim prejudicando o processo de tingimento. Este fato acarreta justamente as altas cargas de cor observadas durante a discussão deste tópico no

efluente final, em sua maioria o corante que não reagiu permanece na água de lavagem e tingimento.

5.2 Absorção no Ultravioleta-Visível (UV-Vis)

As moléculas sofrem três tipos de transições quantizadas quando excitadas pela radiação ultravioleta, visível e infravermelha (SKOOG, *et al.* 2006). No caso da radiação ultravioleta e visível, a excitação envolve a promoção de elétrons presentes em um orbital molecular ou atômico de baixa energia para um orbital de maior energia. A luz visível provoca alterações no nível de energia da camada de valência, sendo capaz de romper ligações químicas mais instáveis. No caso da radiação ultravioleta, estas são ionizantes devido à alta energia que apresentam, sendo assim são capazes de romper ligações provocando alterações na estrutura molecular. A absorção que compete ao visível não é tão rica de informações estruturais e tem sua atenção voltada a parte quantitativa, dessa forma quantitativamente pode-se caracterizar substâncias que absorvem nessa região do espectro (VOGEL, 2002). Vale ressaltar que substâncias são coloridas porque absorvem luz visível, desse modo a luz que emerge de uma substância só vai ter os comprimentos de onda que ela não absorveu. Na tabela 6 tem-se a relação aproximada entre a absorção de luz de corantes orgânicos e a cor por esse emitido.

Tabela 6. Comprimento de onda da absorção de luz relacionado com a cor emitida em corantes orgânicos

Comprimento de onda (λ) (nm)	Cor absorvida	Cor observada
400 - 435	Violeta	Amarelo-esverdeado
435 - 480	Azul	Amarelo
480 - 490	Verde - azulado	Laranja
490 - 500	Azul-esverdeado	Vermelho
500 - 560	Verde	Roxo
560 - 580	Amarelo-esverdeado	Violeta
580 - 595	Amarelo	Azul
595 - 605	Laranja	Verde - azulado
605 - 700	Vermelho	Azul-esverdeado

Fonte: General Introduction to the chemistry dyes (2010)

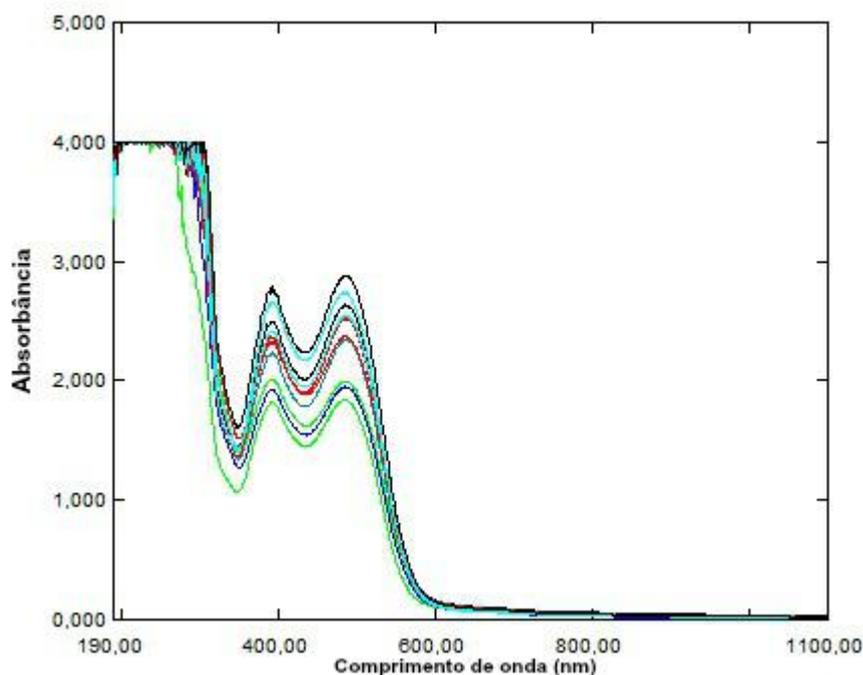
A utilização do método de absorção no ultravioleta-visível visou observar qualitativamente via avaliação dos espectros obtidos a diminuição de absorbância à medida que se realizava o processo de eletrocoagulação, essa medida de absorção representava diretamente a luz absorvida pela molécula de corante e a sua variação estava diretamente ligada a uma diminuição de corantes dissolvidos no efluente final. A molécula de corante somente absorve radiação no visível (400-700nm) devido à presença em sua estrutura de grupos cromóforos,

esses grupos cromóforos possuem elétrons que são promovidos a orbitais desocupados de mais alta energia devido a interação com a radiação no visível. No caso das moléculas utilizadas como corante neste estudo tem-se em específico a presença de três importantes cromóforos. No caso do corante Reactive Orange 107 observa-se que o grupamento azo ($-N=N-$) e as duplas conjugadas dos anéis representam os principais cromóforos. Para o corante Reactive Blue 19 observa-se que o grupamento antraquinona está presente e representa o principal grupo cromóforo.

Além dos grupos cromóforos, os grupos auxocromos representam auxiliares no processo de absorção da molécula de corante no visível, a inserção de diferentes auxocromos na estrutura de um corante pode diferenciar a cor observada que estes irão apresentar, ou seja, comercialmente o esqueleto estrutural dos corantes são bem parecidos, modificando em sua maioria os grupos auxocromos e a forma de interação com a fibra têxtil. Os corantes Reactive Orange 107 e Reactive Blue 19 apresentam o grupo auxocromo amino ($-NH_2$) (GUARATINI; ZANONI, 2000)

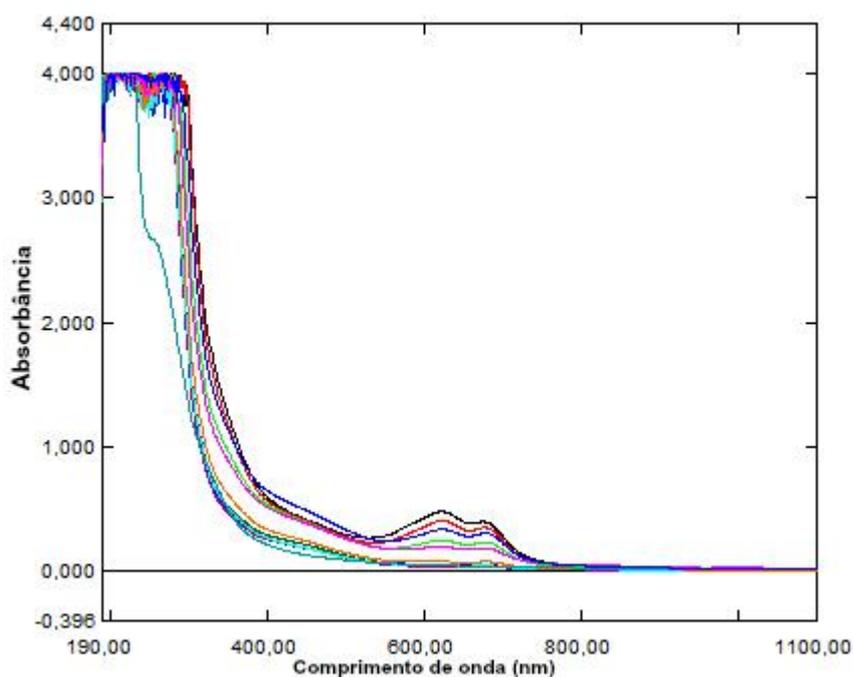
Os espectros de absorção para as alíquotas retiradas no processo de tratamento do efluente no tanque 2 (beneficiamento têxtil geral) encontram-se na figura 17.

Figura 17. Espectro de absorção na região do UV-Vis para as alíquotas do tratamento do efluente contido no tanque 2. Cada cor representa um tempo diferente na coleta da alíquota seguida para este efluente em específico.



Os espectros de absorção para as alíquotas retiradas no processo de tratamento do efluente no tanque 1 (tingimento) encontram-se na figura 18.

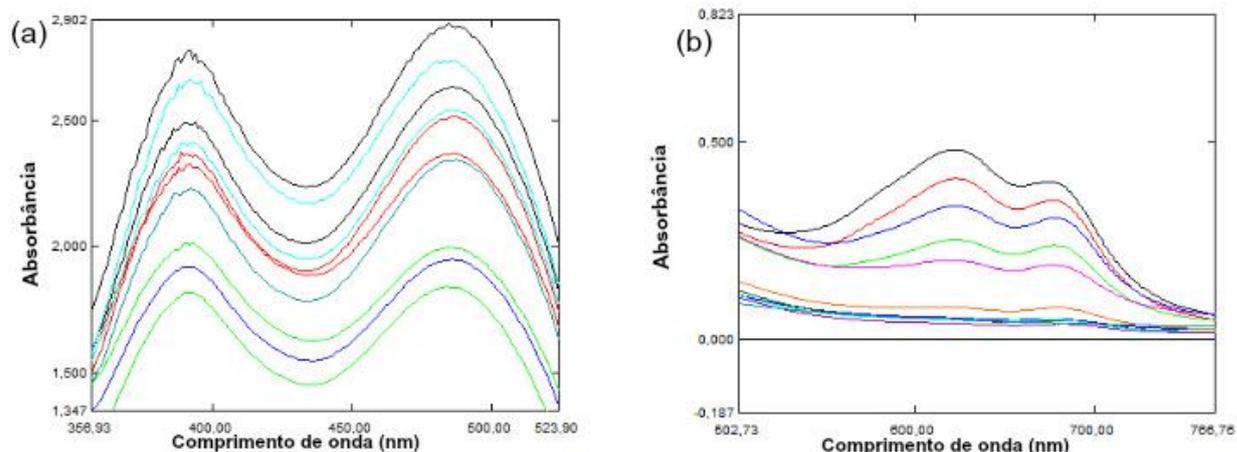
Figura 18. Espectro de absorção na região do UV-Vis para as alíquotas do tratamento do efluente contido no tanque 1. Cada cor representa um tempo diferente na coleta da alíquota seguida para este efluente em específico.



Fonte: O autor, 2016.

Diante dos espectros de absorção obtidos das alíquotas retiradas em determinados intervalos de tempo pode-se observar que os valores de absorção para a batelada de experimento que envolvia o processo de tratamento do efluente proveniente do tingimento, obtiveram a redução na absorção da molécula de corante, isso fica mais nítido quando ocorre uma ampliação dos dois casos estudados. Na figura 19 (a) podemos observar que o efluente que continha o corante Reactive Orange 107 obteve menor decréscimo no valor de absorbância em relação ao Reactive Blue 19 figura 19 (b). Como a absorção está diretamente ligada ao grupo cromóforo que constitui a estrutura química de cada corante pode-se avaliar que o processo de degradação via eletrocoagulação foi mais eficaz para o caso do efluente proveniente do tingimento, sendo este formado pelo corante Reactive Blue 19, vale ressaltar que a eficácia do processo de eletrocoagulação está ligada principalmente a remoção da alta carga de corante dissolvido no efluente final da fábrica, dentre outros parâmetros.

Figura 19. Ampliação dos espectros de absorção no ultravioleta-visível das alíquotas coletadas durante o processo de tratamento por electrocoagulação. (a) efluente misto proveniente do beneficiamento total do algodão – (b) efluente proveniente da etapa de tingimento.



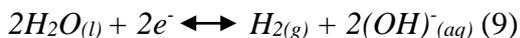
Fonte: O Autor, 2016.

Com os resultados expressos de forma ampliada tem-se as absorbâncias e seus respectivos $\lambda_{\text{máx}}$ (comprimento de onda máximos). Para o caso do efluente contido no tanque 2 (Figura 19 – a) o valor de absorbância máximo é 2,88 e seu respectivo $\lambda = 484,61$ nm. Já para o efluente contido no tanque 1 (Figura 19 – b) o valor de absorbância máximo é 0,489 e seu respectivo $\lambda = 622,32$ nm. Os valores citados em literatura (Tabela 6) para cor observada confirmam as absorções nestes comprimentos de onda. Cores observadas azuis-esverdeadas tem a cor absorvida entre 605-700nm, já cores observadas laranjas possuem cor absorvida entre 480-490 nm, justamente as cores aparentes iniciais dos efluentes tratados.

5.3 pH

O pH de efluentes provenientes de processos fabris varia bastante conforme o tipo de mercado para que se está produzindo. No caso deste trabalho, o efluente proveniente do beneficiamento têxtil devido aos insumos químicos extras utilizados pode apresentar valores de pH bastante variáveis. Na indústria em estudo o processo de tingimento utiliza grande quantidade de hidróxido de sódio (NaOH), portanto já era esperado que o pH do efluente não tratado tivesse situado em faixa alcalina. Durante o procedimento de tratamento por electrocoagulação tem-se reações paralelas as de produção do agente coagulante, tanto no anodo quanto no catodo. Essas reações representam a redução (catodo) e a oxidação (anodo) da molécula de água. A reação de redução da molécula de água promove a formação de íons

hidroxila no efluente inserido no reator, conseqüentemente o pH deverá ser elevado mais ainda em relação ao valor alcalino que já se tem. Essa afirmação está explicitada na equação 9.



Os resultados obtidos nas medições de pH das alíquotas retiradas durante o processo de tratamento eletrolítico estão expressos nas tabelas 7 e 8, sendo os valores para o efluente misto (tabela 7) e efluente proveniente do tingimento (tabela 8).

Tabela 7. Resultados das medições de pH para o tratamento do efluente contido no tanque 2 (efluente misto).

Tempo (min)	pH
0	9,99
10	10,21
20	10,1
30	10,06
40	9,94
50	9,88
60	9,79

Fonte: O autor, 2016.

O efluente contido no tanque 2 como esperado apresentou pH = 9,99 antes do início do tratamento eletrolítico, entretanto após 40 minutos de tratamento tem-se que o pH do efluente diminuiu, apesar de um pequeno valor e mesmo assim se mantendo na faixa alcalina deve-se ressaltar que esta batelada apresentou algumas particularidades que podem explicar o possível decréscimo de pH durante o processo de eletrocoagulação. O processo ao qual se está submetendo o efluente de forma a eliminar os contaminantes, principalmente os corantes, é conhecido pela alta produção de flocos e posterior sedimentação. No caso desta batelada os sedimentos pouco foram observados, dessa forma, a carga de sólidos em suspensão ou dissolvidos era bem alta e de certa forma promoviam incrustações na superfície dos eletrodos. Essas incrustações causam a chamada polarização por queda ôhmica do eletrodo. Ou seja, os sólidos formam uma espécie de proteção do eletrodo, já que estão contidos em superfície e

provocam uma resistência a passagem de corrente elétrica pelo sistema, sendo assim as reações que dependem diretamente da transferência de carga ficam prejudicadas, uma destas é a de redução da água. Um dos maiores problemas é a quantidade de equilíbrios reacionais no sistema de eletrocoagulação que o pH atua, caso este sofra variações não favoráveis como é esse caso todo o processo é afetado.

Tabela 8. Resultados das medições de pH para o tratamento do efluente contido no tanque 1 (efluente proveniente do tingimento).

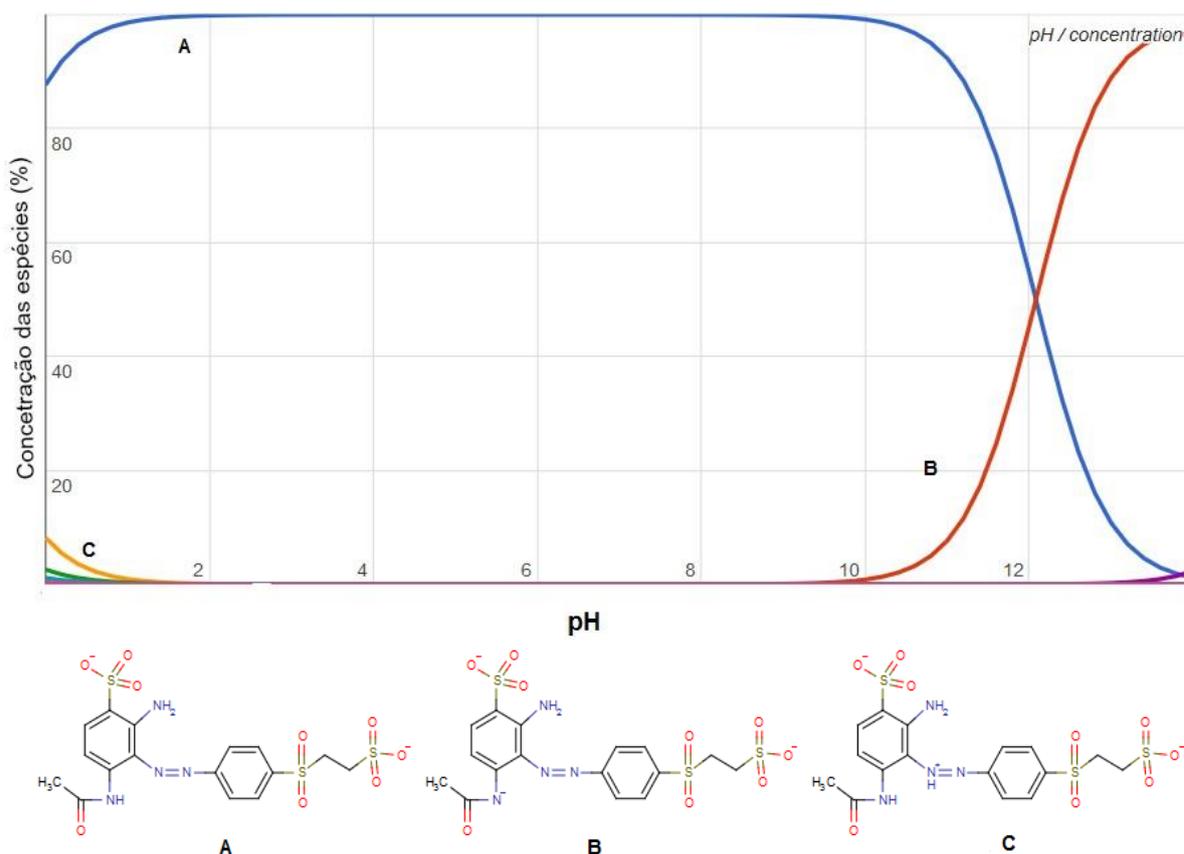
Tempo (min)	pH
0	10,75
5	10,77
10	10,8
15	10,8
20	10,81
25	10,84
30	10,83
35	10,82
40	10,8
45	10,77

Fonte: O autor, 2016.

Para o caso do tratamento do efluente proveniente do tingimento a observação de incrustações foi menor e a sedimentação foi bem mais alta, apesar da agitação média. Os valores de pH mantiveram-se mais estáveis e como esperado aumentaram em relação ao pH inicial.

O pH atua diretamente na especiação tanto dos agentes coagulantes produzidos pelos anodos de sacrifício (hidróxidos de metais) quanto na distribuição percentual de subespécies formadas a partir do corante utilizado. O corante utilizado no tingimento que gerou o efluente da batelada de testes 1, Reactive Orange 107 possui um diagrama de distribuição de espécies descrito na figura 20.

Figura 20. Curva de distribuição de espécies do corante Reactive Orange 107.

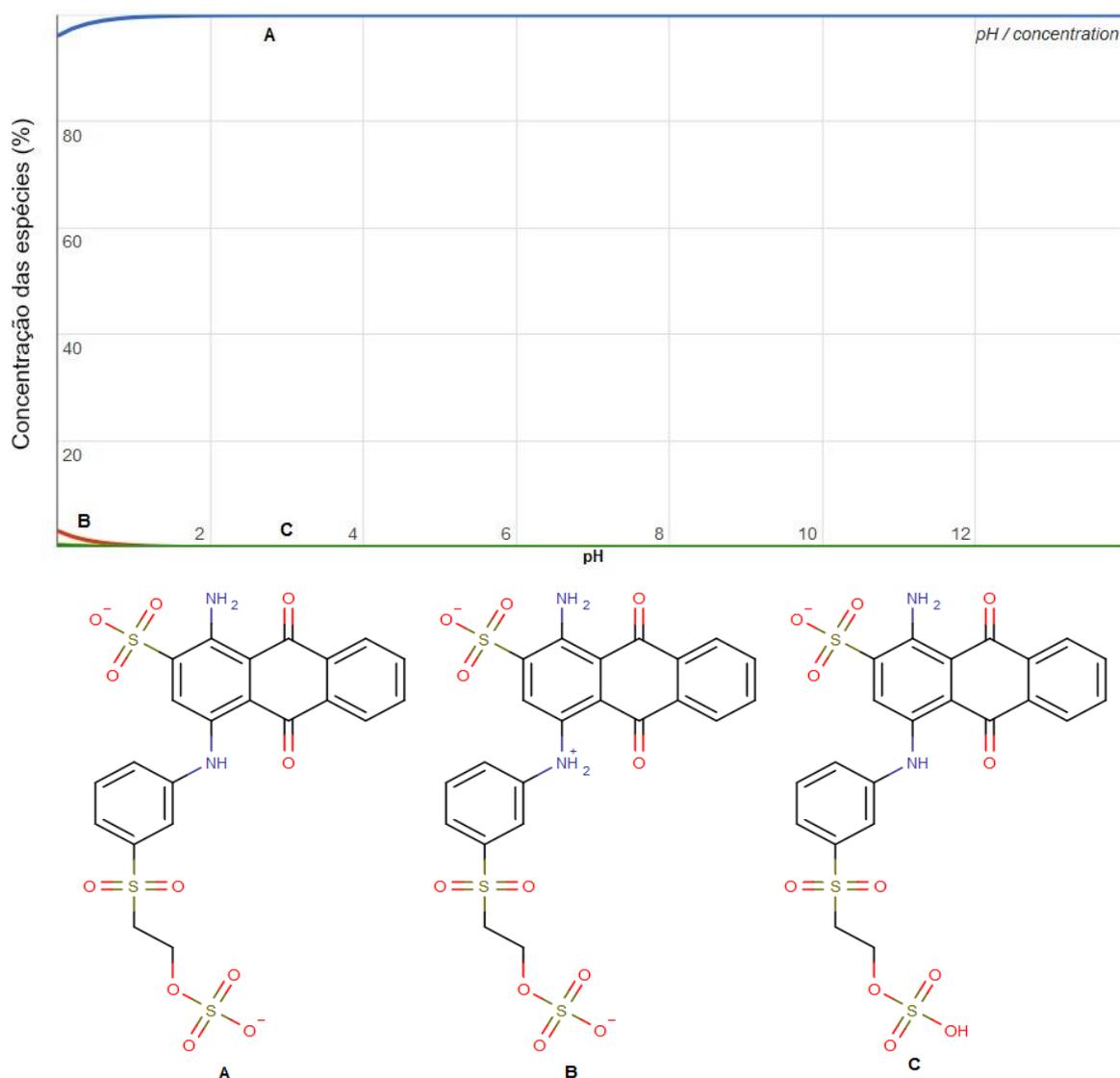


Fonte: www.chemicalize.org

Associando o diagrama pode-se obter informações em relação ao processo de tratamento realizado no efluente misto e sua eficácia na remoção do corante. A faixa de trabalho de pH como mostrado na tabela 7 ficou em torno de 9-10, pelo diagrama tem-se que duas subespécies originadas do corante coexistem em solução, a espécie A em maior concentração e a espécie B em concentração mais moderada. Sendo assim uma das possíveis explicações para a baixa eficácia de remoção de cor na batelada de tratamento do efluente misto pode ser a dificuldade na remoção das duas subespécies formadas, além de uma matriz analítica mais profunda (insumos extras da produção) que dificulta ainda mais os processos de atração eletrostática entre o coagulante e a espécie ionizada a ser removida.

O corante Reactive Blue 19 possui o diagrama de distribuição das espécies descrito na figura 21. Observa-se em relação ao Reactive Orange 107 a diferença no percentual de distribuição que as espécies adquirem conforme se altera a escala de pH, A espécie A em sua totalidade apresenta-se como majoritária durante maior faixa de pH.

Figura 21. Curva de distribuição de espécies do Corante Reactive Blue 19



Fonte: www.chemicalize.org

Diante do diagrama para o corante Reactive Blue 19 tem-se que na faixa de trabalho que foi utilizada na batelada de tratamento do efluente no qual este estava contido pH em torno de 10-11, a subespécie A em sua totalidade é o componente principal do sistema aquoso, sendo assim além de uma matriz menos complicada, pois este efluente estava recebendo carga de águas residuais apenas da etapa de tingimento, o contaminante se apresenta somente em uma forma, provocando assim a eficácia no processo de eletrocoagulação, em especial nos fenômenos de coagulação, ou seja, a atração eletrostática que ocorre entre contaminante e coagulante, além de diante do campo prático um processo de sedimentação eficaz e rápido. Aliado a isso observa-se que os resultados do tópico 5.2 mostram absorções mais baixas para o caso do tratamento do efluente proveniente do tingimento, ressaltando que sua concentração

inicial já era menos elevada que o caso do efluente misto proveniente de todo o processo de beneficiamento do algodão realizado na fábrica.

5.4 Condutividade, temperatura e sólidos totais dissolvidos (STD)

O processo de eletrocoagulação é resultado de diversos parâmetros que em conjunto propiciam uma série de mecanismos afim de remover partículas em suspensão, coloides e sólidos dissolvidos no efluente que se busca realizar o tratamento, o entendimento de alguns parâmetros unidos busca facilitar a compreensão do processo, visto que, na literatura em muitos casos os estudos se apresentam isolados em relação a cada parâmetro. Um dos casos que podem ser correlacionados resultados é o caso dos parâmetros condutividade, temperatura e sólidos totais dissolvidos. DANESHVAR *et al.*, (2007) ressaltou que a temperatura promove um acréscimo da eficiência de remoção de contaminantes quando se utiliza o processo de eletrocoagulação pois a cinética dos íons gerados *in situ* era aumentada, sendo assim a colisão entre partícula de contaminante e coagulante era facilitada. A temperatura também promove modificação na condutividade elétrica do efluente a ser tratado, à medida que a cinética dos íons aumenta devido ao acréscimo de temperatura tem-se uma diminuição na viscosidade do solvente, portanto a mobilidade iônica é aumentada e conseqüentemente a migração de cargas melhorada provocando elevação do parâmetro condutividade elétrica (BASTOS., 2011). Segundo APHA, (2005) os ensaios de sólidos contemplam nove frações diferentes de sólidos quantificáveis em uma amostra de matriz aquosa que diferem entre si pelas suas características de tamanho das partículas e volatilidade. Dentre os 9 tipos, os sólidos totais dissolvidos possuem uma atenção especial devido sua atuação direta no parâmetro condutividade. Os sólidos totais dissolvidos (STD) representam a concentração total de sais dissolvidos contidos na matriz aquosa de estudos, alguns exemplos representativos: bicarbonatos (HCO_3^-), sulfatos (SO_4^{2-}), cloretos (Cl^-), nitratos (NO_3^-), íons metálicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Fe^{2+}) dentre outros representam potenciais eletrólitos quando em concentração razoável em solução, portanto as medidas de STD servem de comparação e parâmetro de acompanhamento para o processo de condutância eletrolítica no processo de eletrocoagulação, caso ocorra baixa condutividade devido à ausência de eletrólitos no meio eletrolítico o processo de geração de agentes coagulantes torna-se ineficaz, conseqüentemente a eficácia na remoção de partículas suspensas, coloides e contaminantes dissolvidos é prejudicada.

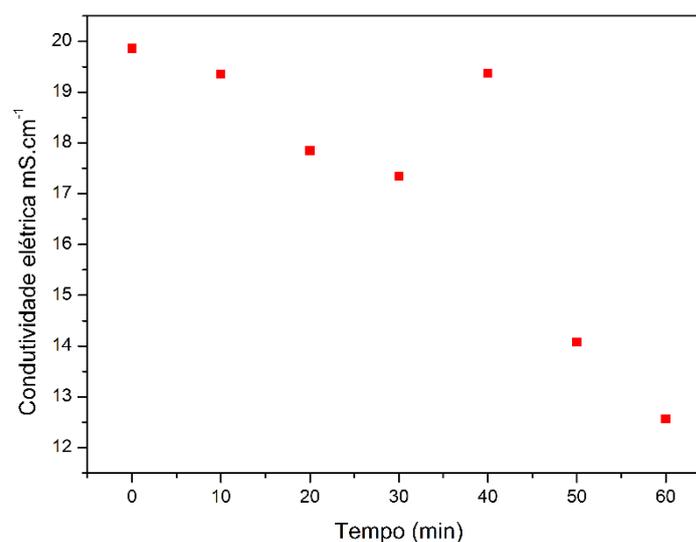
Os resultados de condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos e temperatura para o processo de tratamento do efluente misto (beneficiamento geral da produção fabril) encontram-se na tabela 9. Na figura 22 é possível observar o que ocorreu com a condutividade elétrica do efluente durante os tempos de coleta graficamente.

Tabela 9. Medidas de condutividade elétrica, temperatura e sólidos totais dissolvidos obtidos durante o processo de tratamento do efluente misto (beneficiamento geral da produção fabril).

Tempo (min)	Condutividade elétrica (mS.cm^{-1})	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Sólidos Totais Dissolvidos (STD) (g.l^{-1})
0	19,86	33,4	9,8
10	19,36	33,38	9,55
20	17,85	34,72	9,82
30	17,34	33,31	9,44
40	19,37	33,33	9,81
50	14,08	33,52	9,73
60	12,57	34,64	9,84

Fonte: O autor, 2016.

Figura 22. Variação da condutividade elétrica durante os 60 minutos de eletrocoagulação.



Fonte: Origin, 7.0 (2016).

É de conhecimento desde o tópico 5.1 que a eficácia do processo de tratamento por eletrocoagulação para o caso do efluente misto, foi de certa forma insuficiente, devido aos valores alcançados por exemplo de cor removida, objetivo principal deste trabalho, entretanto isoladamente os critérios acima explicam parcialmente porque a eficácia não foi alcançada. O projeto da Unidade de Tratamento Piloto possuía um arranjo de eletrodos utilizado para esta batelada de experimentos em monopolar paralelo, este tipo de arranjo consiste em placas

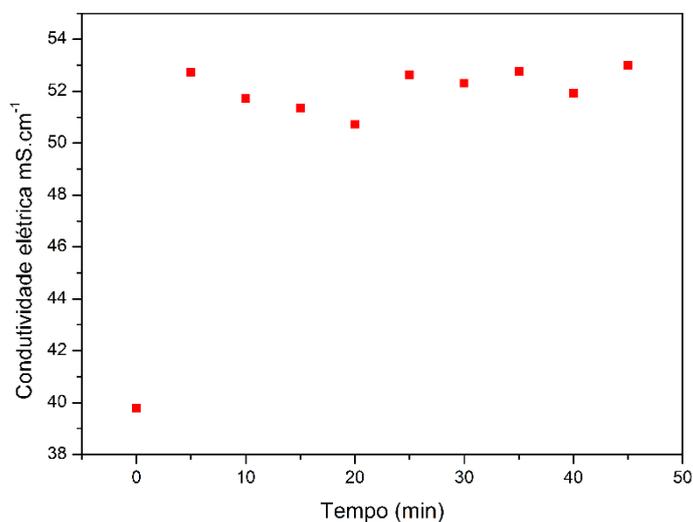
(eletrodos) de sacrifício colocados entre dois outros eletrodos paralelos ligados a uma fonte de tensão, no caso da Unidade de Tratamento Piloto ao circuito que fornecia corrente contínua pulsada aos mesmos, sendo assim durante a realização da batelada observou-se diversos fenômenos que ocasionaram de certa forma este ocorrido. O fato de o efluente está diluído e com uma carga de insumos químicos extras alta prejudica tanto o processo de condutância eletrolítica quanto consequentemente os mecanismos de coagulação, isso fica nítido quando se observa a quantidade de sólidos totais dissolvidos e se realiza uma comparação com a batelada de experimentos realizada com o efluente proveniente do tingimento. A ausência de sólidos totais dissolvidos em quantidade maior pode ser uma das causas para a baixa eficácia, aliado a isso tem-se que o arranjo monopolar paralelo empreende as placas a mesma corrente, portanto valores maiores de tensão são necessários quando eletrólitos estão ausentes do seio do efluente, sendo estes principais responsáveis pela condução da corrente elétrica. Essa corrente exacerbada foi observada durante a realização dessa batelada, alguns circuitos chegaram a ser danificados, além das fontes trabalharem em potências muito elevadas o que aumenta os custos de tratamento. Diante da realização deste experimento iniciou-se uma correção em toda a Unidade Piloto de Tratamento, os eletrodos foram retirados e distanciados em aproximadamente 3mm, o circuito de corrente contínua pulsada foi desativado e realizou-se a ligação dos eletrodos, agora montados em uma associação mista (paralelo e série) a fonte de tensão, ou seja neste utilizou-se corrente contínua. Esta configuração foi utilizada para tratar por meio eletrolítico o efluente proveniente do tingimento.

Os resultados de condutividade elétrica, temperatura, sólidos totais dissolvidos (STD) para o processo de tratamento do efluente proveniente do tingimento encontram-se na tabela 10. A avaliação da condutividade elétrica do efluente é representada graficamente na figura 22.

Tabela 10. Medidas de condutividade elétrica, temperatura e sólidos totais dissolvidos obtidos durante o processo de tratamento do misto proveniente do tingimento.

Tempo (min)	Condutividade elétrica (mS.cm⁻¹)	Temperatura (°C)	Sólidos Totais Dissolvidos (STD) (g.l⁻¹)
0	39,8	38,24	27
5	52,74	38,91	26
10	51,71	39,72	25,3
15	51,36	39,31	25,6
20	50,73	39,33	25,5
25	52,64	39,52	24,7
30	52,31	39,64	25,6
35	52,77	39,83	26,6
40	51,91	39,95	26,00
45	52,99	40,01	26,30

Figura 23. Variação da condutividade elétrica do efluente proveniente do tingimento durante os 45 minutos de eletrocoagulação.



Como já explicado anteriormente a batelada 2 de experimentos foi realizada com modificações na Unidade de Tratamento Piloto. Primeiramente o que se observa com os resultados iniciais, ou seja, quando não foi realizado nenhum tipo de tratamento no efluente proveniente do tingimento são os altos valores de condutividade elétrica e a uma carga alta de sólidos totais dissolvidos. O processo fabril que envolve o tingimento de fibras utiliza-se de altas cargas de sais de forma a melhorar a fixação do corante reativo que tem boa solubilidade na fibra. A Fábrica de Redes Isaac não deixa de ser uma exceção, segundo Araújo (1984), o sal inicialmente possui efeito expansivo, sua inserção provoca uma solvatação maior dos íons dos sais pela água do banho de tingimento e consequentemente a liberação dos íons formados pelas moléculas de corantes não hidrolisadas para estes se fixarem a fibra. Em uma segunda etapa o sal tem ação retentiva e igualadora, pois o esgotamento de corante solubilizado se processará mais lentamente e de forma uniforme. Os sais mais utilizados são o NaCl, justamente o que encontra-se fazendo parte do processo fabril da Fábrica de Redes Isaac, além do Na₂SO₄, este último tem custo mais elevado representando uma desvantagem. Com essa problemática do excesso de sal, os eletrodos foram distanciados visando aumentar a resistência da passagem de corrente elétrica dentre os eletrodos, além disso o arranjo de monopolar em paralelo foi modificado e transformado em misto (série e paralelo), essas duas medidas foram formas encontradas de realizar o tratamento por eletrocoagulação sem prejudicar a remoção do contaminante. Notou-se que ocorreu um salto na condutividade a partir do tempo 0, isso justifica-se pelo excesso de eletrólitos contidos no efluente, o transporte de corrente elétrica é

mais eficaz, portanto a carga de massa de metal liberada do anodo de sacrifício na forma de cátion metálico contribuiu mais ainda para o processo de aumento da condutividade. Em comparação com o tratamento realizado no efluente do tanque 2 (batelada 1) todos os parâmetros deste tópico apresentaram valores maiores. Os valores de temperatura na faixa de 39-40°C são justificados pelo fato da grande passagem de corrente elétrica, as moléculas adquirem uma cinética maior, além de que a mobilidade iônica eleva-se, esses dois processos geram energia dissipada na forma de calor (efeito joule). Os sólidos totais dissolvidos terminaram menores do que o valor do efluente não tratado. Grandes cargas de sedimentos foram observados quando se estava realizado o tratamento do efluente proveniente do tingimento, sendo assim, uma parte do sal dissolvido no efluente poderá ter sido sedimentada via os processos de eletrocoagulação, em especial o mecanismo de varredura, isso explicaria o decréscimo no valor de sólidos totais dissolvidos (STD) que em termos quantitativos é pequeno.

5.5 Alumínio, ferro e manganês

No processo de eletrocoagulação o material dos eletrodos tem efeito significativo no tratamento de efluentes. No caso do tratamento de água potável, por exemplo, este deve ser atóxico além de possuir custo acessível. Para o caso do anodo, o material determina os íons e as espécies liberadas em solução, algumas destas atuando no processo de coagulação e outras na etapa de floculação. Os eletrodos que tem em sua composição ferro e alumínio segundo a literatura são os mais utilizados devido ao custo mais acessível, além das vantagens nos processos de remoção de poluentes do efluente ou água que se está a tratar. No presente trabalho a utilização de eletrodos de alumínio (99% Al) e Aço inoxidável (liga metálica) estava diretamente ligada a necessidade de se obter informações sobre as espécies formadas durante e após o processo de tratamento dos efluentes gerados pela Fábrica de Redes Isaac, por meio de métodos colorimétricos o equipamento multiparâmetros de campo utilizado realizava as medidas dos três parâmetros abordados neste tópico.

Os resultados dos valores quantificados de alumínio, ferro e manganês durante os processos de tratamento eletrolíticos encontram-se na tabela 11, para o caso do efluente proveniente do beneficiamento têxtil geral da Fábrica de Redes Isaac, e na tabela 12, para o caso do efluente proveniente do processo de tingimento adotado pela fábrica.

Tabela 11. Resultados das análises via método colorimétrico de alumínio, ferro e manganês para o efluente proveniente do beneficiamento geral da Fábrica de Redes Isaac (batelada 1).

Tempo (min)	Alumínio (mg.L ⁻¹)	Ferro (mg.L ⁻¹)	Manganês (mg.L ⁻¹)
0	1,52	0,32	5,9
10	0,89	0,17	4,6
20	0,85	0,08	3,8
30	1,06	0,25	4,7
40	1,09	0,14	4,7
50	1,42	0,16	4,8
60	1,75	0,12	4,8

Fonte: O autor, 2016.

Figura 24. Representação gráfica dos valores contidos na tabela 11 para [Al], [Fe] e [Mn] durante os 60 minutos de eletrocoagulação.

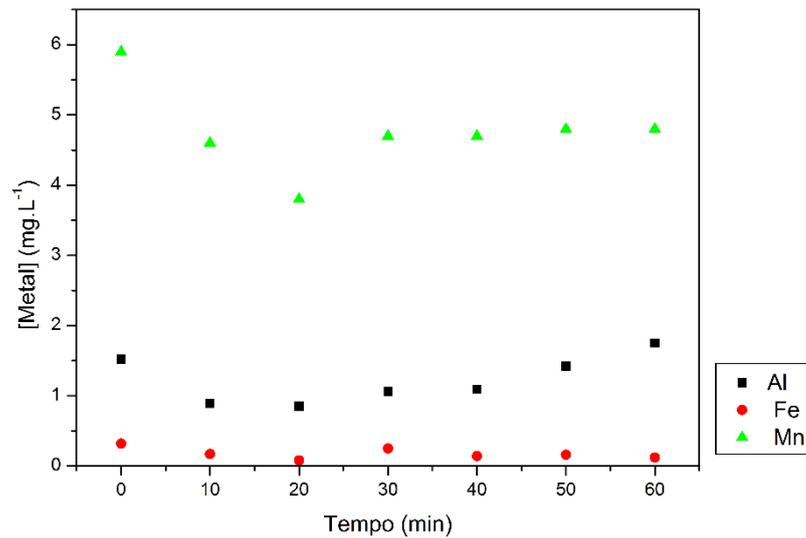
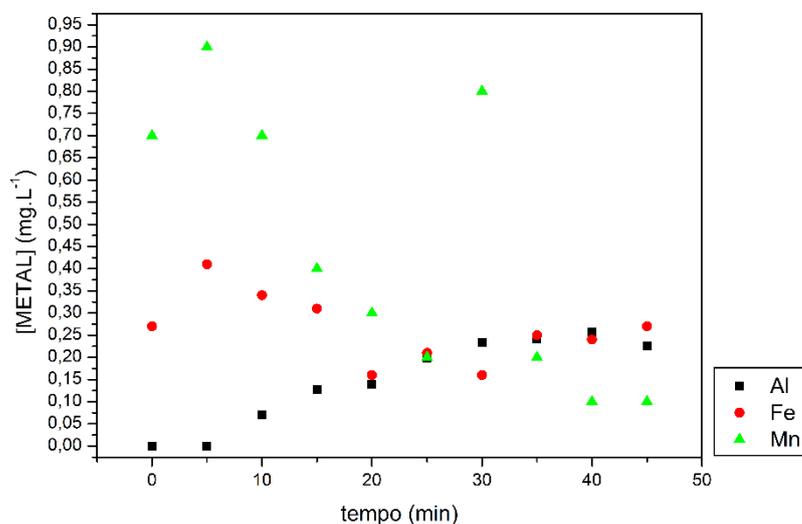


Tabela 12. Resultados das análises via método colorimétrico de alumínio, ferro e manganês para o efluente proveniente do tingimento da Fábrica de Redes Isaac (batelada 2).

Tempo (min)	Alumínio (mg.L ⁻¹)	Ferro (mg.L ⁻¹)	Manganês (mg.L ⁻¹)
0	0	0,27	0,7
5	0	0,41	0,9
10	0,071	0,34	0,7
15	0,128	0,31	0,4
20	0,14	0,16	0,3
25	0,198	0,21	0,2
30	0,234	0,16	0,8
35	0,242	0,25	0,2
40	0,258	0,24	0,1
45	0,225	0,27	0,1

Fonte: O autor, 2016.

Figura 25. Representação gráfica dos valores contidos na tabela 12 para [Al], [Fe] e [Mn] durante os 45 minutos de eletrocoagulação.



Diante dos resultados para os elementos deste tópico analisado, tem-se que os valores dos três elementos quantitativamente foram maiores para o caso do processo de tratamento do efluente misto, ou seja, a quantidade dessas espécies em solução encontrava-se bem maior. O contrário se observa nos resultados do tratamento do efluente proveniente do tingimento, valores menores de concentração foram medidos. Inicialmente deve-se observar na tabela 11 que o efluente sem nenhum tratamento já apresentava uma concentração dos elementos em solução, este fato deve-se a característica da reserva utilizada pela fábrica, são reservas captadas de poços onde se tem um contato direto do lençol freático com rochas que em sua composição podem ter esses, dentre outros elementos. O mesmo se repetiu na tabela 12, entretanto o parâmetro alumínio apresentou valor zero de concentração inicial, como trata-se de volumes grandes de água do poço são utilizados a matriz analítica sofre uma diferenciação, podendo ter em alguns casos ausência de algum dos elementos citados. Outro fator importante a se ressaltar e o de que o tratamento via eletrocoagulação possuiu eficiência de remoção maior para o efluente proveniente do tingimento, as concentrações mais baixas dos elementos abordados neste tópico já eram esperadas, isso se deve ao fato de que os cátions metálicos (Al^{3+} , $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, dentre outros) são os potenciais agentes de coagulação, sua baixa concentração específica indica que este deve estar sedimentando ou flotando (dependendo da densidade do floco) junto ao poluente devido aos mecanismos de adsorção e varredura dos contaminantes presentes no efluente. Este fenômeno foi bastante observado para o caso do efluente descartado

do tingimento, a sedimentação era rápida, formando uma camada de lodo significativa no fundo do reator.

A especiação dos agente coagulantes nesta etapa garante diretamente a eficiência na remoção dos poluentes contidos no efluente. No caso do alumínio o cátion metálico produzido no anodo de sacrifício pode atuar de várias maneiras (dependendo do pH, das propriedades estruturais do poluente e concentração da solução), podendo interagir diretamente com o poluente, hidrolisar para formar um complexo hidroxí-alumínio ou formar precipitado. A geração de espécies de Al no processo de eletrocoagulação é geralmente explicada em termos de dois principais mecanismos que ocorrem durante o processo de coagulação, são estes: neutralização de cargas dos coloides negativamente carregados, por produtos catiônicos hidrolisados, e a incorporação ao precipitado amorfo formado via floculação por varredura. Sendo assim, a concentração deste elemento após estes processos ocorrerem deve diminuir, indicando que o contaminante está sendo removido. Cañizares, et al., (2005) os íons Al^{3+} combinados a hidroxila (OH^-) gerados durante o processo de eletrocoagulação reagem o para formar espécies poliméricas tais como $Al_6(OH)_{15}^{3+}$, $Al_7(OH)_{17}^{4+}$, $Al_8(OH)_{20}^{4+}$, $Al_{13}(OH)_{24}^{7+}$, dentre outras que se transformam em espécies monoméricas menores e $Al(OH)_3$, essa grande especiação varia conforme o pH, mas já desponta o alumínio com boas possibilidades de remoção de poluentes. Uma grande desvantagem da utilização de eletrodos de alumínio se dá em relação a passivação por meio da formação de filme na superfície do eletrodo de Al, de acordo com Crespilho, et al., (2004) durante o processo eletrolítico a liberação de íons (OH^-) próxima a região do cátodo promove o ataque da superfície do eletrodo ocorrendo a formação da camada de passivação, esse fator acarreta na perda de eficiência do sistema devido à queda da passagem de corrente elétrica.

A especiação do cátion do ferro (Fe^{3+}) produzido pelo anodo de aço inoxidável é bem menos complexa do que a do alumínio, os íons Fe^{3+} podem sofrer hidrólise e, dependendo do pH da solução, formar as espécies $Fe(OH)^{2+}$, $Fe(OH)_2^+$, $Fe(OH)_3$ em condições ácidas, como o efluente trabalhado na Fábrica de Redes Isaac tinha a faixa alcalina de trabalho, as espécies formadas eram $Fe(OH)_6^-$ e $Fe(OH)_4^-$, além disso a precipitação de $Fe(OH)_3$ mais próximo aos catodo, este precipitado tem cor característica amarelada que pode impregnar a solução, aliado a isso possui boa capacidade de adsorção (KOBAYA, *et al.*, 2006). Além de precipitar $Fe(OH)_3$, tem-se em menor quantidade na faixa alcalina o $Fe(OH)_2$. Um das problemáticas obtidas na batelada de tratamento realizada no efluente proveniente do tingimento é justamente a cor final obtida. Um aspecto amarelo-esverdeado marcou a coleta da última alíquota como mostrado em comparação ao efluente bruto na figura 24.

Figura 26. Representação do efluente bruto comparado ao efluente tratado, ambos provenientes do tingimento, por eletrocoagulação durante 45 minutos.



Fonte: O autor, 2016.

Segundo os autores Cañizares et al, (2005) e Kobya et al, (2006) o efluente durante e após o tratamento pode apresentar uma cor verde ou amarela bastante forte, esta coloração é proveniente dos íons Fe^{2+} (verde) e Fe^{3+} (amarelo) gerados no tratamento eletrolítico. Este fator foi observado como descrito na figura 24, entretanto uma grande ressalva a ser feita está em relação ao uso dos eletrodos de aço inoxidável, pois uma liga de composição descrita na tabela 2 representa sua formação, sendo assim podem ocorrer a especiação no efluente final de mais do que esses dois elementos (Fe e Al) de forma mais profunda.

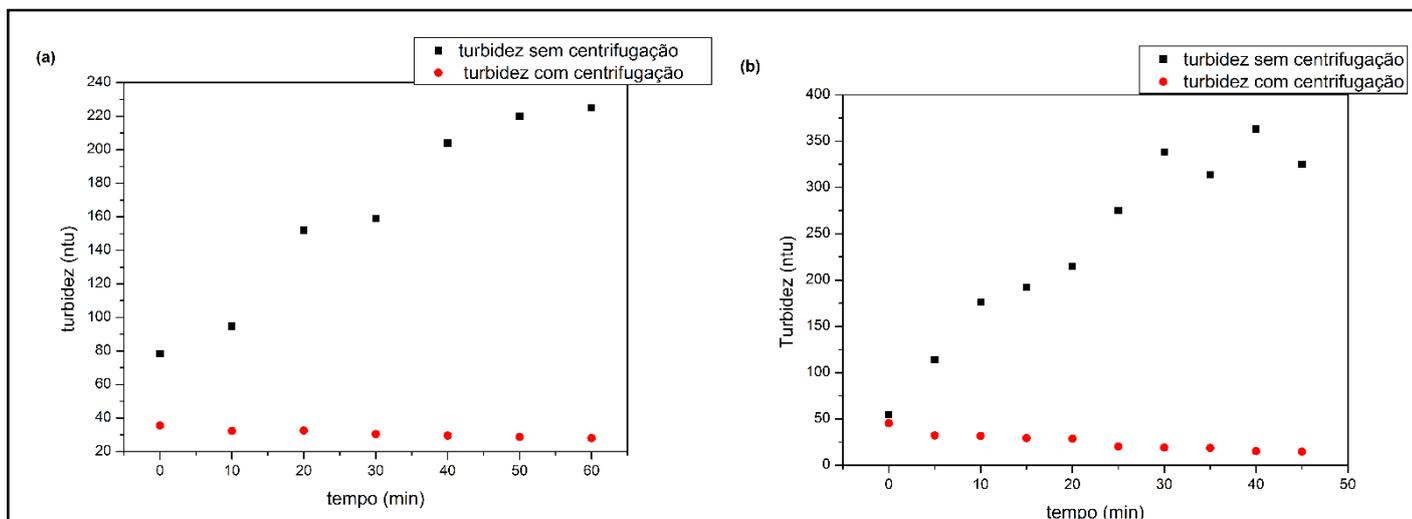
5.6 Turbidez

Este parâmetro representa a medida da dificuldade de um feixe de luz atravessar uma certa quantidade de efluente ou água, conferindo a amostra aquosa uma aparência turva. As principais causas da turbidez são: presença de matéria sólida em suspensão, matéria orgânica e inorgânica finamente divididas, organismos microscópicos e algas. No caso de reservas naturais a origem desses materiais pode ser o solo ou a formação rochosa em contato com a reserva. Para o setor industrial a natureza dos sólidos causadores de turbidez passa a ser mais específica ao tipo de atividade que se aborda, no caso de efluentes têxteis substâncias inorgânicas provenientes de etapas extras do processo de beneficiamento da fibra, além de corante utilizado no tingimento que não sofreu boa dissolução representam esses sólidos que

causam a aparência turva, além da alta carga de cor, visto que a turbidez é um interferente direto nas medições de cor de efluentes industriais.

O resultados de turbidez obtidos durante o processo de eletrocoagulação estão representados na figura 25(a) e 25(b). Em 25(a) tem-se os resultados de amostras coletadas durante o tempo de 60 minutos para o efluente proveniente do beneficiamento geral da fibra (efluente misto), e 25(b) apresentam-se os resultados provenientes das coletas do efluente descartado do tingimento tratado durante 45 minutos no reator de eletrocoagulação. As medições de turbidez foram realizadas *in situ* e após a centrifugação, essa última análise tinha como objetivo observar resíduos que ainda possam ter continuado mesmo após o processo de eliminação dos sólidos via centrifugação, visto que, as amostras do efluente proveniente do tingimento mesmo refrigerada continuavam a apresentar sedimentos no fundo dos tubos de Falcon em todas as alíquotas.

Figura 27. Resultados de turbidez obtidos durante o processo de eletrocoagulação. (a) efluente proveniente do beneficiamento geral da fibra, 60 minutos – (b) efluente proveniente do tingimento, 45 minutos.



O que se observa nas figuras 25(a) e 25(b), para as duas bateladas, é o crescimento da turbidez após o início do processo de eletrocoagulação, a formação de flocos continuada provavelmente tem grande atuação nesta etapa, esses flocos devido agitação podem ser divididos devido as grandes rotações a que se submete o efluente no reator, sendo assim, a carga de sólidos em suspensão aumenta e consequentemente as medidas de turbidez se apresentam elevadas. No caso do efluente descartado do tingimento se observava que a carga de sólidos suspensos e flocos formados foi bem mais elevada do que o proveniente do beneficiamento geral da fibra, como já ressaltado em outros tópicos isso se deve a eficácia dos parâmetros que

competem aos mecanismos da eletrocoagulação, por exemplo, a passivação anódica para o caso da batelada 2 foi muito menor, o que gerou maior densidade de corrente elétrica no sistema (potencialização da dissolução anódica) e conseqüentemente uma liberação maior de agente coagulante, sendo assim, o nível de sólidos formados visando remover o corante foi bastante elevado e a turbidez rapidamente saltou para valores bem altos.

Após a centrifugação os resultados se apresentaram bem próximos, mas como dito anteriormente o efluente tratado proveniente do tingimento continuou a sedimentar partículas mesmo após cessar qualquer tipo de processo sobre o efluente, o mesmo estava contido em um refrigerador.

6. CONCLUSÃO

No estudo presente verificou-se que a utilização da Unidade de Tratamento Piloto visando tratar efluente com matriz analítica real via processo de eletrocoagulação, obteve eficácia na remoção de cor final quando se estava tratando o efluente geral do processo de beneficiamento da fibra (algodão) na Fábrica de Redes Isaac de aproximadamente de 27%, para o efluente proveniente da etapa de tingimento do processo adotado pela Fábrica de Redes Isaac tem-se o percentual aproximado de 60% de remoção de cor final, em ambos os casos o parâmetro de cor adotado para estes percentuais é o real. A cor aparente obtida durante as duas bateladas de experimento se mostrou ascendente durante boa parte do tratamento, sendo os maiores valores apresentados para o tratamento do efluente misto na batelada 1. O valores de cor aparente obtido para o efluente misto (beneficiamento total) bruto foi de 12350 Pt-Co, após o término obteve-se 11000 Pt-Co (uma diferença bruta de 10,93%). Para o caso do efluente proveniente do tingimento o valor de cor real que obteve-se para a amostra bruta foi de 1105 Pt-Co, após o término o valor de cor obtido foi de 7740 Pt-Co, ocorreu uma aumento de 85,72% no parâmetro.

Quanto ao comportamento dos outros parâmetros físico-químicos avaliados durante o processo de eletrocoagulação para os dois efluentes estudados, verificou-se que os resultados obtidos eram prioritariamente dependentes da condutividade, pH e temperatura, visto que, o comportamento dos demais parâmetros analisados se modificavam conforme os resultados obtidos para estes três parâmetros. A condutividade apresentou-se elevada inicialmente e sua tendência devido ao início do processo de eletrocoagulação foi em ambos os casos aumentar, apesar de pequenas oscilações. Os valores de pH apresentaram faixas próximas para os dois efluentes tratados, estes estavam inseridos na parte alcalina da escala. A temperatura para o efluente proveniente do tingimento foi um pouco mais alta, com uma elevação pouco acentuada, mas que foi responsável por auxiliar na eficácia maior da remoção de cor nesta batelada.

Devido ainda a carga de cor considerável, o efluente tratado na batelada 1 está prejudicado quanto a ideia de reaproveitamento. Entretanto o efluente tratado na batelada 2 já possuiu bons índices de remoção de cor citados anteriormente, um polimento mais adequado com outras tecnologias de tratamento poderá fazer com que o efluente possa ser reutilizado novamente durante o processo de produção e tingimento da fibra, visto que, Jaguaruana encontra-se situada dentro de um perímetro que representa o semiárido nordestino a oferta de água é prejudicada e essa reutilização seria uma saída viável.

BIBLIOGRAFIA

ABDALA NETO, E. F. Pré e pós-tratamento por eletro-oxidação associada à fotocatalise heterogênea em uma eta por filtração direta visando a redução dos precursores dos compostos organoclorados. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2012.

ABIT –Indústria têxtil e de confecção brasileira– Brasília, 2013.

AMORIM, C. C.; LEAO, M. M. M.; MOREIRA, R. F. P. M. Comparação entre diferentes Processos Oxidativos Avançados para degradação de corante azo. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 14, n.4, p. 543-550, 2009.

ANDRADE, F. Remoção de cor de efluentes têxteis com tratamento de lodos ativados e um polieletrólito orgânico. Dissertação – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2003.

AOUDJ, S.; KHELIFA, A.; DROUCHE, N.; HECINI, M.; HAMITOCHE, H.; Electrocoagulation process applied to wastewater containing dyes from textile industry. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 49, p. 1176-1182, 2010.

APHA-AWWA-WEF. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 20th ed., New York, U.S.A, 2005.

ARAÚJO, M.; CASTRO, E.M.M. Manual de Engenharia Têxtil. Volume 1. **Fundação Calouste Gulbenkian**. Lisboa, p.694, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO AÇO INOXIDÁVEL. Coletânea de informações técnicas – Aço inoxidável, Composição química e aplicações dos aços inoxidáveis. 9 p. Disponível em: <<http://www.abinox.org.br/upfiles/arquivos/biblioteca/composicaoquimica.pdf>>. Acesso em: 14 junho 2016.

BASTOS, A.C.L.M; RODRIGUES, E.M.S., SOUZA, J.P.I. **Físico-química**. 22^a. ed., Editora Universitária UFPA, Belém, 302 p., 2011.

BERNARDO, D. L.; BERNANRDO, A. D. D.; Métodos e técnicas de tratamento de água. São Paulo: RiMa, 2005. v.1 1566p.

BRASIL. **Resolução Nº 430 de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Disponível em:< <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>> Acesso em: 01/05/2014.

CAN, O. T.; KOBYA,; M. DEMIRBAS, E.; BAYRAMOGLU, M.; Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. **Chemosphere**, v.62, n. 2, p. 181-187, 2002.

CAVALCANTI, J. E. W. A. Manual de Tratamento de Efluentes Industriais. São Paulo: Ambiental, 2009. 453p.

CHEN, X.; CHEN, G.; YUE, P. L., Separation of pollutants from restaurant wastewater electrocoagulation. **Separation and Purification Technology**. n.19, p. 65-76, 2000.

COMNINELLIS, C.; GUOHUA, C. Electrochemistry for the environment. New York: Springer, 2010. 567p.

CRESPILHO, F. N.; SANTANA, C. G.; REZENDE, M. O. O. Tratamento de efluente da indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação. **Química Nova**, v.3, São Paulo - SP, 2004.

CAÑIZARES, P.; CARMONA, M.; LOBATO, J.; MARTINEZ, F.; RODRIGO, M.A. Electrodeposition of aluminium electrodes in electrocoagulation processes. **Ind. Eng. Chem.** v.44, p.4178-4185, 2005.

DANESHVAR N., KHATAEE A.R, AMANI GHADIM A.R., RASOULIFARD M.H. Decolorization of C.I. Acid Yellow 23 solution by electrocoagulation process: Investigation of operational parameters and evaluation of specific electrical energy consumption (SEEC). **Journal of Hazardous Materials**. v. 148, 566–572, 2007.

DANESHVAR, N.; OLADGARAGOZE, A.; DJAFARZADEH, N. Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: an investigation of the effect of operational parameters. **Journal of Hazardous Materials**, v.129, p.116–122, 2006.

ECKENFELDER, W. W. Industrial Water Pollution Control. New York: McGraw Hill, 2000. 584p.

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

GROVER, D.P.; ZHOU, J.L.; FRICKERS, P.E.; READMAN, J.W. X. Improved removal of estrogenic and pharmaceutical compounds in sewage effluent by full scale granular activated carbon: impact on receiving river water. **Journal of Hazardous Materials**, v. 185, p. 1005 - 1011, 2011.

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

KHANDEGAR, V.; SAROHA, ANIL K.; Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent - A review. **Journal of Environmental Management**, v. 128, p. 949-963, 2013.

KOBYA, M.; DEMIRBAS, E. Evaluations of operating parameters on treatment of can manufacturing wastewater by electrocoagulation. **Journal of Water Process Engineering**, v. 8, p. 64–74, 2015.

KOUBA, J. F.; PING, Z. (1994). Color Removal for Textiles dyeing Wastewater. **Fluid/Particle Separation Journal**. Vol. 7, n° 3: 87-90.

KUNZ, A.; PERALTA-ZAMORA, P.; GOMES, S.; DURÁN, N.; Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química Nova**, v.25, p.78-82, 2002.

MARCELINO, R. B. P.; FRADE, P. R.; AMORIM, C. C.; LEÃO, M. M. D.; Tendências e desafios na aplicação de tecnologias avançadas para o tratamento de efluentes industriais não biodegradáveis: Atuação do grupo de pesquisas POA Control da UFMG – **Revista UFMG**, v. 20, n.2, p. 358-383, 2013.

MARTINS, A. F., FRANK, Carla da Silveira, WILDE, Marcelo Luís. Treatment of a Trifluraline Effluent by means of Oxidation-Coagulation with Fe(VI) and Combined Fenton Processes. *Clean - Soil, Air, Water.* , v.35, p.88 - 89, 2007.

MOLLAH, M. Y. A.; *et al.* Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. **J. Hazard. Mater**, v. 114, n. 1–3, p. 199–210, 2004.

PÉREZ, M.; TORRADES, F.; DOMENECH, X.; PERAL, J. Fenton and Photo-Fenton Oxidation of Textile Effluents. **Water Research**, v. 36, p.2703-2710, 2002.

RIBEIRO, J.P. Estudo da otimização do processo H₂O₂/UV para degradação do corante remazol vermelho RB 133%. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração – Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

ROBINSON, T.; MC MULLAN, G.; MARCHANT, R.; NIGAM, P. (2001). Remediation of dyes intextile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*, vol. 77, pp. 247-255.

SINDITÊXTIL - FIEC - O Fiar e o Tecer 120 Anos da Indústria Têxtil no Ceará. Fortaleza - Ceará 2002

SKOOG, WEST, HOLLER, CROUCH, Fundamentos de Química Analítica, Tradução da 8ª Edição norte-americana, Editora Thomson, São Paulo-SP, 2006.

VOGEL, Análise Química Quantitativa, 6ª Edição, LTC Editora, Rio de Janeiro-RJ, 2002.

VON SPERLING, M. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos, v.01. Minas Gerais: ABES, 1995.