

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

PATRÍCIA CAROLINE KOSTANESKI

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA INJEÇÃO DE AR COMPRIMIDO NO  
TRATAMENTO ELETROQUÍMICO DE EFLUENTE TÊXTIL SINTÉTICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MEDIANEIRA

2015

PATRÍCIA CAROLINE KOSTANESKI

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA INJEÇÃO DE AR COMPRIMIDO NO  
TRATAMENTO ELETROQUÍMICO DE EFLUENTE TÊXTIL SINTÉTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental, do Curso de Engenharia Ambiental, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Medianeira.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Eyng

MEDIANEIRA

2015



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **AVALIAÇÃO DO EFEITO DA INJEÇÃO DE AR COMPRIMIDO NO TRATAMENTO ELETROQUÍMICO DE EFLUENTE TÊXTIL SINTÉTICO**

por

**PATRÍCIA CAROLINE KOSTANESKI**

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado às 16:00h do dia 15 de junho de 2015, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Eduardo Eyng  
Orientador

---

Prof. Dr. Laercio Mantovani Frare  
Membro titular

---

Prof. Dr. Rafael Arioli  
Membro titular

Dedico este trabalho à meu pai Antonio e  
à minha mãe Shirley, pelo apoio  
incondicional.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho é o resultado de um dos meus maiores desafios até agora superados, e, mesmo com os inúmeros problemas enfrentados antecedentes à ele, tenho a agradecer algumas pessoas da qual tive o apoio e me ajudaram a vencer os obstáculos, pois, graças à elas pude concretizá-lo.

Sobretudo, agradeço a Deus, por ter guiado e iluminado meu caminho e minha vida.

Um muito obrigada especial aos meus pais, de onde sempre vem minha força para prosseguir, apoio e carinho, amo vocês.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Eyng, da qual sou profundamente grata pela compreensão, apoio, paciência, amizade e confiança depositada, guiando-me nessa jornada.

À todos os professores, pelos ensinamentos transmitidos ao longo desses anos e que contribuíram para o alcance dessa formação.

Aos demais familiares que sempre estiveram ao meu lado.

Aos meus amigos pela sincera amizade, compreensão e apoio, em especial as minhas amigas Alessandra Freddo, Ana Paula Gusmão, Jheini Cristina Camana e Paula Gabriela Ripp que me acolheram em seus lares para que eu pudesse executar essa pesquisa e ao meu amigo Vítor Guedes Pereira pelo companheirismo demonstrado estando sempre ao meu lado tornando mais fácil essa caminhada.

Aos colegas de turma do qual vivenciei importantes momentos ao longo desta graduação.

Enfim, peço desculpas àqueles que não estão presentes nas palavras, mas, deixo aqui um sincero obrigada a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste trabalho.

“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

KOSTANESKI, Patrícia C. **Avaliação do efeito da injeção de ar comprimido no tratamento eletroquímico de efluente têxtil sintético**. 2015. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2015.

As indústrias têxteis apresentaram aumento de suas atividades devido às maiores demandas decorrentes do crescimento populacional nos últimos anos. Ao mesmo tempo que se desenvolve, os seus impactos ambientais associados seguem a mesma proporção, sendo os recursos hídricos os mais afetados. A eletrofloculação tem ganhado destaque por apresentar sucesso no tratamento de efluentes. Com isso, optou-se por verificar se a injeção de ar comprimido no sistema contribuiria no aumento da eficiência do tratamento por eletrofloculação, colaborando com a flotação de impurezas. Utilizaram-se soluções aquosas de corante Reativo Azul 5G, a fim de analisar a eficiência do tratamento por eletrofloculação e a eficiência desse sistema com injeção de ar comprimido, ambos em fluxo contínuo, além da dinâmica do sistema para ambas as configurações. O tempo de retenção hidráulico utilizado foi de 20 minutos, com intensidade da corrente nos eletrodos fixada em 5 A. Coletou-se amostras nos tempos de 20, 30 e 40 minutos para avaliar a eficiência de tratamento. Para a injeção de ar comprimido, incluiu-se duas mangueiras de Poliuretano de 4 mm, com cerca de 50 cm cada. Nas mesmas foram feitos pequenos orifícios para que promovessem a saída de ar, com pressão fixada em 1,2 bar. Como estratégia de planejamento experimental utilizou-se o Delineamento Inteiramente Casualizado – DIC. Foram realizadas 6 repetições para cada um dos dois tratamentos estudados. A análise de variância – ANOVA e o teste de comparação de médias de Tukey foram utilizados com um nível de significância de 5%. Através da ANOVA tornou-se possível inferir que existe diferença significativa entre, ao menos, dois tempos de amostragem e que a partir de 30 minutos pelo teste de Tukey o sistema estava em estado estacionário para o tratamento somente por eletrofloculação. Foi possível verificar, através das médias das amostras coletadas nos diferentes tempos, que os resultados encontrados não apresentaram diferença significativa, onde não alcançou-se o estado estacionário. Comparando os dois sistemas empregados na pesquisa (sem e com ar comprimido), induziu-se diferença entre os resultados dos tratamentos, onde a injeção de ar comprimido promoveu a mistura do meio, não permitindo que houvesse a transferência de massa do corante da solução aquosa utilizada para o lodo, ou seja, fez com que a flotação do sistema sofresse interferência, apresentando queda na eficiência do tratamento.

**Palavras-chave:** Efluente têxtil. Eletrofloculação. Flotação. Ar comprimido. Corante Reativo Azul 5G.

## ABSTRACT

KOSTANESKI, Patrícia C. **Evaluation of the effect of injecting compressed air in the electrochemical treatment of a synthetic textile effluent.** 2015. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2015.

Due to the population growth in recent years, the textile industry's demand has showed an increase of its activities. At the same time it develops, its associated environmental impacts follow the same proportion, and water resources are the most affected. The electroflocculation has gained prominence by being successful in treating wastewater. Thus, it was decided to check whether the injection of compressed air in the system contribute in the efficiency increase of the electroflocculation treatment, collaborating with the flotation of impurities. Aqueous solutions of dye Reactive Blue 5G was used to analyze the effectiveness of electroflocculation treatment and the efficiency of the system with injection of compressed air, both in continuous flow, in addition to the system dynamics for both configurations. The employed hydraulic retention time was of 20 minutes, with the current intensity in the electrodes set at 5 A. Samples were collected at 20, 30 and 40 minutes to analyze the treatment efficiency. For the injection of compressed air, two 4 mm Polyurethane hoses with about 50cm each were included. Small holes were poked into the hoses to cause the air to leak with pressure set at 1.2 bar. As an experimental planning strategy Completely Randomized Design – CRD was used. Six repetitions were performed for each of the two studied treatments. The Analysis of variance – ANOVA and Tukey's mean comparison test were adopted with a 5% significance level. As a result of ANOVA it became possible to infer that there is a significant difference in between at least two sampling times and after 30 minutes with Tukey's test the system was at a steady state for the treatment only by electroflocculation. It was possible to verify through the means of the samples that were collected at different times that the results found no significant difference, where the steady state was not reached. Comparing the two systems employed in the study (with and without compressed air) it induced a difference between the results of the treatments, where the injection of compressed air promoted the mixture, were not allowing the mass transfer of dye from the aqueous solution used for the sludge, in other words, it caused the flotation of the system to suffer interference, declining the treatment's efficiency.

**Keywords:** Textile Effluent. Electroflocculation. Flotation. Compressed air. Dye Reactive Blue 5G.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura molecular do corante Reativo Azul 5G .....	20
Figura 2 - Esquema ilustrativo do processo de adsorção e formação de flóculos na eletrofloculação .....	24
Figura 3 - Desenho ilustrativo do processo de flotação.....	25
Figura 4 - Câmara eletrolítica utilizada para o tratamento de solução de corante Reativo Azul 5G .....	27
Figura 5 - Fonte de alimentação utilizada (marca <i>Instrutherm</i> ) .....	27
Figura 6 - Montagem experimental no módulo eletrolítico para o tratamento por eletrofloculação com injeção de ar comprimido.....	28
Figura 7 - Espectrofotômetro de absorção molecular UV-Vis de feixe simples (marca <i>PerkinElmer</i> ).....	30
Figura 8 - Amostras de ensaio de eletrofloculação, da esquerda para a direita – solução de corante s/ tratamento, 20 min, 30 min e 40 min, respectivamente .....	31
Figura 9 - Gráfico de dispersão da eficiência, médias e desvios padrões para os tempos de amostragem dos ensaios de eletrofloculação.....	32
Figura 10 - Amostras de ensaio de eletrofloculação com injeção de ar comprimido, da esquerda para a direita – solução de corante s/ tratamento, 20 min, 30 min e 40 min, respectivamente .....	34
Figura 11 - Gráfico de dispersão da eficiência, médias e desvios padrões para os tempos de amostragem dos ensaios de eletrofloculação com injeção de ar comprimido .....	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados dos ensaios do tratamento por eletrofloculação .....	31
Tabela 2 – Eficiência, média e desvios padrões dos tempos de amostragem do tratamento por eletrofloculação .....	32
Tabela 3 - ANOVA do tratamento por eletrofloculação .....	33
Tabela 4 - Teste de Tukey para comparação dos tempos do tratamento por eletrofloculação .....	33
Tabela 5 - Resultados dos ensaios do tratamento por eletrofloculação com injeção de ar comprimido.....	34
Tabela 6 - Eficiência, média e desvios padrões dos tempos de amostragem do tratamento por eletrofloculação com injeção de ar comprimido .....	35
Tabela 7 - ANOVA do tratamento por eletrofloculação com injeção de ar comprimido .....	36
Tabela 8 - Teste de Tukey para comparação dos tempos do tratamento por eletrofloculação com injeção de ar comprimido.....	36
Tabela 9 - ANOVA de comparação dos tratamentos no tempo de amostragem de 20 minutos.....	37
Tabela 10 - ANOVA de comparação dos tratamentos no tempo de amostragem de 30 minutos.....	37
Tabela 11 - ANOVA de comparação dos tratamentos no tempo de amostragem de 40 minutos.....	37

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>14</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>15</b>
3.1 EFLUENTES TÊXTEIS .....	15
3.2 CORANTES .....	16
3.2.1 Classificação dos corantes.....	17
3.2.1.1 Corantes à tina.....	17
3.2.1.2 Corantes reativos .....	17
3.2.1.3 Corantes dispersos ou plastosolúveis .....	18
3.2.1.4 Corantes diretos .....	18
3.2.1.5 Corantes ácidos .....	18
3.2.1.6 Corantes catiônicos (básicos modificados) .....	18
3.2.1.7 Corantes ao enxofre (sulfurosos) .....	19
3.2.1.8 Corantes naturais .....	19
3.3 CORANTE REATIVO AZUL 5G .....	19
3.4 TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS.....	20
3.4.1 Eletrofloculação.....	22
3.4.2 Flotação.....	24
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>26</b>
4.1 PREPARO DA SOLUÇÃO DE CORANTE REATIVO AZUL 5G .....	26
4.2 TRATAMENTO POR ELETROFLOCULAÇÃO EM FLUXO CONTÍNUO .....	26
4.3 TRATAMENTO POR ELETROFLOCULAÇÃO COM INJEÇÃO DE AR COMPRIMIDO EM FLUXO CONTÍNUO.....	28
4.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	28
4.5 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TRATAMENTO .....	29
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>31</b>
5.1 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO DO REATOR ELETROQUÍMICO SEM A INJEÇÃO DE AR COMPRIMIDO .....	31
5.2 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO DO REATOR ELETROQUÍMICO COM A INJEÇÃO DE AR COMPRIMIDO .....	33
5.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS TRATAMENTOS POR ELETROFLOCULAÇÃO SEM E COM INJEÇÃO DE AR COMPRIMIDO .....	36
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	<b>38</b>

<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>39</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>40</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial nos últimos anos trouxe consigo grandes demandas para o setor produtivo. Com isso, acelerou o crescimento das atividades industriais para que pudessem suprir essas necessidades, e assim acabam acarretando cada vez mais a geração de resíduos sólidos e/ou líquidos com características altamente tóxicas e de baixa biodegradabilidade, o que torna crescente a preocupação com a conservação ambiental a fim de se buscarem alternativas que tratem essa poluição (BORBA et al., 2010).

Especificamente, as indústrias têxteis são representantes deste desenvolvimento e causadoras dessa problemática, onde, ao mesmo tempo que essa atividade se desenvolve, os seus impactos ambientais associados seguem a mesma proporção, sendo os recursos hídricos os mais afetados, devido aos imensos volumes de efluentes originados das etapas de tingimento e acabamento que possuem uma ampla variedade de corantes e outros produtos (CAN et al., 2006).

Desta forma, essa intensa demanda de água vem sendo alvo de preocupações e investigações decorrentes das enormes quantidades de produtos químicos exigidos para o tratamento com vistas ao seu reuso ou lançamento direto nos corpos d'água, bem como proporcionar sua adequação às leis e padrões estabelecidos. Atualmente, os órgãos ambientais têm imposto normas de restrições cada vez maiores ao despejo de efluentes nos corpos hídricos que possam comprometer a qualidade dos ecossistemas aquáticos (BORBA et al., 2010).

Nos mais diversos segmentos industriais, a utilização de métodos físicos, químicos e biológicos são empregados para o tratamento de seus efluentes. Através deles, ocorre a mudança de fase e a conversão de seus poluentes para compostos inertes (AQUINO NETO et al., 2011). Porém, são métodos que se apresentam inadequados e insuficientes no tratamento das águas residuárias das indústrias têxteis, isso devido a ampla variação de componentes presentes nelas (KOBAYA; CAN; BAYRAMOGLU, 2003).

Neste contexto, algumas técnicas que empregam a utilização de reatores eletroquímicos para o tratamento de vários tipos de efluentes, vêm apresentando resultados bastante satisfatórios (CRESPILHO; REZENDE, 2004). São processos conhecidos como eletrofloculação, eletroflotação ou eletrocoagulação.

Na indústria têxtil a eletrofloculação tem ganhado destaque por apresentar sucesso no tratamento de seus poluentes (CAN et al., 2006).

O processo da eletrofloculação proporciona, em um reator com um arranjo de eletrodos de ferro ou alumínio, um ambiente físico-químico através da oxidação eletrolítica que desestabiliza o poluente (MOLLAH et al., 2004; RODRIGUEZ et al., 2007).

Esse método de tratamento envolve algumas etapas, das quais compreendem: a oxidação do ânodo metálico de sacrifício gerando cátions capazes de reagirem com as moléculas de água formando hidróxidos ou polihidróxidos, ao mesmo tempo que ocorre a eletrólise da água formando microbolhas de oxigênio no ânodo e hidrogênio no cátodo. Na sequência, os hidróxidos adsorvem-se em partículas coloidais originando flóculos que agregam as impurezas, e então, as microbolhas geradas na eletrólise são responsáveis por arrastar estes poluentes para a superfície, fazendo a flotação do lodo (AQUINO NETO et al., 2011; CRESPILO; SANTANA; REZENDE, 2004; MENESES et al., 2012). O flotado (lodo) pode então ser removido por alguns processos convencionais, dentre eles, a sucção e raspagem (CRESPILO; REZENDE, 2004)

Considerando assim a técnica de eletrofloculação já empregada em efluentes têxteis, optou-se por verificar se a injeção de ar comprimido no sistema contribuiria no aumento da eficiência do tratamento por eletrofloculação, colaborando com a elevação mais rápida do poluente à superfície de forma a proporcionar maior quantidade do tratado em mesmo tempo do tratamento comumente empregado, para isso foram utilizadas soluções aquosas de corante Reativo Azul 5G.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito da injeção de ar comprimido na remoção do corante Reativo Azul 5G de soluções aquosas tratadas por eletrofloculação.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a eficiência do tratamento por eletrofloculação de soluções aquosas de corante Reativo Azul 5G, em fluxo contínuo;
- Verificar a eficiência do sistema de tratamento por eletrofloculação de soluções aquosas de corante Reativo Azul 5G após injeção de ar comprimido, em fluxo contínuo.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 EFLUENTES TÊXTEIS

Indústrias que utilizam grandes volumes de águas em seus processos são responsáveis pela geração da mesma maneira, de imensa quantidade de efluentes líquidos, sendo caracterizadas no entanto, como fortes contribuintes na contaminação de corpos d'água, onde sobressaem-se as indústrias químicas, papelerias, têxteis e relacionadas às atividades de refinaria de petróleo, representantes de uma importante parcela geradora dessa poluição (FREIRE et al., 2000).

Na indústria têxtil, são as etapas que compreendem o tingimento e acabamento de peças, as responsáveis pelo imenso consumo e descarte de água, essas no entanto, constituídas de produtos químicos, acarretando grandes concentrações de compostos tóxicos nos efluentes dos processos, que são advindos do uso de corantes, da qual necessitam ser removidos antes de serem descartados (CHENIK et al., 2013).

Entretanto, à medida que a pesquisa avança e aumenta o desenvolvimento, são produzidos novos reagentes e técnicas que refletem nos processos e despejos gerados (HASSEMER; SENS, 2002).

Nessas águas residuárias, encontram-se imensas quantidades de corantes que não reagiram, sólidos suspensos, sólidos dissolvidos, além de outros produtos químicos auxiliares dos processos, dependendo da reatividade dos corantes utilizados, cerca de 10 a 20 % correspondem a parcela dissolvida na água (RAJU et al., 2008).

A combinação de cores fortes e alto teores de sólidos proporcionam uma elevada turbidez nos efluentes das indústrias têxteis, tornando-o resistente a remoção de poluentes, caracterizando-se como uma significativa fonte de poluição ambiental quando lançados em corpos d'água (KOBYA; CAN; BAYRAMOGLU, 2003). Podendo interferir na absorção de luz pela flora e fauna aquática, na solubilidade de gases, na acumulação potencial do poluente, direcionados para estações de tratamento de água municipais sendo alta fonte contaminante, seja em maiores ou menores níveis de concentração (GUARATINI; ZANONI, 2000; GARG et al., 2004).



As águas residuárias têxteis apresentam uma grande variação de cargas, decorrentes dos diferentes processos industriais que consistem na sequência de produção e do acabamento têxtil, fazendo uso de corante, produtos químicos e tensoativos espessantes, com altas concentrações de DBO e DQO e resistentes à biodegradação (HASSEMER; SENS, 2002).

Sendo assim, a aplicação dos tratamentos de efluentes industriais são os responsáveis pelos processos de remoção das impurezas geradas pela fabricação de produtos têxteis (CRESPILO; SANTANA; REZENDE, 2004). Nesse contexto, a fim de recuperar as águas processadas, muitos estudos estão sendo feitos na busca por opções tecnológicas que permitam sua reutilização (RAJU et al., 2008).

### 3.2 CORANTES

Corantes são definidos como substâncias fortemente coloridas que conferem cor quando aplicadas em um material (ABIQUIM, 2015). De acordo com Kimura et al. (1999), os corantes são considerados compostos químicos orgânicos que se apresentam coloridos quando absorvem luz visível devido a presença de grupos cromóforos como nitro, nitroso, azo e carbonila, sendo a cor intensificada e/ou alterada por grupos auxocromos como etila, nitro, amino, hidroxila, metóxi, cloro, bromo, entre outros.

As moléculas do corante são fixadas as fibras do tecido por meio de reações químicas, normalmente em soluções aquosas, podendo envolver quatro tipos de ligações: ligações iônicas, de hidrogênio, de Van Der Waals e covalentes (IMMICH, 2006).

Com o avanço tecnológico, o tingimento ocorre de acordo com a natureza, características estruturais e classificação da fibra têxtil, além da disponibilidade do corante, podendo ser necessárias variadas e inúmeras etapas (GUARANTINI; ZANONI, 2000).

Esses corantes, por sua vez, são caracterizados por apresentarem resistência à descoloração, à exposição a luz, à água e a uma diversidade de produtos químicos (CERQUEIRA, 2006).

Desta forma, a remoção e descoloração dos corantes presentes nas águas residuárias antes do descarte se torna uma preocupação da qual deve-se ser dada extrema importância, tendo em vista à rigorosa legislação vigente (PASCHOAL; TREMILIOSI-FILHO, 2005).

### 3.2.1 Classificação dos corantes

As classificações referentes aos corantes pelo modo de fixação atualmente adotadas são citadas por Bastian (2009), das quais se enquadram:

#### 3.2.1.1 Corantes à tina

Este tipo se subdivide em dois grupos: os indigóides e os antraquinônicos, que apresentam como características a insolubilidade em água e a presença de um grupo cetônico ( $>C=O$ ), que faz necessário uma solução alcalina/redutora para sua solubilização.

#### 3.2.1.2 Corantes reativos

A principal característica refere-se a solubilidade em água, por possuir pelo menos um grupo cromóforo responsável pela cor do produto e um grupo reativo considerada a parte química do corante que reage com os grupamentos hidroxílicos (OH).

### 3.2.1.3 Corantes dispersos ou plastosolúveis

A característica mais relevante diz respeito a sua insolubilidade em água e o caráter não iônico, possuindo afinidade com fibras hidrofóbicas, comumente empregados no tingimento de tecidos como poliéster, acetato, triacetato e em alguns casos poliamida e acrílicas.

### 3.2.1.4 Corantes diretos

Sua concepção original foi destinada ao tingimento de algodão, caracterizados como aniônicos e possuindo alta afinidade com a celulose, necessitando apenas de um banho neutro ou levemente alcalino, muito próximos do ponto de ebulição.

### 3.2.1.5 Corantes ácidos

São solúveis em água e com característica aniônica, empregados em fibras nitrogenadas como lã, seda, couro e algumas fibras acrílicas modificadas, além de sua ampla aplicação para o tingimento de poliamida.

### 3.2.1.6 Corantes catiônicos (básicos modificados)

Apresentam solubilidade em água e devido a presença de grupamento amino ( $\text{NH}_2$ ) em sua composição produz soluções coloridas catiônicas, que são empregadas principalmente em fibras acrílicas, além de lã, seda e acetato de celulose conferindo cores vivas e até mesmo fluorescentes de boa solidez.

### 3.2.1.7 Corantes ao enxofre (sulfurosos)

São insolúveis em água e sua aplicação assemelha-se aos corantes à tina, necessitando serem reduzidos a uma forma solúvel. São também caracterizados por possuírem compostos macromoleculares com pontes dissulfídicas (-S-S-).

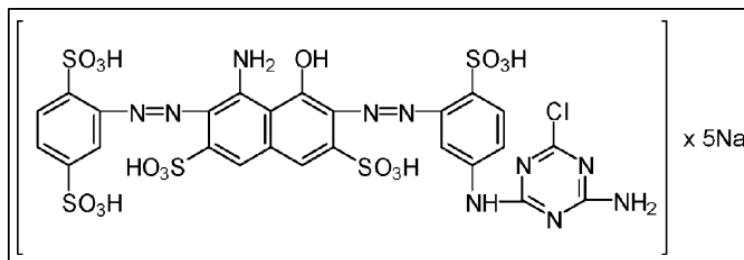
### 3.2.1.8 Corantes naturais

Sua obtenção ocorre através de substâncias vegetais ou animais, com pouco ou nenhum processamento químico, são principalmente, do tipo mordente, ou seja, não liberam sua cor nas fibras, sem que estejam na presença de certos metais, necessitando desta forma, uma grande quantidade de sais minerais para efetuar o tingimento. Existem ainda alguns do tipo à tina, solventes, pigmentos, diretos e ácidos, porém, com baixas aplicações.

## 3.3 CORANTE REATIVO AZUL 5G

O corante Reativo Azul 5G é um dos principais corantes utilizados pelas lavanderias industriais pela boa penetração e excelente caráter tintório que possui. Apresenta solubilidade acima de  $100 \text{ g L}^{-1}$  a  $25^\circ\text{C}$ , pH entre 6,0 e 9,0 quando em solução aquosa e massa molar de  $815 \text{ g mol}^{-1}$  (TEXPAL, 2008).

Pertence à classe dos corantes reativos monoclorotriazina do tipo azo (KOPRIVANAC et al., 2005). Na Figura 1, esta apresentada a sua estrutura molecular. É classificado como um azo corante devido à presença de grupamentos -N=N- ligados a anéis aromáticos.



**Figura 1 - Estrutura molecular do corante Reativo Azul 5G**  
 Fonte: Koprivanac et al. (2005).

### 3.4 TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS

Os corantes presentes nos efluentes das indústrias têxteis são geralmente estáveis e de difícil degradação em decorrência da presença de estruturas aromáticas complexas resistentes à luz solar, agentes oxidantes e microrganismos (PASCHOAL; TREMILIOSI-FILHO, 2005; CERQUEIRA, 2006). Nos últimos anos, um dos fatores que vem afetando o tratamento dos efluentes têxteis, é o crescente aumento dos custos para sua realização, isso devido à escassez de espaços e custo elevado da terra, além da complexidade de alguns países para lidar com processos químicos (KOBYA; CAN; BAYRAMOGLU, 2003).

Atualmente, o tratamento das águas residuais provenientes dos mais diferentes ramos industriais, são realizados através de uma imensa variedade de métodos físicos, químicos e biológicos que se encontram disponíveis (AQUINO NETO et al., 2011; CHENIK et al., 2013).

Os métodos anteriormente citados apresentam a finalidade de proporcionar a mudança de fase dos materiais contidos nos efluentes, e ainda converter as substâncias com elevado grau de toxicidade para compostos inertes, que resultem em menores impactos ao meio ambiente, como é o caso do CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O (AQUINO NETO et al., 2011).

Em contrapartida, esses métodos de tratamento para as águas residuárias das indústrias têxteis se apresentam inadequados e insuficientes em decorrências da grande variabilidade da composição dessas águas (KOBYA; CAN; BAYRAMOGLU, 2003).

Para Hassemer e Sens (2002), as unidades industriais geram grandes quantidades de efluentes líquidos devido sua produção, e os tratamentos através de

processos físico-químicos e biológicos (coagulação química e lodos ativados), apresentam resultados satisfatórios na redução carbonácea, em contrapartida, promovem a alta produção de lodo e a necessidade de extensas áreas para implantação dos processos de tratamento, além da disposição final do lodo em aterros sanitários industriais. Considerando assim, métodos raramente empregados em efluentes têxteis, pois apresentam resistência à biodegradação, tornando a ação na degradação lenta e limitada, não oferecendo resultados satisfatórios para efluentes que apresentam elementos tóxicos em sua composição (KAPDAN; ALPARSLAN, 2005; ALINSAFI et al., 2006; RAJU et al., 2008).

Para Aquino Neto et al. (2011), a remoção de matrizes complexas, pode ser feita a partir da utilização de métodos como a adsorção em carvão ativado. No entanto, o processo é caracterizado pela transferência de fase, não destruindo o poluente que necessitará de uma disposição final adequada (LEE et al., 2006).

A técnica de incineração também aparece como outra alternativa largamente utilizada, porém, apresenta alto custo para manutenção e operação, além, de lançar compostos para atmosfera, algumas vezes, altamente tóxicos, como as dioxinas e furanos (AQUINO NETO et al., 2011).

Na área de tratamento de efluentes, grandes avanços ocorreram nos últimos anos, destacando-se entre eles o tratamento através de processos eletrolíticos (PALÁCIO et al., 2013). Uma alternativa que vem ganhando espaço e interesse para aplicação devido a elevada eficiência de degradação, se refere ao tratamento eletroquímico, uma vez que não se caracteriza apenas pela transferência de fase, mas, também pela oxidação do material de interesse (AQUINO NETO; ANDRADE, 2009).

A eletroquímica pode oferecer opções viáveis para remediar problemas ambientais, particularmente de efluentes aquosos (FREIRE et al., 2000).

Muitos trabalhos demonstraram que a técnica de eletrocoagulação pode ser uma ferramenta eficaz para o tratamento de águas residuárias têxteis, levando a uma alta eficiência de remoção com um custo relativamente baixo (BAYRAMOGLU; EYVAZ; KOBYA, 2006).

A combinação de técnicas de eletrocoagulação/eletroflotação, eletrooxidação, filtração e osmose reversa estão sendo vistas com prioridades para resolverem a problemática ambiental dos efluentes têxteis (RAJU et al., 2008).

Os processos oxidativos avançados (POA), como a fotocatalise, processos Fenton e fotoFenton, representados pelo radical hidroxila como principal oxidante do processo, da mesma maneira ganham destaque como formas de tratamentos, apresentando alta eficiência e não geração de subprodutos que necessitem de disposição final, porém, suas aplicações são limitadas, além de custos elevados (AQUINO NETO et al., 2011).

### 3.4.1 Eletrofloculação

Havendo a necessidade de um tratamento eficaz e simples das águas residuárias têxteis, surge então o tratamento baseado em eletroquímica, considerado promissor neste tipo de aplicação (KOBAYA; CAN; BAYRAMOGLU, 2003).

A eletrofloculação, também conhecida como eletrocoagulação ou ainda eletroflotação, se caracteriza por ser um processo eletrolítico, que promove que poluentes que se encontram em meio aquoso, sejam desestabilizados (AQUINO NETO et al., 2011).

O processo de eletrocoagulação/flotação vem ganhando destaque entre os processos eletroquímicos utilizados, sendo um reator eletroquímico o responsável em gerar as reações de coagulação (MENESES et al., 2012).

Este processo vem se destacando por apresentar grande versatilidade e compatibilidade ambiental no tratamento de efluentes industriais (MENESES et al., 2012).

Atualmente, as técnicas eletroquímicas receberam maior atenção, por se apresentar uma tecnologia onde todos os tipos de poluentes podem ser removidos de forma eficaz (RAJU et al., 2008). Em eletro, o principal reagente é o elétron (reagente limpo) que "incinera" os poluentes orgânicos sem gerar quaisquer poluentes secundários (RAJU et al., 2008).

Na técnica de eletrofloculação, alguns fatores interferem para sua eficiência, como a condutividade do meio e a disposição dos eletrodos (FORNARI, 2007). Além, da necessária seleção apropriada dos materiais, onde destacam-se o alumínio e o ferro, devido a menores custos, alta eficiência e disponibilidade (CRESPILHO; REZENDE, 2004).

Este processo pode ocorrer em três etapas distintas, começando pela aplicação potencial por uma fonte externa provocando a oxidação de um ânodo metálico (M) de sacrifício gerado *in situ* que atuará como coagulante e a redução ou deposição redutiva de um cátodo do elemento metálico, em seguida, após a geração dos cátions na fase anódica, estes são capazes de reagirem com as moléculas de água formando hidróxidos ou poli- hidróxidos, simultaneamente ocorre a eletrólise da água formando microbolhas de hidrogênio no cátodo e oxigênio no ânodo (AQUINO NETO et al., 2011; CRESPILO; SANTANA; REZENDE, 2004; MENESES et al., 2012).

Mollah et al. (2004), demonstra nas Equações de 1 a 4 as principais reações com o Metal:

No ânodo:



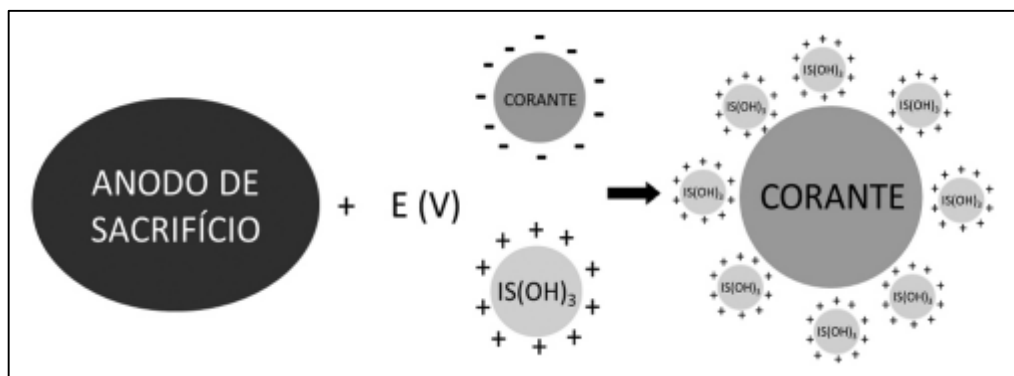
No cátodo:



Na segunda etapa, os hidróxidos que foram constituídos adsorvem-se em partículas coloidais dando origem aos flóculos que entram em contato com as impurezas. Na última etapa em decorrência das microbolhas geradas na etapa de eletrólise da água, ocorre o carregamento das partículas geradas na etapa anterior até a superfície (AQUINO NETO et al., 2011; CRESPILO; SANTANA; REZENDE, 2004). O flotado pode então ser removido por processos convencionais, tais como: raspagem, sucção, entre outros (CRESPILO; REZENDE, 2004).

Na Figura 2, é possível verificar o processo de adsorção e formação das partículas coloidais que geram os flóculos com as moléculas de corantes.





**Figura 2 - Esquema ilustrativo do processo de adsorção e formação de floculos na eletrofloculação**

Fonte: Aquino Neto et al. (2011).

Os ânodos de sacrifício mais utilizados correspondem ao ferro e ao alumínio, que possuem alta disponibilidade e eficácia, além, de baixos custos (AQUINO NETO et al., 2011; CHENIK et al., 2013).

O processo de eletrocoagulação é um processo vantajoso quando comparado à outros tratamentos por possuir fácil operação, curto período de retenção para reação, ausência de adição de produtos químicos e diminuição da quantidade de precipitado ou lodo (BAYRAMOGLU; EYVAZ; KOBYA, 2006).

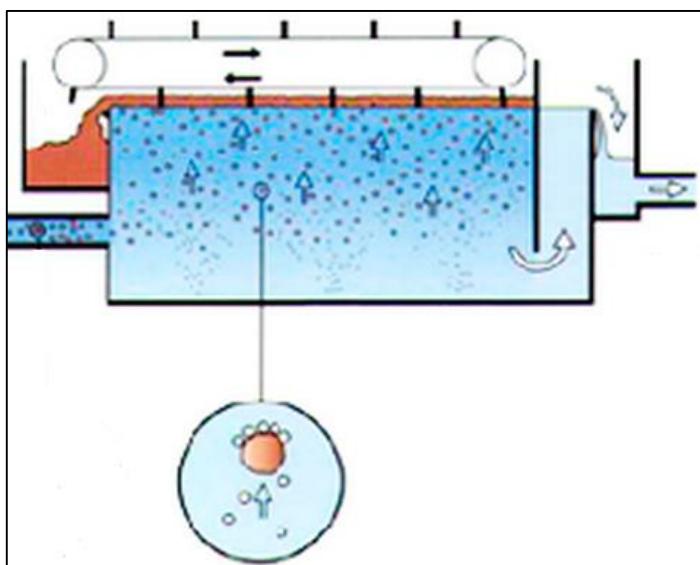
Para Mollah et al. (2004), concede vários benefícios para o tratamento de vários tipos de águas residuárias, incluindo a compatibilidade ambiental, versatilidade, eficiência energética, segurança, seletividade, automação e eficiência de custos. Em contrapartida, Crespilho e Rezende (2004), apontam algumas desvantagens do método, como: necessidade de substituição dos eletrodos regularmente devido ao desgaste, custo com o consumo de energia elétrica elevado em algumas regiões e a necessidade de alta condutividade do efluente.

### 3.4.2 Flotação

A flotação é considerada um processo físico de separação de partículas, agregados ou gotículas de uma suspensão por meio da adesão a bolhas de ar (SILVEIRA, 2009; SANTOS, 2010).

Para que o fenômeno ocorra é necessário que as unidades formadas (bolhas e partículas) possuam uma densidade aparente menor que a do meio aquoso do qual se encontram e ascendam (flotem) até a superfície de um reator ou na interface líquido-ar para serem removidas, normalmente, por raspagem (SANTOS, 2010).

No campo ambiental, a flotação é utilizada com o objetivo de remover as impurezas que estão presentes em suspensões sólido/líquido, emulsões líquido/líquido ou misturas sólido-líquido/líquido (SILVEIRA, 2009). Portanto, o sistema de flotação se baseia no contato e na aderência de microbolhas de ar com as partículas do efluente, diminuindo sua densidade e promovendo seu arraste para a superfície líquida do tanque (ENVIRONQUIP, 2015). Na Figura 3, encontra-se o desenho ilustrativo do processo de flotação por injeção de ar dissolvido, de partículas carregadas para a superfície do reator.



**Figura 3 - Desenho ilustrativo do processo de flotação**  
Fonte: Adaptado de Ecopreneur (2015).

A eficiência da técnica depende do tamanho das bolhas de ar injetadas no reator e também da mistura das mesmas com o efluente, no geral, acredita-se que bolhas menores promovam maiores áreas superficiais de contato, o que resulta em uma melhor eficiência do processo (MOLLAH et al., 2004).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 PREPARO DA SOLUÇÃO DE CORANTE REATIVO AZUL 5G

Nos experimentos foram preparadas soluções aquosas de corante Reativo Azul 5G com concentração fixa de 50 mg L<sup>-1</sup>. Nessa mesma solução, foram acrescentados 2 g L<sup>-1</sup> de NaCl, a fim de garantir a condutividade elétrica nos tratamentos por eletrofloculação.

### 4.2 TRATAMENTO POR ELETROFLOCULAÇÃO EM FLUXO CONTÍNUO

As soluções de corante Reativo Azul 5G preparadas foram acondicionadas em dois barriletes com capacidade de 20 L cada. Em um deles estava contida uma bomba submersa que fazia o direcionamento da solução até o módulo de tratamento eletrolítico.

O módulo de tratamento eletrolítico consistiu em uma câmara, construída em vidro temperado, apresentando dimensões de 19 cm, 14 cm e 67 cm que correspondem a altura, largura e comprimento, respectivamente. Nela, cinco pares de eletrodos de sacrifício de ferro, com dimensões de 13 cm de comprimento, 8 cm de largura e 1 mm de espessura cada, foram intercalados em seu interior, com distâncias de 3,5 cm entre o par e 6,5 cm entre os pares, a fim de proporcionar que o processo de eletrofloculação ocorresse e auxiliasse na hidráulica do sistema atuando como chicanas. Na Figura 4, é apresentada uma imagem da câmara eletrolítica utilizada.

Uma fonte de alimentação de corrente contínua da marca *Instrutherm*, modelo *FA-3050* (Figura 5), foi conectada a um suporte de ferro que conectava os eletrodos para dar viabilidade ao processo de eletrofloculação. A cada ensaio realizado foi procedida a inversão de polaridade, alterando-se os ânodos e cátodos entre os eletrodos de sacrifício, assegurando um desgaste uniforme dos pares de eletrodos.

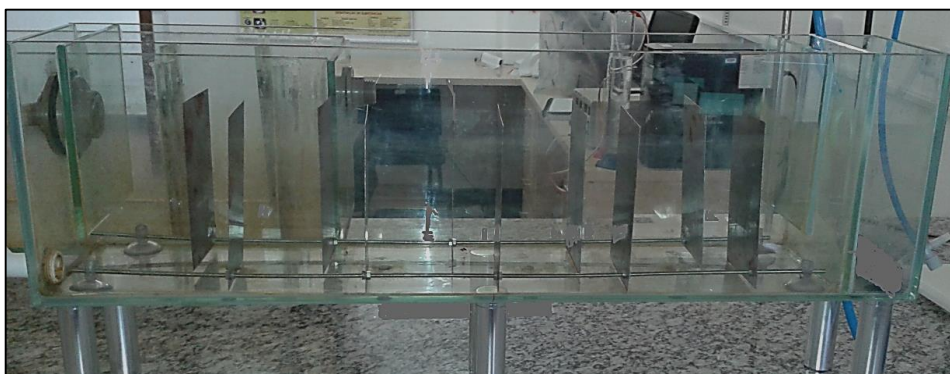


Figura 4 - Câmara eletrolítica utilizada para o tratamento de solução de corante Reativo Azul 5G

Para que o processo de eletrofloculação ocorresse a solução aquosa de corante foi bombeada até a câmara eletrolítica numa vazão de  $7,86 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , totalizando um tempo de retenção hidráulico (TRH) de 20 minutos para um volume útil aproximado de  $9,438 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$  ou 9,438 L, com intensidade da corrente nos eletrodos fixada em 5 A, correspondendo a 1 A por par de eletrodos. Então, foram coletadas amostras nos tempos de 20, 30 e 40 minutos do processo de tratamento, para posterior análise da cor da solução tratada.

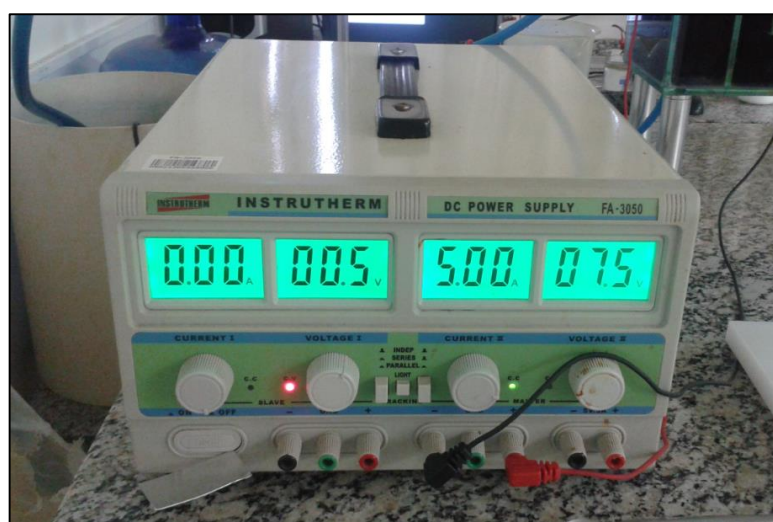


Figura 5 - Fonte de alimentação utilizada (marca *Instrutherm*)

### 4.3 TRATAMENTO POR ELETROFLOCUÇÃO COM INJEÇÃO DE AR COMPRIMIDO EM FLUXO CONTÍNUO

Utilizando-se dos mesmos materiais e procedimentos empregados no item 4.2, incluiu-se no módulo uma entrada de ar comprimido, onde através de uma conexão acoplou-se duas mangueiras de Poliuretano de 4 mm, com cerca de 50 cm cada. Nas mesmas foram feitos pequenos orifícios para que promovessem a saída de ar comprimido durante o tratamento, a montagem experimental pode ser visualizada na Figura 6.

A pressão absoluta foi fixada em 1,2 bar, a menor alcançada para que promovesse uma dispersão uniforme no módulo, sendo injetado durante todo o período de tratamento eletrolítico, onde posteriormente coletou-se amostras em tempos iguais aos definidos anteriormente.



**Figura 6 - Montagem experimental no módulo eletrolítico para o tratamento por eletrofloculação com injeção de ar comprimido**

### 4.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foi utilizada, como estratégia de planejamento experimental, o Delineamento Inteiramente Casualizado – DIC.

Avaliou-se a eficiência dos sistemas de tratamentos de eletrofloculação sem e com a injeção de ar comprimido, por meio das alíquotas amostradas nos tempos de

20, 30 e 40 minutos após o início do tratamento eletroquímico. Comparando-se as eficiências de tratamento entre os tempos de amostragem, foi possível analisar o tempo requerido para que o estado estacionário fosse alcançado.

Também procedeu-se a comparação entre as eficiências obtidas com o reator eletroquímico, exclusivamente, e com o sistema de injeção de ar comprimido adaptado ao reator.

A variável-resposta utilizada para avaliar a eficiência dos tratamentos foi a remoção percentual da cor através da leitura da absorbância das amostras no comprimento de onda 618 nm, identificado como ideal por Santos (2015), que realizou a varredura ao longo da faixa espectral para o corante Reativo Azul 5G.

Foram realizados iguais números de repetições (6) para os dois tratamentos estudados, totalizando 12 ensaios.

A análise de variância – ANOVA, como citado por Mucelin (2003), possui a finalidade de obtenção da comparação das médias oriundas das variáveis analisadas, desta forma a mesma foi utilizada com um nível de significância de 5%. Após, por meio do teste de comparação de médias de Tukey foi possível avaliar se havia ou não diferença significativa entre os tempos testados (95% de confiança).

Para comparar e analisar as médias dos ensaios realizados por meio do Teste de Tukey, utilizou-se o suplemento *Action* do software Microsoft Office Excel.

#### 4.5 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TRATAMENTO

A cor das amostras foi avaliada por meio da absorbância através do Espectrofotômetro de absorção molecular UV-Vis de feixe simples, da marca *PerkinElmer*, modelo *Lambda XLS* (Figura 7), ajustando-o para o comprimento de onda de 618 nm.

Para obtenção da eficiência dos tratamentos foi feito o cálculo da diferença dos resultados da cor de cada alíquota amostrada em cada tempo com a cor da solução de corante Reativo Azul 5G sem tratamento preparada em cada ensaio.

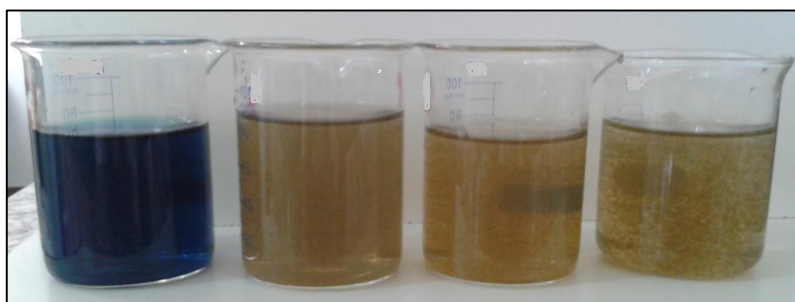


**Figura 7 - Espectrofotômetro de absorção molecular UV-Vis de feixe simples (marca PerkinElmer)**

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO DO REATOR ELETROQUÍMICO SEM A INJEÇÃO DE AR COMPRIMIDO

Na Figura 8, é possível observar as amostras de um dos ensaios do tratamento por eletrofloculação, sendo perceptível a remoção de cor pelo tratamento, porém, com a presença residual de ferro.



**Figura 8 - Amostras de ensaio de eletrofloculação, da esquerda para a direita – solução de corante s/ tratamento, 20 min, 30 min e 40 min, respectivamente**

Os resultados obtidos nos ensaios do tratamento por eletrofloculação, encontram-se dispostos na Tabela 1, onde é possível verificar similaridade da sequência dos dados dos ensaios realizados.

**Tabela 1 - Resultados dos ensaios do tratamento por eletrofloculação**

Ensaio	Solução de corante sem tratamento	Absorbância (nm)		
		20 minutos	30 minutos	40 minutos
1	0,851	0,217	0,186	0,165
2	0,858	0,219	0,184	0,164
3	0,871	0,225	0,192	0,172
4	0,849	0,233	0,195	0,183
5	0,867	0,211	0,179	0,161
6	0,839	0,220	0,183	0,171

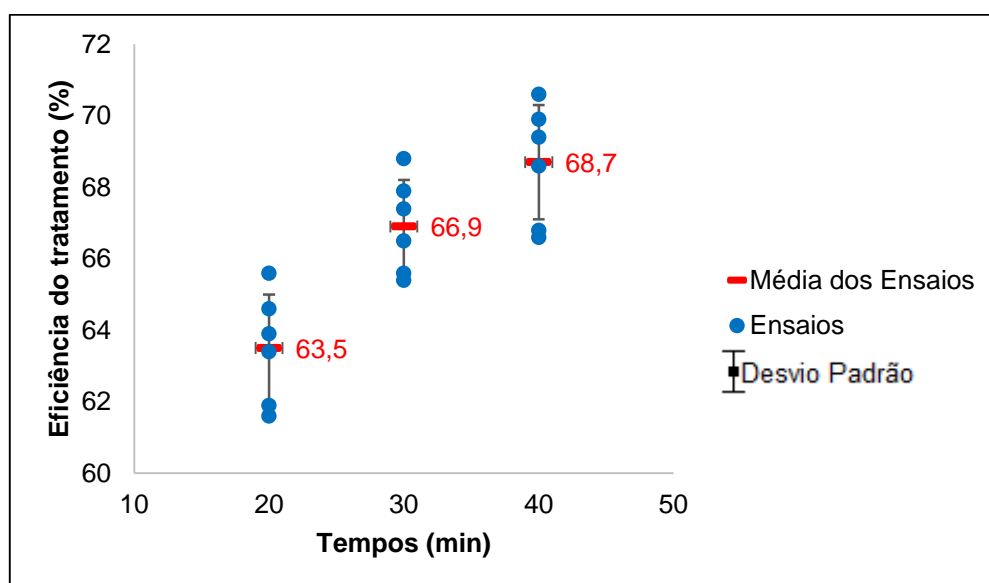


Na Tabela 2, está apresentado o resultado da eficiência do tratamento, bem como as médias dos ensaios e seus respectivos desvios padrões.

**Tabela 2 - Eficiência, média e desvios padrões dos tempos de amostragem do tratamento por eletrofloculação**

Ensaio	Eficiência do Tratamento (%)		
	20 minutos	30 minutos	40 minutos
1	63,4	66,5	68,6
2	63,9	67,4	69,4
3	64,6	67,9	69,9
4	61,6	65,4	66,6
5	65,6	68,8	70,6
6	61,9	65,6	66,8
$\bar{x}$	63,5	66,9	68,7
s	$\pm 1,5$	$\pm 1,3$	$\pm 1,6$

A representação gráfica dos valores (Figura 9), e a interpretação dos dados contidos na Tabela 2, induzem à uma baixa variação dos resultados dos tempos de amostragem dos ensaios, com pequenos desvios padrões, demonstrando certa similaridade entre as informações.



**Figura 9 - Gráfico da eficiência, médias e desvios padrões para os tempos de amostragem dos ensaios de eletrofloculação**

Através da análise de variância (ANOVA) representada na Tabela 3, tornou-se possível inferir que existe diferença entre, ao menos, dois tempos de amostragem, onde F calculado apresentou-se maior que o F tabelado a 95% de confiança, o que pode ser visto também através do p-valor menor que 0,05.

**Tabela 3 - ANOVA do tratamento por eletrofloculação**

Fonte de Variação	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F Calculado	F Tabelado	P-valor
Fator	2	82,5144	41,2572	17,9544	3,6823	0,0001
Resíduos	15	34,4683	2,2979			

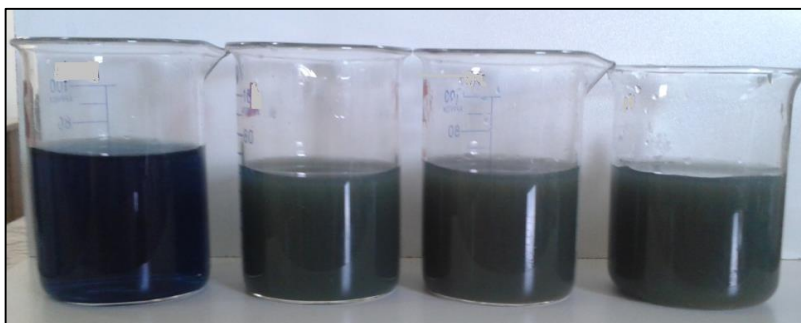
Realizando ainda o Teste de Tukey (Tabela 4) para a comparação dos tempos do tratamento, observou-se através do p-valor que entre as amostras de 20 e 40 minutos, bem como de 20 e 30 minutos, os valores foram inferiores a 0,05, o que indicou a existência de diferença entre as médias, em contrapartida, entre 30 e 40 minutos o p-valor é superior a 0,05 (0,1562), demonstrando que não há diferença significativa entre as médias. Desta forma, induziu-se que após o início do tratamento eletroquímico, pelo menos a partir de 30 minutos, o sistema já estava em estado estacionário.

**Tabela 4 - Teste de Tukey para comparação dos tempos do tratamento por eletrofloculação**

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
20-30	3,4333	1,1600	5,7066	0,0036
20-40	5,1500	2,8767	7,4233	0,0001
30-40	1,7167	-0,5566	3,9900	0,1562

## 5.2 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO DO REATOR ELETROQUÍMICO COM A INJEÇÃO DE AR COMPRIMIDO

As amostras coletadas em um dos ensaios do tratamento por eletrofloculação com injeção de ar comprimido para remoção do corante Reativo Azul 5G encontram-se na Figura 10.



**Figura 10 - Amostras de ensaio de eletrofloculação com injeção de ar comprimido, da esquerda para a direita – solução de corante s/ tratamento, 20 min, 30 min e 40 min, respectivamente**

Observou-se através da Tabela 5, a variação dos dados, sem possuir uma sequência lógica dos resultados nos ensaios, que pode ser consequência da grande turbulência gerada pelo ar comprimido ao meio.

**Tabela 5 - Resultados dos ensaios do tratamento por eletrofloculação com injeção de ar comprimido**

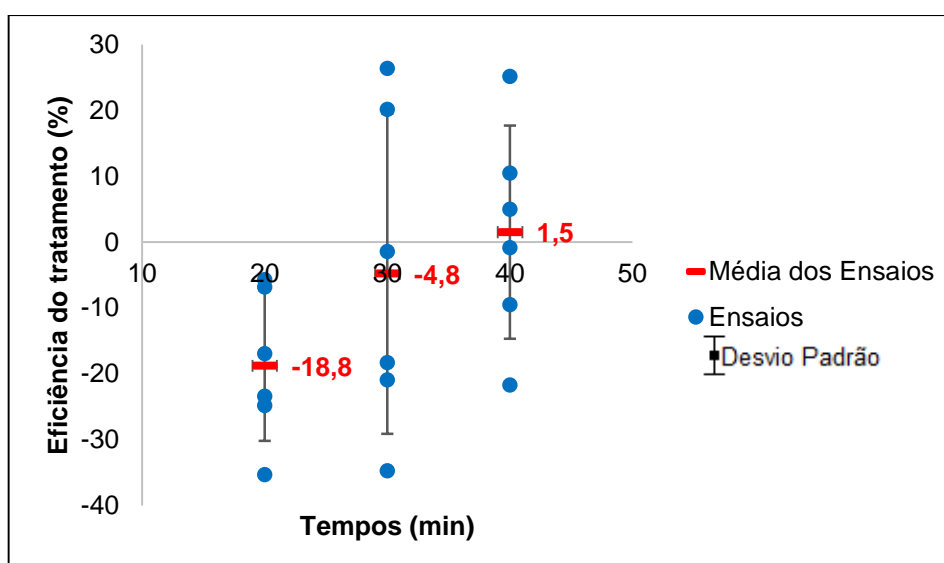
Ensaio	Solução de corante sem tratamento	Absorbância (nm)		
		20 minutos	30 minutos	40 minutos
1	0,860	0,917	0,596	0,608
2	0,842	1,076	0,856	0,737
3	0,835	1,083	1,044	0,843
4	0,820	0,888	1,167	1,037
5	0,817	0,986	0,615	0,767
6	0,822	1,175	1,005	0,917

A Tabela 6, exibe os resultados da eficiência do tratamento empregado, do qual verifica-se na grande maioria que não houve nenhum aumento do mesmo, além de elevados desvios padrões, indicando alta discrepância nos resultados, ou seja, a queda de eficiência no tratamento com injeção de ar comprimido.

**Tabela 6 - Eficiência, média e desvios padrões dos tempos de amostragem do tratamento por eletrofloculação com injeção de ar comprimido**

Ensaio	Eficiência do Tratamento (%)		
	20 minutos	30 minutos	40 minutos
1	-5,7	26,4	25,2
2	-23,4	-1,4	10,5
3	-24,8	-20,9	-0,8
4	-6,8	-34,7	-21,7
5	-16,9	20,2	5,0
6	-35,3	-18,3	-9,5
$\bar{x}$	-18,8	-4,8	1,5
s	$\pm 11,4$	$\pm 24,3$	$\pm 16,2$

Na Figura 11, é possível fazer a análise do comportamento dos dados, onde se induz que o ar comprimido proporcionou piora, nenhuma ou baixa eficiência na remoção de corante, com altas variações dos resultados nos tempos analisados.



**Figura 41 - Gráfico da eficiência, médias e desvios padrões para os tempos de amostragem dos ensaios de eletrofloculação com injeção de ar comprimido**

Com as informações contidas na Tabela 7, foi possível verificar através das médias das amostras coletadas nos diferentes tempos que os resultados encontrados não apresentaram diferença entre si, em que o F calculado é menor que o F tabelado, bem como o p-valor superior a 0,05.

**Tabela 7 - ANOVA do tratamento por eletrofloculação com injeção de ar comprimido**

Fonte de Variação	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F Calculado	F Tabelaado	P-valor
Fator	2	1293,0533	646,5267	1,9737	3,6823	0,1734
Resíduos	15	4913,5517	327,5701			

Fazendo a comparação de tempos do sistema de tratamento por ar comprimido com o Teste de Tukey (Tabela 8), verificou-se que todos apresentaram p-valor maior que 0,05, concordando com a afirmação anterior em que não há diferença significativa entre as médias dos tempos de amostragem. Analisou-se desta maneira que o estado estacionário não foi alcançado devido às grandes diferenças entre as remoções médias a cada tempo de amostragem.

**Tabela 8 - Teste de Tukey para comparação dos tempos do tratamento por eletrofloculação com injeção de ar comprimido**

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
20-30	14,0333	-13,1087	41,1753	0,3944
20-40	20,2667	-6,8753	47,4087	0,1620
30-40	6,2333	-20,9087	33,3753	0,8241

### 5.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS TRATAMENTOS POR ELETROFLOCULAÇÃO SEM E COM INJEÇÃO DE AR COMPRIMIDO

Comparando os dois sistemas empregados na pesquisa (sem ar comprimido e com ar comprimido), induziu-se algumas constatações.

Nas Tabelas 9, 10 e 11, encontram-se expostos os resultados da análise de variância para os tempos de 20, 30 e 40 minutos, respectivamente. Da qual, o F calculado é maior que o F tabelado, bem como p-valor é inferior a 0,05 em todos os tempos de amostragem, indicando diferença entre os resultados dos tratamentos.

**Tabela 9 - ANOVA de comparação dos tratamentos no tempo de amostragem de 20 minutos**

Fonte de Variação	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F Calculado	F Tabelado	P-valor
Fator	1	20328,1008	20328,1008	307,7272	4,9646	7,7020.10 <sup>-9</sup>
Resíduos	10	660,5883	66,0588			

**Tabela 10 - ANOVA de comparação dos tratamentos no tempo de amostragem de 30 minutos**

Fonte de Variação	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F Calculado	F Tabelado	P-valor
Fator	1	15429,8408	15429,8408	52,2263	4,9646	2,8350.10 <sup>-5</sup>
Resíduos	10	2954,4217	295,4422			

**Tabela 11 - ANOVA de comparação dos tratamentos no tempo de amostragem de 40 minutos**

Fonte de Variação	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F Calculado	F Tabelado	P-valor
Fator	1	13547,5200	13547,5200	101,6310	4,9646	1,4759.10 <sup>-6</sup>
Resíduos	10	1333,0100	133,3010			

Levando em consideração a diferença entre os sistemas com ar comprimido e sem ar comprimido, e também a comparação entre os tempos de amostragem para o sistema exclusivamente por eletrofloculação, onde foi comprovado que o estado estacionário foi alcançado, é possível concluir que o estado estacionário para o sistema com injeção de ar não foi obtido, possivelmente devido a grande turbulência gerada no meio, fator este, que não contribuiu para aumentar a eficiência do tratamento por eletrofloculação na remoção do corante Reativo Azul 5G.

Desta forma, salienta-se que a injeção de ar comprimido no tratamento eletroquímico promoveu a mistura do meio, o que não permitiu que houvesse a transferência de massa do corante da solução aquosa utilizada para o lodo, ou seja, fez com que a flotação do sistema sofresse interferência, apresentando queda na eficiência do tratamento.

## 6 CONCLUSÕES

Com o presente estudo, foi possível verificar que a injeção de ar comprimido no sistema de tratamento não contribuiu para o aumento da eficiência na remoção da cor na solução aquosa de corante nas condições testadas.

Constatou-se que a aplicação do ar promoveu turbulência no meio, indo contrário ao que se acreditava que contribuiria na flotação do poluente, dando maior velocidade e resultando em um tratamento mais eficiente.

Apenas o tratamento eletroquímico demonstrou ser eficiente nesta remoção em todos os ensaios realizados, chegando a 70,6% com as condições utilizadas na pesquisa, eficiência que já é comprovada em estudos anteriores. O valor máximo encontrado para o sistema com ar comprimido foi de 26,4%, porém, não se pode afirmar que a remoção de cor ocorreu pela injeção de ar, devido as grandes oscilações observadas em todos os ensaios, sem possuir determinado padrão de resposta.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Sugere-se que seja realizado em trabalhos futuros o emprego dessas operações separadamente, utilizando em um reator o tratamento eletroquímico comumente empregado que garante uma remoção de cerca de 60-70% do corante, e na sequência, em uma nova câmara, a flotação com a injeção de ar comprimido como pós-tratamento do efluente tratado a fim de melhorar a eficiência do sistema.



## REFERÊNCIAS

ABIQUIM. Associação Brasileira da Indústria Química. **Corantes e Pigmentos**.

Disponível em: <[http:// http://abiquim.org.br/corantes/cor.asp](http://http://abiquim.org.br/corantes/cor.asp)>. Acesso em: 20 de maio de 2015.

ALINSAFI, A.; MOTTA, M.; LE BONTE, S.; PONS, M.N.; BENHAMMOU, A. Effect of variability on the treatment of textile dyeing wastewater by activated sludge. **Dyes and Pigments**. v. 69, p. 31 - 39, 2006.

AQUINO NETO, S.; ANDRADE, A. R. Electrooxidation of glyphosate herbicide at different DSA® compositions: pH, concentration and supporting electrolyte effect. **Electrochimica Acta**. v. 54, p. 2039–2045, 2009.

AQUINO NETO, S.; MAGRI, T. C.; SILVA G. M.; ANDRADE, A. R. Tratamento de resíduos de corante por eletrofloculação: um experimento para cursos de graduação em química. **Química Nova**. v. 34, n. 8, p. 1468-1471, 2011.

BASTIAN, E. Y. O. **Guia Técnico Ambiental da Indústria Têxtil**. São Paulo: CETESB – SINDITEXTIL, 2009.

BAYRAMOGLU, M.; EYVAZ, M.; KOBYA, M. Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation: Economical evaluation. **Chemical Engineering Journal**. p. 155-161, 2007.

BORBA, F. H.; MANENTI, D. R.; MÓDENES, A. N.; MORA, N. D.; ESPINOZA-QUINONES, F. R.; PALÁCIO, S. M.; YASSUE, P.H.; NASCIMENTO, R. Avaliação da eficiência da técnica de eletro-floculação no tratamento de efluentes de indústrias de subprodutos avícolas. **Estudos Tecnológicos**. v. 6, n. 1, p. 36-47, 2010.

CAN, O.T.; KOBYA, M.; DEMIRBAS, E.; BAYEAMOGLU, M. Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. **Chemosphere**. v. 62, p.181–187, 2006.

CERQUEIRA, A. A. **Aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes têxteis**. 2006. 111f. Dissertação (Mestrado em Química). Instituto de Química. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CHENIK, H.; ELHAFDI, M.; DASSAA, A.; ESSADKI, A. H.; AZZI, M. Removal of Real Textile Dyes by Electrocoagulation/Electroflotation in a Pilot External-Loop Airlift

Reactor. **Journal of Water Resource and Protection**. v. 5 n. 10, p. 1000-1006, 2013.

CRESPILHO, F. N.; REZENDE, M. O. O. **Eletroflotação: Princípios e Aplicações**. RIMA: São Carlos, 2004.

CRESPILHO, F. N.; SANTANA, C. G.; REZENDE, M. O. Tratamento de efluente da indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação. **Química Nova**. v. 27, n. 3, p. 387-392, 2004.

ENVIRONQUIP. **Sistema de flotação**. Disponível em: <<http://www.vironquip.com.br/sistema-de-flotacao.htm>>. Acesso em: 04 jun. 2015.

FORNARI, M. M. T. **Aplicação da técnica de eletro-floculação no tratamento de efluentes de curtume**. 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Engenharias e Ciências Exatas. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2007.

FREIRE, R. S.; PELEGRINI, R.; KUBOTA, L. T.; DURÁN, N. Novas tendências para o tratamento de resíduos industriais contendo espécies organocloradas. **Química Nova**, 2000.

GARG, V.K.; AMITA, M.; KUMAR, R.; GUPTA, R. Basic Dye (Methylene blue) Removal from Simulated Wastewater by Adsorption Using Indian Rosewood sawdust: a timber industry waste. **Dyes and Pigments**. p. 243-250, 2004.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. Corantes têxteis. **Química Nova**, n. 23, v.1, p. 71-78, 2000.

HASSEMER, M. E. N.; SENS, M. L. Tratamento do efluente de uma indústria têxtil: processo físico-químico com ozônio e coagulação/floculação. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.7, n. 1, 2002.

IMMICH, A. P. S. **Remoção de Corantes de Efluentes Têxteis Utilizando Folhas de Azadirachta Indica como Adsorvente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

KAPDAN, I. K.; ALPARSLAN, S. Application of anaerobic–aerobic sequential treatment system to real textile wastewater for color and COD removal. **Enzyme and Microbial Technology**. v. 36 p. 273–279, 2005.

KIMURA, I. Y., GONÇALVES Jr., A. C., STOLBERG, J., LARANJEIRA, M. C. M., FÁVERE, V. t. Efeito do pH e do tempo de contato na adsorção de corantes reativos por microesferas de quitosana. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. p. 51-57, 1999.

KOBYA, M.; CAN O. T.; BAYRAMOGLU, M. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. **Journal of Hazardous Materials B100**. p. 163–178, 2003.

KOPRIVANAC, N.; KUSIC, H.; VUJEVIC, D.; PETERNEL, I.; LOCKE, B. R. Influence of iron on degradation of organic dyes in corona. **Journal of Hazardous Materials**. v. 117, p. 113-119, 2005.

LEE, J.-W.; CHOI, S.-P.; THIRUVENKATACHARI, R.; SHIM, W.-G.; MOON, H. Evaluation of the performance of adsorption and coagulation processes for the maximum removal of reactive dyes. **Dyes and Pigments**, v. 69, p. 196-203, 2006.

MENESES, J. M.; VASCONCELOS, R. F.; FERNANDES, T. F.; ARAÚJO, G. T. Tratamento do efluente do biodiesel utilizando a eletrocoagulação/flotação: investigação dos parâmetros operacionais. **Química Nova**. v. 35, n. 2, p. 235-240, 2012.

MOLLAH, M. Y. A.; MORKOVSKY, P.; GOMES, J. A. G.; KESMEZ, M.; PARGA, D.; COCKE, DAVID L. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. **Journal of Hazardous Materials**. p. 199-210, 2004.

MUCELIN, C. A. **Estatística elementar e experimental aplicada às tecnologias**. Medianeira, 2003.

PALÁCIO, S. M.; PASTORIZA, M. C.; MANENTI, D. R.; BORBA, F. H.; ESPINOZA-QUINONES, F. R.; MODENES, A. N. Tratamento de efluente de cromagem por eletrocoagulação com eletrodo de aço inoxidável e eletrodo misto de aço inoxidável e alumínio. **ENGEVISTA**. v. 15, n. 3. p. 248-254, 2013.

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

RAJU, G. B.; KARUPPIAH, M. T.; LATHA, S. S.; PARVATHY, S.; PRABHAKAR, S. Treatment of wastewater from synthetic textile industry by electrocoagulation–electrooxidation. **Chemical Engineering Journal**. p. 51-58, 2008.

RODRIGUEZ, J.; STOPIÉ, S.; KRAUSE, G.; FRIEDRICH, B. Feasibility assessment of electrocoagulation towards a new sustainable wastewater treatment. **Environmental Science and Pollution Research**. p. 477-482, 2007.

SANTOS, B. S. **Sistema de tratamento híbrido utilizado na remoção do corante reativo 5G de um efluente têxtil sintético**. 2015. 96 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2015.

SANTOS, E. P. **Alternativas para o tratamento de ultrafinos de minério de ferro da mina do Pico/MG por flotação em coluna**. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SILVEIRA, A. N. **Avaliação do reuso e tratamento de águas ácidas de minas de carvão pelo método NF-FADAT – neutralização, floculação e flotação por ar dissolvido de alta taxa**. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

TEXPAL INDÚSTRIA QUÍMICA. **Ficha de informação de segurança de produtos químicos** – FISPQ. Revisão A. 2008.