

Jorge Marcos Rosa

SUSTENTABILIDADE NO BENEFICIAMENTO TÊXTIL:  
PRODUÇÃO DE TINGIMENTOS COM REUSO DE EFLUENTE  
TRATADO POR FOTOCATÁLISE VIA UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Dissertação apresentado ao  
Programa de Mestrado em  
Engenharia de Produção da  
Universidade Nove de Julho  
para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia de  
Produção.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos Curvelo Santana  
Co-orientador: Prof. Dr. Elesandro Antônio Baptista

São Paulo – SP  
2010

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

## TERMO DE APROVAÇÃO

SUSTENTABILIDADE NO BENEFICIAMENTO TÊXTIL:  
PRODUÇÃO DE TINGIMENTOS COM REUSO DE EFLUENTE  
TRATADO POR FOTOCATÁLISE VIA UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

JORGE MARCOS ROSA

Dissertação apresentado ao  
Programa de Mestrado em  
Engenharia de Produção da  
Universidade Nove de Julho  
para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia de  
Produção.

---

Presidente: Prof. José Carlos Curvelo Santana, Dr. – Orientador – UNINOVE

---

Membro: Prof. Elesandro Antônio Baptista, Dr. – Co-orientador – UNINOVE

---

Membro: Prof. Elias Basile Tambourgi Dr. – UNICAMP

---

Coordenador: Prof. André Felipe Henriques Librantz – Dr. – UNINOVE

São Paulo, 13 de Agosto de 2010.

**EPIGRAFE**

*Antes tarde do que mais tarde. Tio Du.*

**DEDICATÓRIA**

A Deus, por conceder-me aos meus pais, Adão Marinho Rosa (*in memoriam*) e Francisca Paula de Melo (*in memoriam*), exemplos fantásticos de vida. Aos meus irmãos José Tolentino Rosa, Maria das Graças Rosa Fischer, Sebastião Quintino Rosa (*in memoriam*), Luiz Antonio Rosa, Marta Terezinha Rosa (*in memoriam*), Ceni Aparecida Rosa da Silva, Aureliano Edmundo Rosa e Fernando Francisco de Paula Rosa.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Dr. Curvelo pela extrema força e dedicação e ao meu co-orientador, Prof. Dr. Elesandro Antônio Batista pelas idéias;

Ao Diretor da Escola SENAI “Francisco Matarazzo”, Prof. Márcio Vieira Marinho, ao Coordenador Técnico, Prof. Paulo Salvi e à Coordenadora Pedagógica Prof<sup>a</sup>. Lilian Cristina Genzerico, não só pela disponibilização das dependências e equipamentos da Escola, bem como pela flexibilidade de horário.

Ao meu amigo Walter Aparecido Pollônio.

Ao meu amor, Camila Gomes Melo, e aos meus amados filhos, Edison Fischer dos Santos Rosa e Paula dos Santos Rosa, pela compreensão nos momentos de minha ausência.

À Universidade Nove de Julho pelo apoio financeiro.

**RESUMO**

ROSA, J.M.: SUSTENTABILIDADE NO BENEFICIAMENTO TÊXTIL: PRODUÇÃO DE TINGIMENTOS COM REUSO DE EFLUENTE TRATADO POR FOTOCATÁLISE VIA UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. São Paulo, 2010. **Dissertação** - Programa de Mestrado em Engenharia de Produção, UNINOVE, Universidade Nove de Julho.

O objetivo deste trabalho foi estudar a possibilidade de reutilização de efluentes têxteis tratados via fotocatalise homogênea via UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> em novos processos de tingimento. Os processos fotocatalíticos foram efetuados em um reator do tipo batelada contendo duas lâmpadas UV-C 237nm de 6W cada, à 296K e sob agitação magnética. Inicialmente foram testados três tipos de corantes contidos em efluentes sintéticos obtidos de tingimentos efetuados nas dependências da Escola SENAI "Francisco Matarazzo", todos com eficiência na decomposição fotoquímica acima de 90%. Após os ensaios com efluentes sintéticos, foram coletadas duas amostras de efluente real junto a uma tinturaria industrial, em cujas se efetuou um processo de decomposição com o auxílio de um planejamento fatorial 2<sup>3</sup>. Analisados os resultados, o melhor processo foi selecionado para ser aplicado na execução de cinco tingimentos consecutivos, com tratamentos fotoquímicos apresentando decomposição acima de 85%. Os tingimentos efetuados com efluentes tratados foram testados contra tingimentos efetuados com água e obtiveram resultados satisfatórios, todos com desvios totais abaixo de DE = 1,10, demonstrando que o processo é passível de ser aplicado para reuso de efluente tratado em novos processos de tingimento.

**Palavras-chave:** reuso; efluentes têxteis; fotocatalise homogênea; UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

**ABSTRACT**

ROSA, J.M.: SUSTAINABILITY IN THE PRODUCTION OF TEXTILES: DYEINGS PRODUCTION WITH REUSE OF TREATED WASTEWATER BY PHOTOCATALYSIS VIA UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. São Paulo, 2010. Dissertation - Production Engineering Master's Program, UNINOVE, Nove de Julho University.

The aim of this work was to verify the reuse possibility of treated textile wastewater by homogeneous photocatalysis via UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. The photocatalytic process was performed in a kind of boatload reactor containing two UV-C lamps, 237nm, 6W each, at 296K under magnetic stirring. Initially were tested three types of dyes present in synthetic wastewater. All dyeing were done at "Francisco Matarazzo" SENAI School Laboratory and all wastewater photochemical decomposition test had efficiency above 90%. After those tests with synthetic wastewater, were collected two real wastewater samples from a dyeing room, in which were done nine decomposition process with aid of a factorial planning 2<sup>3</sup>. After the analysis of the results, the best process was selected to be applied in order to realize five consecutive dyeing, all of them with photochemical decomposition treatments results above 85%. The dyeing made with wastewater were tested against dyeing made with water, with satisfactory results, all with total deviations below DE = 1.10, showing that the process can be applied in order to reuse the treated wastewater it in new dyeing processes.

**Keywords:** reuse; textile wastewater; homogeneous photocatalysis; UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

**Lista de Abreviaturas e Símbolos**

**ABEPRO** – Associação Brasileira de Engenharia de Produção

**ABIQUIM** – Associação Brasileira da Indústria Química.

**Abs** – Absorbância

**C.I.** – Colour Index

**CIE** – Refere-se à International Commission of Illumination porém, abreviado do Francês: Commission Internationale de L'éclairage.

**CONAMA** – Conselho Nacional do Meio Ambiente.

**DE** – Desvio Total (CIELab)

**DL** – Desvio no eixo da Luminosidade

**Da** – Desvio nos eixos de tonalidade verde/vermelho

**Db** – Desvio no eixo de tonalidade amarelo/azul

**ETE** – Estação de Tratamento de Efluentes

**IUPAC** – International Union of Pure and Applied Chemistry.

**L\*a\*b\*** – Eixos **L\***, **a\*** e **b\***, utilizados no Sistema CIE. O eixo **L\*** refere-se à Luminosidade (Claro/Escuro) e os eixos **a\*/b\*** à tonalidade, sendo o eixo **a\*** para variações entre verde/vermelho e o eixo **b\***, para variações entre amarelo/azul.

**POA** – Processo Oxidativo Avançado

**Vis** – Visível

**W** – Watt

**K** – Kelvin

**nm** – Nanômetro

**pH** – Potencial Hidrogeniônico

**°Bé** – Graus Baumé

**$\alpha$**  – conversão da reação

**$k$**  – constante de velocidade

**$\lambda_{\max}$**  – comprimento máximo de onda

**SUMÁRIO DE CONTEÚDOS**

1 – INTRODUÇÃO .....	13
1.1 – Justificativa .....	14
1.2 – Objetivos .....	15
2 – REVISÃO BIBLIOGRAFICA .....	18
2.1 – Corantes Têxteis.....	19
2.2 – A indústria têxtil e o meio ambiente .....	24
2.3 – Tratamentos de efluentes têxteis.....	27
3 – MATERIAIS E MÉTODOS .....	30
3.1 – Materiais .....	31
3.2 – Métodos .....	34
4 – RESULTADOS e DISCUSSÃO .....	39
4.1 – Estudos Preliminares .....	39
4.2 – Efluente Real .....	54
4.3 – Aplicação do processo otimizado .....	58
4.4 – Custos ecológicos no processo de reuso da água na indústria têxtil .....	67
5 – CONCLUSÃO .....	70
5.1 – Sugestões para novas pesquisas .....	72
6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	73
7 – GLOSSÁRIO.....	78

**Lista de Figuras**

Figura 01. Estrutura do Reactive Blue 19. ....	21
Figura 02. Estrutura do Reactive Violet 5. ....	21
Figura 03. Estrutura do Reactive Black 5. ....	21
Figura 04. Beneficiamento da fibra de algodão em relação às demais fibras. ...	26
Figura 05. Tingimento da fibra de algodão em relação a outros processos. ....	26
Figura 06. Atividades comuns na elaboração de um modelo. ....	30
Figura 07a. Desenho do reator fotoquímico. ....	32
Figura 07b. Foto do reator fotoquímico. ....	33
Figura 08. Processo de preparação do substrato. ....	35
Figura 09. Processo de tingimento. ....	36
Figura 10. Resultado da fotodecomposição do efluente bruto em 70 min. ....	39
Figura 11. Gráfico de fotodecomposição do efluente bruto em 200 min sob pH 7,0. ....	40
Figura 12. Gráfico de fotodecomposição do efluente diluído 10 vezes, em 90 min e pH 7. ....	41
Figura 13. Gráfico de fotodecomposição do efluente diluído 10 vezes, em 90 min, pH 9 e 11. ....	42
Figura 14. Gráfico da decomposição fotoquímica do corante diluído em água. ....	46
Figura 15. Representação do álcool (1) e do éter (2) oriundos da reação corante-água. ....	48
Figura 16. Gráfico da decomposição fotoquímica do corante contido em efluente. ....	49
Figura 17. Comparação entre tratamentos. ....	49
Figura 18. Gráfico comparativo entre os dois experimentos. ....	50
Figura 19. Efluente bruto x efluentes tratados. ....	52
Figura 20. Fotodecomposição em pH 7, 9 e 11. ....	52
Figura 21. Sistema CIELab. ....	53

Figura 22. Diluição e $[H_2O_2]$ , efluentes Castanho (A) e Vermelho (B).....	55
Figura 23. Diluição e pH, efluentes Castanho (A) e Vermelho (B). ....	56
Figura 24. $[H_2O_2]$ e pH, efluentes Castanho (A) e Vermelho (B).....	57
Figura 25. Gráfico de preparação e tingimentos A, B, C, e D.....	59
Figura 26. Gráfico do tingimento E. ....	59
Figura 27. Decomposição fotoquímica dos efluentes relativos aos Tingimento A, B, C e D. ....	61
Figura 28. Decomposição fotoquímica do efluente relativo ao Tingimento A.....	62
Figura 29. Decomposição fotoquímica do efluente relativo ao Tingimento B.....	62
Figura 30. Decomposição fotoquímica do efluente relativo ao Tingimento C.....	63
Figura 31. Decomposição fotoquímica do efluente relativo ao Tingimento D.....	63
Figura 32. Dados relativos ao Tingimento A, efluente tratado e água de reabastecimento. ....	64
Figura 33. Dados relativos ao Tingimento B, efluente tratado e água de reabastecimento. ....	64
Figura 34. Dados relativos ao Tingimento C, efluente tratado e água de reabastecimento. ....	65
Figura 35. Dados relativos ao Tingimento D, efluente tratado e água de reabastecimento. ....	65
Figura 36. Dados relativos ao Tingimento E, efluente tratado e água de reabastecimento. ....	66

**Lista de Tabelas**

Tabela 01. Tabela de auxiliares de tingimento. ....	35
Tabela 02. Planejamento 2 <sup>3</sup> para otimização do processo de fotodegradação do efluente real. ....	38
Tabela 03. Dados sobre a coleta das amostras de efluente.....	38
Tabela 04. Dados da conversão obtida nos ensaios. ....	42
Tabela 05. Resultado da matriz de correlação concentração x tempo para o corante em água.....	45
Tabela 06. Resultados dos cálculos da cinética referente ao corante diluído em água. ....	45
Tabela 07. Matriz de correlação concentração x tempo para o corante em efluente. ....	47
Tabela 08. Resultados dos cálculos da cinética referente ao corante contido em efluente.....	48
Tabela 09. Tabela com os valores relativos aos dois experimentos. ....	50
Tabela 10. Resultados dos tratamentos fotoquímicos nas três faixas de pH. ....	51
Tabela 11. Análise de variância do modelo para o efluente castanho. ....	54
Tabela 12. Análise de variância do modelo para o efluente vermelho. ....	54
Tabela 13. Conversões obtidas no planejamento fatorial dos dois efluentes.....	58
Tabela 14. Receitas e ordem de tingimento. ....	60
Tabela 15. Dados sobre a fotocatalise dos efluentes.....	61
Tabela 16. Desvios parciais e totais referentes aos Tingimentos A, B, C, D e E.....	66
Tabela 17. Comparação entre processos.....	67
Tabela 18. Projeção de consumo mensal.....	69
Tabela 19. Tarifas dos serviços de fornecimento de água e coleta de esgoto.....	69

## 1 – INTRODUÇÃO

A busca por sustentabilidade tem sido uma constante não só para as empresas têxteis, bem como para empresas de vários segmentos. A redução no consumo de recursos hídricos é um dos pontos mais explorados principalmente em tinturarias, onde o consumo de água é elevado.

Todos os processos industriais produzem efluentes sejam sólidos, líquidos ou gasosos, em maior ou menor quantidade, tornando-se imprescindível o seu tratamento, de modo que obedçam aos padrões ambientais estabelecidos pela legislação, mais especificamente as Resoluções Nº 020 de 1986 e Nº 274 de 2000 do CONAMA (1986 e 2000).

A indústria têxtil representa um extraordinário valor econômico-social, absorvendo expressiva quantidade de mão de obra e gerando divisas. O Brasil, com cerca de cinco mil empresas no segmento, é o sexto produtor mundial e quinto em geração de empregos diretos, produzindo anualmente quase dois milhões de toneladas de tecido, o que representa 2,5% da produção mundial. Em 2007, chegou a representar 17,3% do emprego total da indústria de transformação nacional (CONCHON, 1999; PRADO, M.V. e PRADO, R.V.B., 2008).

Pode-se citar como exemplo a Hering, tradicional marca de vestuário, fundada em 1880, com sede em Santa Catarina, que possui 202 lojas, sendo 16 próprias, e planeja chegar até 2010 com 325 lojas, sendo 50 próprias. No exterior possui 23 pontos de venda franqueados e sua produção mensal de 3,5 milhões de peças/ano reúne as etiquetas Hering, Dzarm e PUC. Para os próximos três anos, pretende ampliar a produção para 5,5 milhões de peças anuais (IEMI, 2007).

A indústria têxtil, em particular, apresenta elevada demanda de água em seus processos, gerando grande quantidade de águas residuárias, as quais, geralmente, contêm altas cargas de sais dissolvidos, surfactantes, sólidos suspensos e matéria orgânica, principalmente de corantes na forma de moléculas complexas (NEAMTU *et al.*, 2002).

Levando-se em consideração o fato de que todo esse produto é tinto, lavado ou estampado e que, para tanto, utiliza-se um volume expressivo de

água, em torno de 50 a 100 litros para cada quilograma beneficiado, alcança-se um alarmante consumo médio de água de aproximadamente 150 bilhões de metros cúbicos por ano (RUSCHIONI, 2007).

Toda essa água empregada gera grande quantidade de águas residuárias, as quais, geralmente, contêm altas cargas de sais dissolvidos, surfactantes, sólidos suspensos e matéria orgânica, principalmente de corantes na forma de moléculas complexas. Assim sendo, dos impactos ambientais, um dos principais problemas na indústria têxtil diz respeito à geração de efluentes poluidores (NEAMTU *et al.*, 2002; HASSEMER e SENS, 2002; BABAN *et al.*, 2004).

Este fato torna-se ainda mais preocupante quando se concatena esses dados com o estudo de Oliveira e Von Sperling (2005), onde foram analisadas 166 Estações de Tratamento de Efluentes (ETE) em operação no país, todas com desempenho considerado insatisfatório. Segundo os autores, as tecnologias de tratamento de efluentes mais usualmente utilizadas no Brasil são fossa séptica seguida de filtragem anaeróbia, lagoas facultativas, lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas e lodos ativados, entretanto, esses métodos têm pouco ou nenhum efeitos sobre o tratamento do efluente.

No beneficiamento do algodão, por exemplo, a geração de efluentes e a não reutilização dos banhos de processamento ocasiona um descarte de, no mínimo, 35 litros de efluente para cada quilograma de substrato tratado. Esse efluente é composto por diversos contaminantes tais como dispersantes, tensoativos, silicatos e fixadores, dentre outros. A variação de corantes é significativa, gerando unidades absorciométricas de cor na faixa de 420 nm a 600 nm (MACHADO *et al.*, 2006).

### **1.1 – Justificativa**

A proposta deste estudo é justamente a reutilização destes efluentes após serem tratados por Processo de Oxidação Avançado (POA), do tipo fotocatalise homogênea via UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, em um reator contendo agitação magnética e duas lâmpadas UV-C (237 nm) de seis W cada.

Os POA têm sido pesquisados com intuito de incorporar-se aos tratamentos convencionais de efluentes. Vêm atraindo grande interesse por serem mais sustentáveis em longo prazo e são baseados na formação de grupos hidroxila ( $\text{HO}\bullet$ ), agentes altamente oxidantes que, devido à sua alta reatividade, podem reagir com uma grande variedade de classes de compostos orgânicos, promovendo uma total conversão para compostos inócuos, como  $\text{CO}_2$  e água.

Em Aleboyeh *et al.* (2003), o processo de oxidação avançada via UV/ $\text{H}_2\text{O}_2$  é descrito como capaz de destruir totalmente a estrutura cromófora de alguns corantes, sendo que a extensão da degradação depende da estrutura básica da molécula e da natureza dos grupos auxiliares ligados ao núcleo aromático dos corantes. A degradação da cor é devida à ação da radiação UV e do grupo hidroxila gerado na fotólise do peróxido de hidrogênio.

Os POA dividem-se em sistemas homogêneos e heterogêneos onde os grupos hidroxila são gerados com ou sem irradiação ultravioleta, dentre os quais podemos citar como exemplos de sistemas homogêneos os processos que envolvem a utilização de ozônio, peróxido de hidrogênio, decomposição catalítica de peróxido de hidrogênio em meio ácido; reação de Fenton ou Foto-Fenton e como sistemas heterogêneos, os que utilizam semicondutores como dióxido de titânio (BRITO e RANGEL, 2008).

Portanto, justifica-se a escolha deste tipo de tratamento para que os efluentes possam ser tratados e reutilizados em, no mínimo 95% dos processos de beneficiamentos têxteis, o que representaria uma significativa economia de recursos hídricos naturais.

## **1.2 – Objetivos**

A sustentabilidade em uma empresa depende, dentre vários fatores, de quão limpa e enxuta for sua produção. Apesar de novas tecnologias gerando novos equipamentos, a indústria têxtil, mais precisamente o setor de beneficiamentos têxteis, ainda é uma das indústrias onde se consome uma considerável quantia de recursos hídricos, como observado nos estudos de Ruschioni (2007) e Machado *et al.* (2006).

### 1.2.1 – Objetivo Geral

Com foco principal voltado para a sustentabilidade no consumo de água em empresas que beneficiam fios e tecidos de algodão, o objetivo desta pesquisa é estudar a possibilidade de reutilização de efluentes tratados por POA em, no mínimo, 90% de novos processos de limpeza, alvejamento e tingimento.

### 1.2.2 – Objetivos Específicos

- Montar um reator fotoquímico do tipo batelada, com capacidade para um litro e que deverá conter duas lâmpadas do tipo UV-C 237 nm, agitação e sistema protetor da ação de luz externa, onde deverão ser realizados os experimentos;

- Preparar soluções de corantes em água destilada para posterior análise do comportamento de fotodecomposição no reator, sob condições variadas de pH, verificando a influência do  $H_2O_2$  e também da radiação UV;

- Executar a preparação de tingimentos com os mesmos corantes no intuito de obter efluente real em escala piloto e, com auxílio de planejamento fatorial  $2^3$ , determinar as quantidades ideais de produtos auxiliares a serem utilizados para, desta forma, poder reproduzir os processos de produção industrial;

- Testar o comportamento de fotodecomposição dos efluentes obtidos em escala piloto, sob condições variadas de UV/  $H_2O_2$ , fatores de diluição e faixas de pH;

- Verificar a cinética de fotodegradação do corante quando diluído em água e também do mesmo corante presente em efluente real obtido em escala piloto, ambos tratados nas mesmas condições de UV/  $H_2O_2$  e pH;

- Coletar amostras de efluentes diretamente de uma tinturaria industrial e testar sua degradação no reator fotoquímico com auxílio de planejamento fatorial  $2^3$ , variando quantidades de  $H_2O_2$ , fatores de diluição e pH;

- Efetuar um tingimento, tratar seu efluente com processo otimizado obtido no tratamento de efluente coletado junto à tinturaria industrial e estudar sua utilização e reutilização após as diversas etapas de degradações pelo POA, para verificar-se a quantidade de reutilização do efluente que o processo permite.

## 2 – REVISÃO BIBLIOGRAFICA

A maior parte dos trabalhos atuais sobre efluentes diz respeito a tratamentos alternativos para posterior descarte, sendo poucos os que dissertam sobre sua reutilização.

Também tem havido dificuldades para alguns pesquisadores na execução de ensaios, como observado no Editorial da revista *Dyes and Pigments* (n. 79, 2008), do qual foram traduzidos alguns trechos, descritos a seguir.

“Desde quando o sistema de submissão on-line da *Dyes and Pigments* entrou em funcionamento há quase dois anos, dos documentos que foram analisados pouco mais de 60% trata sobre remoção de corantes via adsorção e/ou degradação. Esta elevada porcentagem reflete claramente a importância da remoção de corante como objeto de estudo e, como são de autores de todo o mundo, mostra também que a pesquisa remoção de corante é verdadeiramente de interesse mundial.

No entanto, deste grande número de manuscritos submetidos sobre remoção de corante, uma proporção alarmante foi considerada inaceitável para a publicação. Dos trabalhos apresentados apenas 8% foram aceitos e 92% foram rejeitados. Esta taxa de rejeição é consideravelmente superior às das outras áreas do jornal como, por exemplo, síntese de corantes, pigmentos e produtos intermediários, suas propriedades físicas ou químicas, dentre outras.

Depois de ler todos os documentos apresentados, bem como todos os comentários dos revisores, fica claro que os manuscritos rejeitados possuem várias características comuns e são muito semelhantes em sua apresentação e organização. Alguns comentários dos revisores incluem as seguintes observações:

- muitos autores não estão familiarizados com a utilização dos corantes, sua classificação e o conceito de nomes genéricos;
- não há um argumento plausível do porque da seleção deste ou daquele corante em particular;
- os corantes selecionados para estudo têm sido corantes antigos ou sem importância comercial;

- muitos autores não têm ciência de que o efluente real é uma mistura complexa de corantes, aditivos, eletrólitos e que o uso de água destilada para as soluções de estudo não representa as condições de um efluente real.”

Através deste editorial, percebe-se o quão complexo é o universo dos corantes, sua utilização, impactos ambientais, dentre outros itens. Para se ter uma idéia desta complexidade, somente dos corantes utilizados no tingimento de fibras celulósicas pode-se citar os Diretos, com três classes distintas e os Reativos, com sete classes subdivididas em monofuncional, bi-heterofuncional e bi-homofuncional, dos tipos halogenoheterocíclicos e vinilsulfônico. Além destes dois corantes, para fibras celulósicas ainda existem os corantes sulfurosos, à tina e naftóis (SALEM, 1999).

Em termos de grupo cromóforo, além dos grupos Azo (que podem ser mono, di, tri ou poliazo) também há os grupos Antraquinônicos, Trifenilmetanos, Azinas, Oxazinas, Nitros e Stilbenos dentre vários outros, todos descritos por Abrahart (1977).

Assim sendo neste capítulo, serão abordados tópicos reativos aos corantes estudados, a indústria têxtil e o meio ambiente, além de alguns dos principais tipos atuais de tratamentos de efluentes.

## **2.1 – Corantes Têxteis**

Os corantes são substâncias classificadas quimicamente como Sistemas Cromógenos, capazes de refletir determinadas ondas eletromagnéticas de comprimento compreendido entre 400 e 720 nm (BILLMEYER e SALTZMAN, 1981).

Existem várias classes de corantes e dentro de cada classe, vários tipos. Podem ter afinidade com uma ou várias fibras, porém todos interagem com o substrato através de dois tipos de ligação: Ligações de Hidrogênio e Forças de van der Waals. Além destas duas forças também pode haver ligações covalentes ou iônicas, dependendo do corante utilizado (JOHNSON, 1989).

Zollinger (1991) postulou que, enquanto sistemas os corantes podem ser divididos em três principais grupos: auxocromos - grupos doadores de elétrons

(NH<sub>2</sub>, OH); anti-auxocromos - grupos receptores de elétrons (NO<sub>2</sub>, COOH) e cromóforos - grupos lineares ou cíclicos com duplas ligações conjugadas, responsáveis pela ressonância (-N=N-; C=O).

Entretanto, em 1996, a *International Union of Pure and Applied Chemistry*, (IUPAC), definiu o termo Auxocromo como obsoleto:

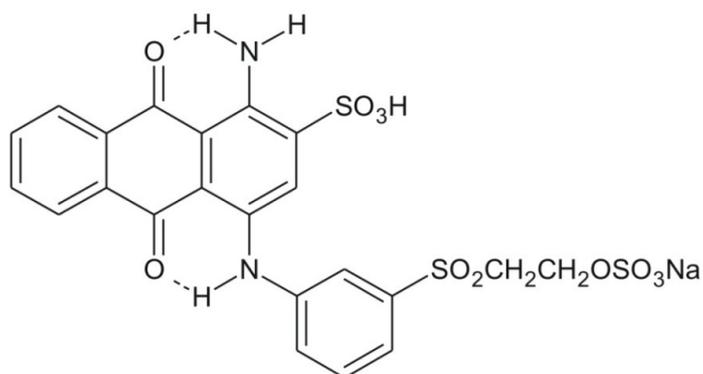
“Auxocromo: um átomo, ou grupo de átomos, que quando adicionado ou introduzido em um grupo cromóforo, causa mudança na posição da banda espectral e/ou um efeito hiperacrômico da banda introduzida no grupo cromóforo, geralmente na banda de mais baixa frequência. Este termo é obsoleto.” (Traduzido pelo autor, do original *Auxochrome, Compendium of Chemical Terminology, IUPAC, 1997*)

Portanto, nos dias de hoje, em vez das denominações auxocromo e anti-auxocromo, a espectroscopia define os sistemas cromógenos em grupos cromóforos, os grupos responsáveis pela cor; grupos doadores de elétrons, os grupos de maior densidade eletrônica e grupos receptores de elétrons, os grupos de menor densidade eletrônica.

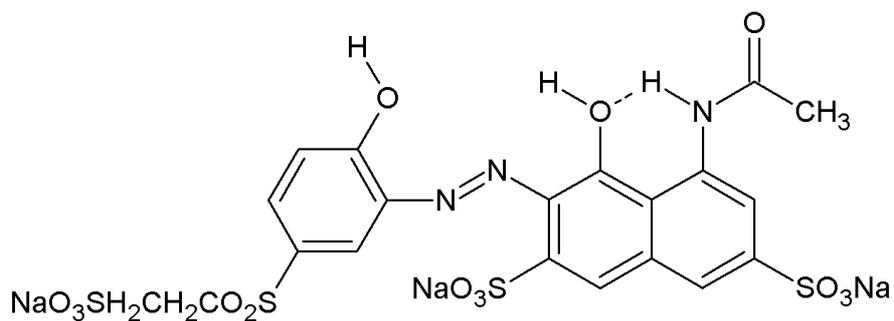
Segundo a Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM, 2009), a utilização de corantes têxteis no Brasil concentra-se principalmente nos corantes reativos para fibras celulósicas, que hoje respondem por 57% do mercado, um dos motivos da escolha por trabalhar-se com este tipo de corante.

Os corantes reativos são utilizados em grande escala no tingimento de fibras de algodão e viscose, principalmente para o segmento de vestuário em cores de intensidade média e escura, devido a seus bons índices de solidez aos tratamentos úmidos. Entretanto, este tipo de corante reage não só com o substrato, bem como com a água e, desta forma, acaba sendo um dos principais constituintes dos efluentes de tinturarias, outro motivo para a eleição deste tipo de corante.

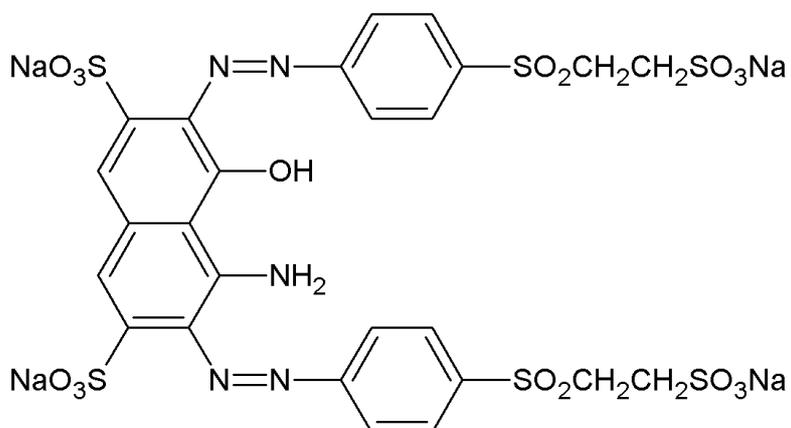
Nas Figuras 01, 02 e 03, a estrutura de três corantes estudados e analisados em água destilada e em efluente sintetizado.



**Figura 01.** *Reactive Blue 19* (RB19), reativo do tipo VS, grupo cromóforo antraquinônico e massa igual a  $628,60 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$  (ROSA *et al*, 2009).



**Figura 02.** *Reactive Violet 5* (RV5), reativo do tipo VS, grupo cromóforo azo e massa igual a  $719,60 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$  (SDC, 1971).



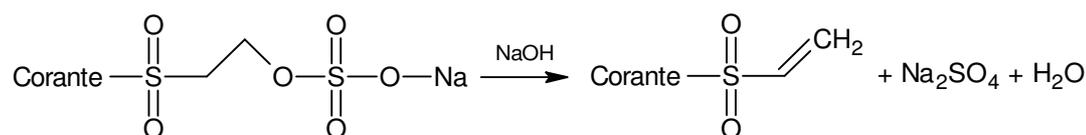
**Figura 03.** *Reactive Black 5* (RB5), reativo do tipo VS, grupo cromóforo azo e massa igual a  $991,80 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$  (SOUZA e PERALTA-ZAMORA, 2005).

O processo de coloração da celulose com esse tipo de corante é efetuado em presença de álcali e, devido a esse fato, o efluente gerado também possui pH alcalino.

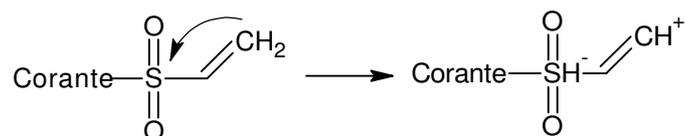
Em relação aos grupos reativos, podem-se classificar os corantes em dois tipos sendo os Halogehoheterocíclicos (HHC) e os Vinilsulfônicos (VS). Também há corantes que possuem dois, ou mais, grupos reativos que podem ser iguais, os bi-homofuncionais, ou diferentes, os bi-heterofuncionais.

Os corantes contemplados neste estudo possuem grupo reativo do tipo VS. Os VS são corantes de relativa facilidade de aplicação, pouca substantividade quando comparado aos demais tipos e sua reação com a fibra ocorre por adição nucleofílica em quatro etapas distintas, descritas por Rosa (2008) e mostradas a seguir.

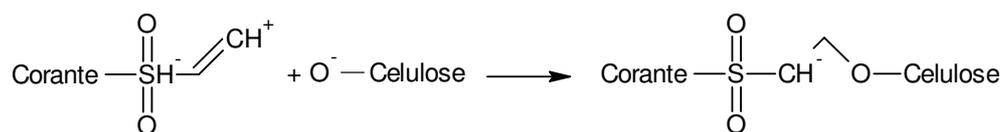
- Etapa 01 - O corante possui o grupo  $\beta$ -sulfatoetilsulfona que, em presença de álcali, elimina sulfato de sódio e água, dando origem ao grupo VS, mostrado na reação abaixo.



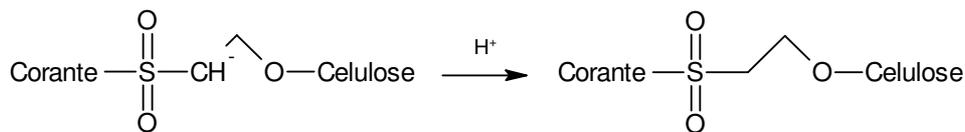
- Etapa 02 - Neste grupo, a dupla ligação carbono-carbono é polarizada pela atração eletrônica do grupo sulfônico, representada na reação a seguir.



- Etapa 03 - Esta polarização implica em carga positiva ao carbono terminal, permitindo que a adição nucleofílica ocorra com a celulose ionizada. A reação abaixo explica como isso ocorre.

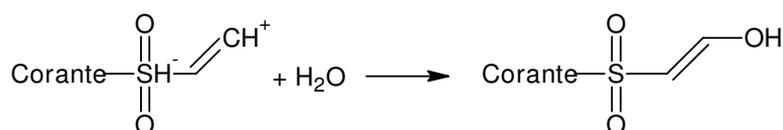


• Etapa 04 - Através da adição de um próton, a reação é completada, como está mostrado abaixo.

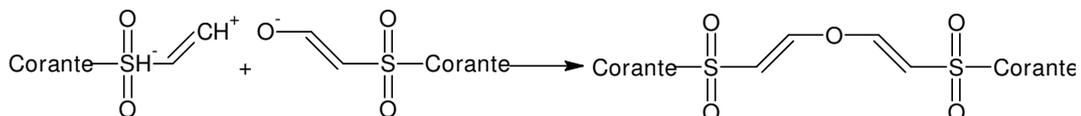


O corante também reage com a água, tornando-se ineficaz na coloração do substrato. Conforme já demonstrado na Etapa 01, o grupo  $\beta$ -sulfatoetilsulfona em presença de álcali torna-se o grupo reativo VS. Segundo SHORE (2002), sua reação com a água pode gerar compostos etílicos ou etéreos, ocorrendo de duas formas:

a) O grupo VS reage com a água formando o grupo sulfonietanol. Isso pode ser observado na reação a seguir.



b) Temperaturas entre 90 e 100°C e pH acima de 11,5 em presença de ânions carbonato ou hidróxido, condições encontradas no tratamento posterior ao tingimento, são condições para a formação do 2-hidróxietilsulfona, uma forma de dietiléter que pode chegar a 10% da massa inicial de corante utilizado. A seguir, o esquema da reação.



São essas duas formas que estarão presentes em maior quantidade nos efluentes. Entretanto, presume-se que o alvo do ataque fotoquímico seja o grupo cromóforo contido no sistema e existem vários tipos de grupos cromóforos tais como Azo, Antraquinônico, Trifenilmetano, dentre outros. Os grupos contidos nos corantes presentes nesse estudo são do tipo antraquinônico e azo.

Devido à competição entre a celulose e os íons hidroxila nos banhos de tingimentos em condições pH alcalino e também concentrações de sais variando de 30 a 90 g.L<sup>-1</sup>, calcula-se que a perda de corantes varie entre 10 a

40%, devido a não reação com a fibra. A falta de afinidade do corante hidrolisado para com a fibra resulta, conseqüentemente, no efluente altamente colorido (TUNUSSI e ALEM SOBRINHO, 2002; BEYDILLI e PAVLOSTATHIS, 2005).

## **2.2 – A indústria têxtil e o meio ambiente**

Nos processos de beneficiamentos têxteis, a maior parte do consumo de água é destinada aos setores de lavagem, alvejamento e tingimento. Numerosas operações são necessárias a fim de dar ao tecido o máximo de propriedades, gerando assim em cada etapa diferentes despejos. Dependendo da origem os efluentes apresentam vazões, cargas orgânicas e condutividade devida aos sais e auxiliares de tingimento adicionados, além de alta coloração e pH elevado (VANDEVIVERE *et al.*, 1998).

Conchon (1999) relatou que a indústria têxtil representa um extraordinário valor econômico-social, absorvendo expressiva quantidade de mão de obra e gerando divisas. No Brasil, há cerca de 5.000 indústrias têxteis, assim distribuído: 11 % de grande porte; 21 % de pequeno; e 68 % como micro-empresas. O setor têxtil brasileiro ocupa o 5º lugar em empregos diretos e o 6º em faturamento.

Em 2007, o setor representou 5,2% do faturamento total da indústria de transformação e, em termos de pessoal ocupado, a participação foi ainda mais expressiva, com 17,3% do emprego total da indústria de transformação nacional. Com base nos dados do consumo mundial de fibras em 1990 e 2006, bem como na população mundial nesses mesmos anos, é possível concluir que em 1990 o consumo mundial *per capita* era de 7,6 kg por habitante, passando para 10,9 kg por habitante em 2006, ou seja, um aumento de 43,4% no consumo por pessoa, nos últimos 16 anos (PRADO, M. e PRADO, 2008).

Ainda segundo Prado, M. e Prado (2008), o Brasil ocupa o 6º lugar mundial na produção de têxteis com produção anual em torno de 1.732 milhões de toneladas por ano, que representam 2,5% da produção mundial.

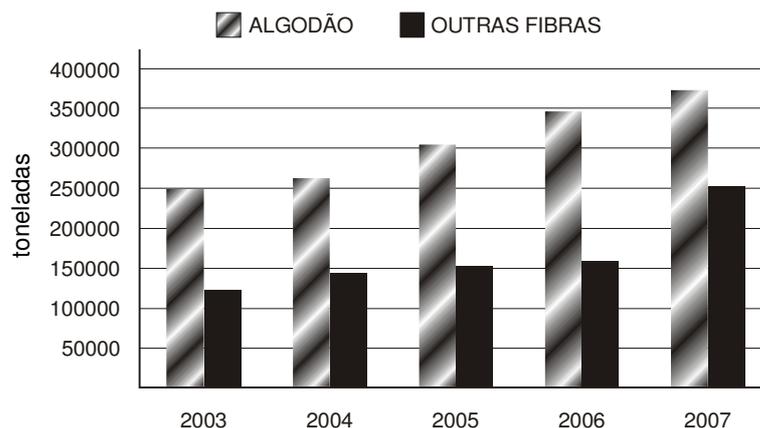
Levando-se em consideração o fato de que todo esse produto é tinto, lavado ou estampado e que, para tanto, utiliza-se um volume expressivo de

água, em torno de 50 a 100 litros para cada quilograma segundo Ruschioni (2007), chega-se ao alarmante consumo médio de água como sendo aproximadamente  $1,50 \times 10^{11}$  metros cúbicos por ano.

Segundo Coughlin, Kinkle e Bishop (2003), cerca de 4% da produção de corantes orgânicos decorrente dos processos de síntese e aplicação se perdem para o meio ambiente, produzindo águas residuárias fortemente coloridas. O desenvolvimento de tecnologias eficientes e baratas para o tratamento de efluentes contendo corantes constitui uma necessidade, e consideráveis esforços estão sendo dedicados a esse campo de pesquisa.

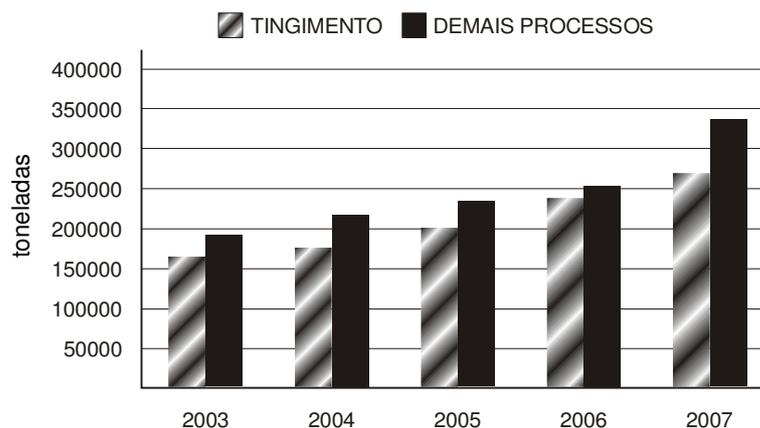
Lucas *et al.* (2008) citaram que “a contaminação de águas naturais tem sido um dos grandes problemas da sociedade moderna. Sendo assim, a economia de água em processos produtivos vem ganhando especial atenção devido ao valor agregado que tem sido atribuído a este bem, através de princípios como ‘consumidor pagador’ e ‘poluidor pagador’, recentemente incorporados na nossa legislação”.

Nas Figuras 04 e 05 um comparativo do tingimento da fibra de algodão em relação às demais fibras e do processo de tingimento em relação aos demais processos de beneficiamento de malhas, no período de 2003 a 2007.



**Figura 04.** Beneficiamento da fibra de algodão em relação às demais fibras no período de 2003-2007 (PRADO, M. e PRADO, 2008).

Houve um aumento de 246.588 toneladas em 2003 para 371.191 toneladas em 2007, o que representa um crescimento de 50,53% no beneficiamento de tecidos de malha de algodão 100%. Outras fibras somadas: Acetato, Viscose, Poliamida, Acrílico, Poliéster e Polietileno, todos os valores em toneladas.



**Figura 05.** Tingimento da fibra de algodão em relação aos demais processos no período de 2003-2007 (PRADO, M. e PRADO, 2008).

Neste tópico, o aumento observado foi de 169.431 toneladas em 2003 para 275.876 toneladas em 2007, representando um crescimento de 62,82% no beneficiamento de tecidos de malha de algodão 100%. Os demais processos são: alveijamento, amaciamento, calandragem, purga, navalhagem,

estamparia, impermeabilização, mercerização, resinagem e vaporização, sendo os valores expressos também em toneladas.

### 2.3 – Tratamentos de efluentes têxteis

Durante as últimas décadas têm-se pesquisado novos métodos que possibilitem uma maior eficiência no tratamento dos efluentes têxteis, no intuito de reduzir os seus impactos ao serem descartados em corpos hídricos e de até se reaproveitar, parcial ou totalmente, a água contida nele, como se vê a seguir.

Salgado *et al.* (2009) utilizaram processos de oxidação avançada,  $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$  e UV/  $\text{H}_2\text{O}_2$ , na descoloração de dois efluentes sintéticos, contendo corantes tipo índigo e azo, e de um efluente de lavanderia industrial. Foram tratadas soluções com concentração de 20 mg/L dos corantes índigo carmim e vermelho congo e também o efluente têxtil com  $\text{pH} = 3$ . Todas as amostras foram submetidas a diferentes condições oxidantes sob temperatura ambiente (27 °C). As remoções de cor e de DQO foram avaliadas em cada sistema oxidativo estudado. Os resultados obtidos mostraram que os processos utilizados são muito promissores na descoloração dos efluentes. A descoloração completa das soluções foi alcançada nos processos Fenton e com UV/  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

Braúna *et al.* (2009) estudaram o efeito do nitrato na descoloração de corantes em reatores anaeróbios, suplementados ou não, com mediadores redox. Dois reatores anaeróbios em paralelo foram operados com tempo de retenção hidráulica (TDH) de dez horas, utilizando-se etanol como cossubstrato. Os resultados provaram que os reatores eram eficientes na remoção de cor, sendo o composto etanol um eficiente doador de elétrons para sustentar a redução do corante azo. O mediador redox aumentou as taxas de redução do corante azo, mas o seu efeito não foi tão marcante comparado aos experimentos realizados anteriormente. Contrariamente às hipóteses levantadas de que a adição de nitrato poderia interferir nas taxas de remoção de cor e propriedades catalíticas do mediador redox, não se verificou nenhum efeito desse composto.

Em outro estudo, Aleboye *et al.* (2008) utilizou o auxílio de redes neurais artificiais para prever a descoloração fotoquímica de uma solução de um corante *Acid Orange* utilizando POA via UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. A rede foi alimentada com concentrações iniciais de corante e peróxido, valores de pH da solução e tempo de irradiação, sendo o resultado expresso em eficiência de descoloração. Os demais dados introduzidos foram dados de outros trabalhos dos autores.

Como esperado e descrito pelos próprios autores, a concentração inicial de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> teve uma relevância significativa de 48,89%, aparentando ser a variável mais influente no processo de descolorização, demonstrando viabilidade na aplicação desta técnica inteligente.

Lucas e Peres (2007) compararam diferentes sistemas de fotoxidação, utilizando Fenton/UV-C e Ferrioxalato/Peróxido/Luz Solar na descoloração e mineralização de corantes azo. Em primeira instância os autores pesquisaram diferentes processos de descoloração do *Colour Index (C.I.) Reactive Black 5* (RB5) para posteriormente buscar parâmetros otimizados para os processos de Fenton/UV-C e Ferrioxalato/Peróxido/Luz Solar, variando pH, quantidade de peróxido, dosagem de ferro, concentração de RV5 e fonte de luz. Foi detectado uma diferença não muito significativa entre os dois processos, ambos eficientes, com valores de 98,1% e 93,2 respectivamente, após 30 minutos.

Ainda na linha de pesquisas envolvendo POA, Alinsafi *et al.* (2006) utilizaram fotocatalise envolvendo partículas de TiO<sub>2</sub> irradiadas por radiação UV solar. A descoloração obtida através desse método foi de 74%.

Além dos estudos já citados, vários outros envolvendo combinação de novas tecnologias tem sido opções atrativas para o tratamento de efluentes.

Cinco diferentes corantes diluídos em água (*C.I. Direct Red 75, 80, 81 and C.I. Direct Yellow 8 and 27*) foram tratados com nanofiltração por Hwan Mo *et al.* (2008) por meio de membranas compósitas de poliamida, para obtenção de água de reuso. Os resultados obtidos foram todos próximos da casa dos 100%.

O estudo de alguns agentes alternativos utilizando-se de biomassa como adsorvente também tem despertado atenção recentemente. Alguns artigos têm sido publicados nos últimos anos, utilizando carvão ativado de coco, bambu, casca de eucalipto e quitosana como materiais adsorventes. Já os tratamentos biológicos convencionais requerem um longo tempo para que o efluente atinja os padrões exigidos, além de possuir uma faixa pequena de pH e temperatura na qual o sistema pode atuar (KUNZ *et al.*, 2002; TEIXEIRA e JARDIM, 2004).

Shimokawa *et al.* (2008) estudaram a descoloração com enzimas obtidas através da cultura híbrida do basitomiceto *Thanatephorus cucumeris*. Nos ensaios de descoloração de 16 diferentes corantes, 13 obtiveram valores acima de 90% em 10 dias.

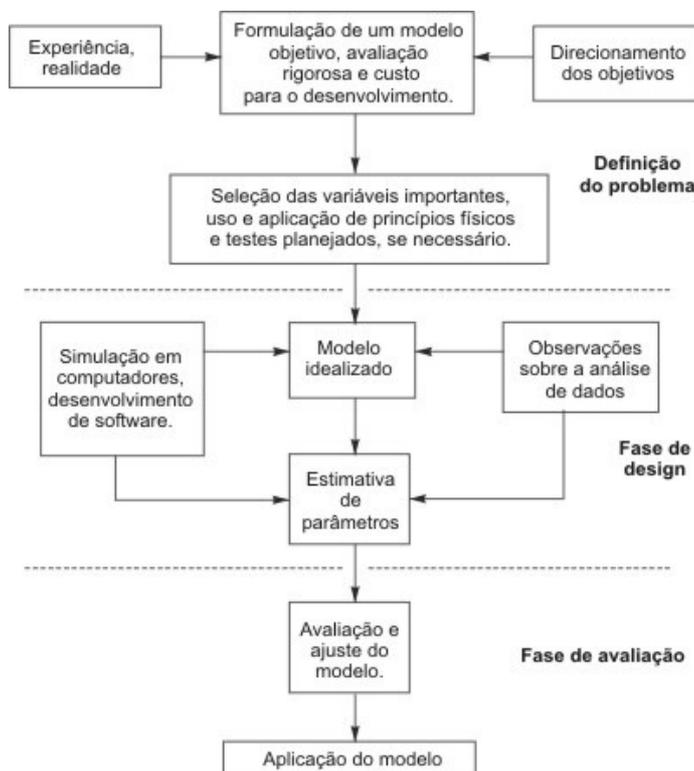
Rivera *et al.* (2009) combinaram o tratamento físico-químico convencional com uma técnica chamada sonoeletroquímica, o resultado da combinação de eletroquímica com a tecnologia do ultra-som para incrementar a eficiência do tratamento de efluentes têxteis. A descoloração obtida foi de 95% após 1 hora de tratamento. Um dos corantes utilizados para o estudo foi o *C.I. Reactive Black 5* (RB5), corante que também está sendo pesquisado neste projeto.

A utilização de fungos também têm sido pesquisada. O corante *C.I. Reactive Blue 19* (RB19), corante também pesquisado neste projeto, foi submetido a um tratamento com o fungo *Myrothecium* em condições de pH 7, à temperatura de 28°C, na concentração de 80 mg.L<sup>-1</sup> durante 10 dias por Zhang *et al.* (2007), onde os autores obtiveram um índice de descoloração de 90%.

### 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Segundo as Referências de Conteúdos da Engenharia de Produção da Associação Brasileira de Engenharia de Produção (ABEPRO), uma das subáreas de conhecimento tipicamente afetadas à Engenharia de Produção é a Engenharia da Sustentabilidade. Dentro desta subárea destacam-se o planejamento da utilização eficiente dos recursos naturais nos sistemas produtivos diversos, a destinação e tratamento dos resíduos e efluentes destes sistemas, bem como da implantação de sistema de gestão ambiental e responsabilidade social.

Esta dissertação teve como princípio um estudo visando a Gestão de Efluentes e Resíduos Industriais e para início baseou-se na construção de um modelo descrito por Edgar e Himmelblau (1989), cujos procedimentos estão demonstrados na Figura 06, a seguir.



**Figura 06.** Atividades comuns na elaboração de um modelo, do princípio a sua aplicação (EDGAR e HIMMELBLAU, 1989).

Naturalmente tem-se estes procedimentos no intelecto, contudo uma esquematização do mesmo leva a uma redução do tempo para obtê-lo, já que os passos são bem definidos e organizados.

Como definição do problema pode-se citar o descarte de efluentes com altas concentrações de matéria orgânica além do consumo elevado de recursos hídricos por parte do setor de beneficiamentos da indústria têxtil.

Na fase de desenvolvimento do estudo efetuaram-se vários experimentos, sendo os primeiros somente com corantes diluídos em água destilada. Em seguida, os corantes foram testados em efluentes sintetizados em escala piloto, oriundos de tingimentos em tonalidades escuras obtidas no Caderno de Tendências para o Inverno de 2009 (SENAI, 2008), tonalidades estas que foram a grande maioria dentre as demais na última coleção outono/inverno.

Finalmente, coletaram-se duas amostras de efluente industrial junto a uma tinturaria de médio porte situada na Grande São Paulo que, gentilmente, cedeu a utilização de suas dependências para a que fossem realizadas as coletas. A empresa utiliza corantes reativos do tipo Vinilsulfônico (VS) em 45% de seus tingimentos, do tipo Monoclorotriazina (MCT) em outros 15%, sendo lavagens e tingimento de branco o restante de sua produção.

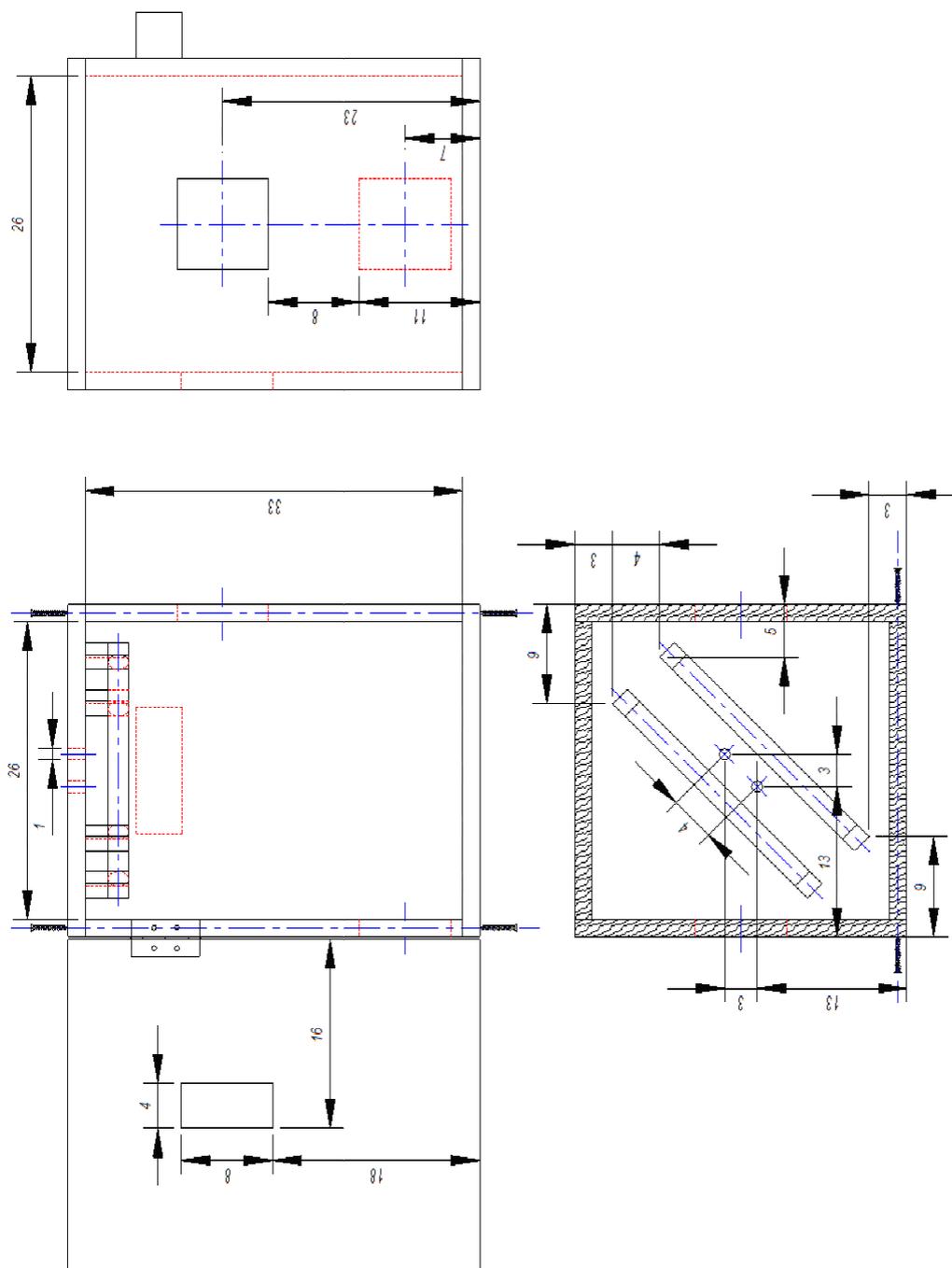
### **3.1 – Materiais**

Neste tópico estão descritos os equipamentos e reagentes utilizados na execução dos experimentos.

Equipamentos:

- Balança Analítica Gehaka AG 200;
- Reator com duas lâmpadas UV (253,7 nm) de 6W cada e agitador magnético, representado no desenho da Figura 07a e retratado com detalhes na foto da Figura 07b;
- Espectrofotômetro UV-VIS Datacolor SF-600 Plus;
- Turbostato Obermeier;
- HT Mathis ALT-1;

- Cubetas de acrílico com 1,0 cm de caminho ótico;
- pHmetro Quimis e;
- Tecido plano de algodão 100%, sarja 2/1, 260 g/m<sup>2</sup>.



**Figura 07a.** Desenho do reator fotoquímico (valores em mm).



**Figura 07b.** Foto do reator contendo Termômetro (1); Pipeta para coleta (2); Lâmpadas UV (3); Cooler (4) e Agitador magnético (5).

Reagentes:

- Solução tampão Acético/Acetato;
- *C.I. Reactive Violet 5 (RV5)*;
- *C.I. Reactive Black 5 (RB5)*;
- *C.I. Reactive Blue 19 (RB19)*;
- *C.I. Reactive Yellow 145 (RY145)*;
- *C.I. Reactive Red 239 (RR239)*;
- Preto Enxofre RDT;
- Preto Direto NF 1200%;
- Amarelo CL-2R;
- Vermelho CL-5B;

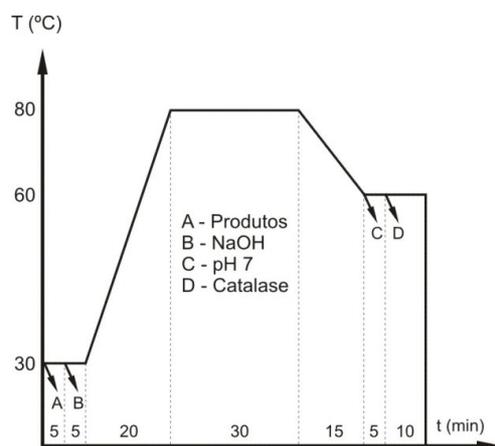
- Preto Reativo CL-WN;
- Cloreto de Sódio;
- Carbonato de Sódio;
- Metassilicato de Sódio;
- Dispersante à base de nitrobenzeno sulfonado;
- Tensoativo Não-iônico;
- Peróxido de Hidrogênio 35%;
- Enzima Catalase;
- Ácido Sulfúrico 98% e;
- Hidróxido de Sódio 50 °Bé;
- Umectante;
- Redutor a base de glicose e;
- Oxidante a base de Clorito de Sódio.

Não foi possível a descrição do número de C.I. de alguns corantes devido à política de sigilo do fabricante.

### **3.2 – Métodos**

Preparo dos efluentes em planta piloto

Com a finalidade de obter um efluente real de tingimento para posterior tratamento fotoquímico, realizou-se um processo completo de preparação em tecidos de algodão 100%, alvejados segundo procedimento descrito em GOMES MELO *et al.* (2009), cujo se encontra descrito no gráfico da Figura 08, e posterior tingimento efetuado conforme procedimento descrito a seguir, proposto pelo fabricante dos corantes e disposto no gráfico da Figura 09.



**Figura 08.** Processo de preparação do substrato.

Os tingimentos foram efetuados respeitando a quantidade de auxiliares descrita na Tabela 01 e o cálculo da quantidade de corantes a ser utilizada foi efetuado segundo a equação a seguir.

$$M_{\text{Corante}} = \frac{MS \times \%}{100} \quad (1)$$

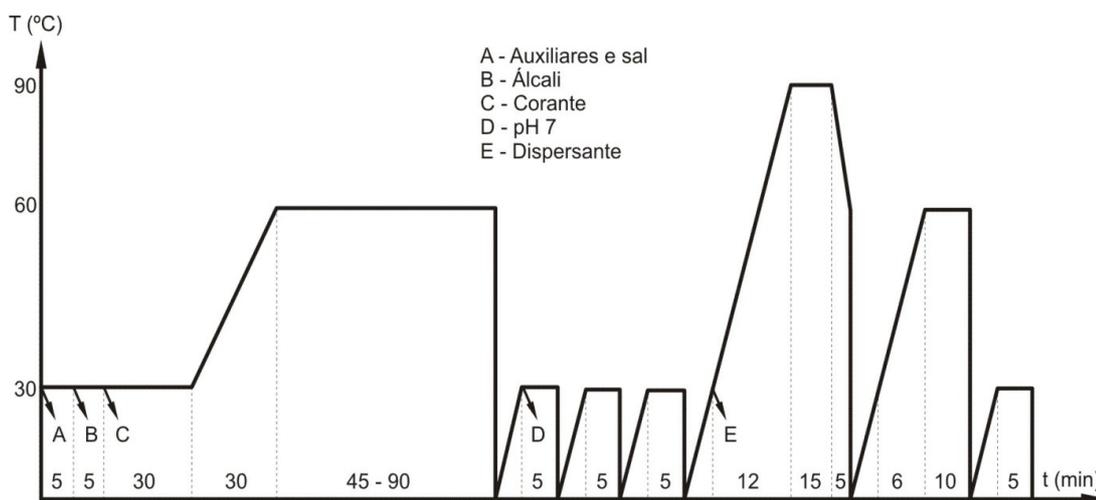
onde:  $M_{\text{Corante}}$  = massa de corante em g;

MS = massa do substrato em g;

% = porcentagem de corante em relação à massa do substrato.

**Tabela 01.** Tabela de auxiliares de tingimento. Fonte: Empresa Goldenquímica

Corante (%)	até 0,1	de 0,101 a 0,5	de 0,501 a 1,0	de 1,01 a 2,0	de 2,01 a 5,0	acima de 5,0
Eletrólito (g.L <sup>-1</sup> )	10	10 - 25	20 - 45	45 - 60	60 - 80	80
Carbonato de Sódio (g.L <sup>-1</sup> )	5,0	5,0	5,0	6,0	7,0	8,0
Hidróxido de Sódio 50°Bé (g.L <sup>-1</sup> )	-	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	0,5 - 1,0	1,0 - 2,0	2,0



**Figura 09.** Processo de tingimento.

#### Tratamento Fotoquímico e Análises dos Efluentes

Os efluentes gerados nos processos de preparação e tingimento foram coletados para, em seguida, serem tratados no reator a 296 K, com coletas de 10 cm<sup>3</sup> efetuadas em intervalos de 15 minutos e posterior análise espectrofotométrica UV/VIS.

Nas análises, foram utilizados os espectros de absorção na região do visível, em comprimento de onda de máxima absorção dos corantes, valores esses usados na determinação da porcentagem de eficiência na descoloração do efluente. A leitura dos dados foi efetuada no espectrofotômetro Datacolor SF-600 Plus, utilizando-se cubetas de acrílico de 1,0 cm de caminho ótico. A partir dos dados de absorvância (Abs) iniciais e finais, o alfa de conversão ( $\alpha$ ) foi calculado segundo a equação:

$$\alpha = \frac{(Abs_o - Abs_f)}{Abs_o} \quad (2)$$

Os valores de Porcentagem de Eficiência (% Eficiência) foram obtidos multiplicando-se o alfa de conversão por cem, conforme equação a seguir.

$$\% \text{ Eficiência} = \alpha \times 100 \quad (3)$$

### Coleta do efluente industrial

Depois de realizados os experimentos de fotodecomposição dos efluentes obtidos em escala piloto efetuaram-se duas coletas de efluente real junto a uma empresa de beneficiamentos têxteis, com capacidade de produção mensal igual a duzentas e vinte toneladas, seis dias por semana, em três turnos diários, sendo que sessenta por cento de sua produção consiste em processos de tingimento. Consome, em média, 26 litros de água por quilo de substrato tinto e utiliza Cloreto, Carbonato, Hidróxido e Sulfato de Sódio como auxiliares de tingimento; Peróxido de Hidrogênio, Tensoativos Aniônicos e Silicatos como auxiliares para preparação dos substratos.

As coletas foram necessárias para testar a eficiência do processo fotoquímico quando aplicado em efluente real e, para tal, aplicou-se um planejamento fatorial, variando-se três fatores – quantidade de peróxido de hidrogênio, diluição do efluente e pH – em dois níveis cada. Os dados relativos ao planejamento encontram-se dispostos na Tabela 02.

Esta metodologia de modelagem é amplamente empregada em pesquisas nas áreas de processos de separação, em reações de síntese e decomposição, na determinação da influência de fatores sobre as propriedades físicas ou químicas de materiais, em métodos analíticos, no desenvolvimento de novos materiais, etc., com intuito de obter uma resposta mais ampla e segura através da análise de dados coletados no campo, na indústria, no laboratório, enfim, nos diversos setores de pesquisa, sejam eles públicos ou privados. Assim, os pesquisadores conseguem avaliar a influência de diversos fatores sobre uma ou mais respostas, podendo a partir do modelo otimizado fazer melhoria nos diversos processos, com uma justificativa firme e sensata (BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 1995).

Em processos industriais ainda em fase de desenvolvimento, o normal é que seja feita a otimização destes, fazendo testes e ajustes em uma planta piloto. A partir desta, passa-se à produção propriamente dita, em escala ampliada. Contudo, surgem problemas devido à variação de escala. O efeito dos fatores como a agitação, transferência de massa, eficiência do equipamento, etc., varia com o tamanho do equipamento. Além destes, existem os problemas corriqueiros do dia-a-dia da indústria como falta de controle,

defeitos e troca de peças do equipamento e variação na matéria prima, dentre outros, o que leva a necessidade de ajustes finais no modelo (BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 1995 e 2001).

**Tabela 02.** Planejamento  $2^3$  para otimização do processo de fotodegradação do efluente real.

Ensaio	$x_1$	pH	$x_2$	$[H_2O_2]$	$x_3$	Fator de Diluição
1	-	7	-	$1,75 \times 10^{-1}$	-	0x
2	+	11	-	$1,75 \times 10^{-1}$	-	0x
3	-	7	+	$1,75 \times 10^{-2}$	-	0x
4	+	11	+	$1,75 \times 10^{-2}$	-	0x
5	-	7	-	$1,75 \times 10^{-1}$	+	10x
6	+	11	-	$1,75 \times 10^{-1}$	+	10x
7	-	7	+	$1,75 \times 10^{-2}$	+	10x
8	+	11	+	$1,75 \times 10^{-2}$	+	10x
9	0	9	0	$9,63 \times 10^{-2}$	0	5x
10	0	9	0	$9,63 \times 10^{-2}$	0	5x
11	0	9	0	$9,63 \times 10^{-2}$	0	5x

Na Tabela 03 encontram-se os dados relativos às coletas efetuadas junto à tinturaria industrial. No ato das coletas foram anotados dia, hora, temperatura, pH e aspecto relativo a cor.

**Tabela 03.** Dados sobre a coleta das amostras de efluente.

Coleta	Dia	Hora	pH	°C	Coloração
1	26/3/2010	15:32	11	30	Castanho
2	27/4/2010	13:50	9	42	Vermelho

## 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

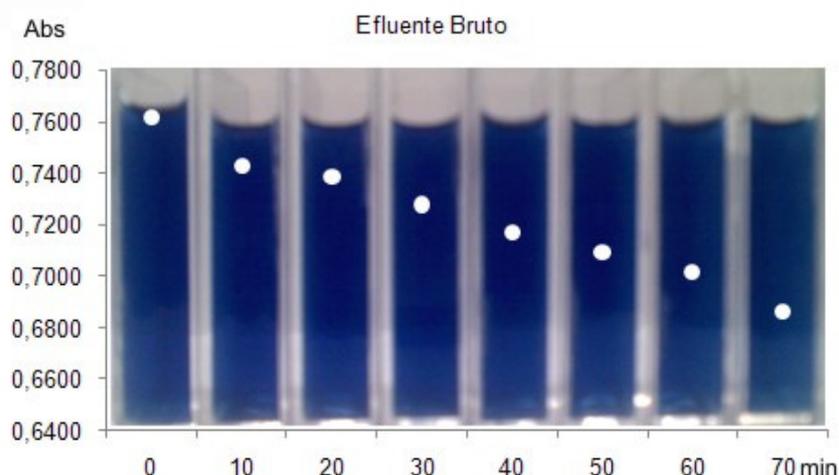
### 4.1 – Estudos Preliminares

Nesta seção serão expostos os experimentos efetuados preliminarmente, com efluentes sintéticos e também com corante diluído em água deionizada.

#### 4.1.1 – C.I.RB19 - Reativo do tipo VS de Grupo Cromóforo Antraquinônico

O objetivo deste estudo foi verificar a influência do pH na fotodegradação de grupos cromóforos antraquinônicos em corantes reativos do tipo VS contidos em efluentes têxteis, nas faixas de pH 7, 9 e 11, sob irradiação de ondas ultravioleta em presença de  $2,0 \text{ mL.L}^{-1}$  de Peróxido de Hidrogênio 50% ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). Os efluentes foram diluídos em dez vezes para posterior submissão ao tratamento, onde foi constatada a redução da coloração em 90,70% para pH 7, 93,04% para pH 9 e 92,11% para pH 11, níveis de absorvância bem próximos ao da água de reuso utilizada na Escola SENAI “Francisco Matarazzo”, podendo o efluente ser reutilizado em 95% dos processos de beneficiamentos têxteis.

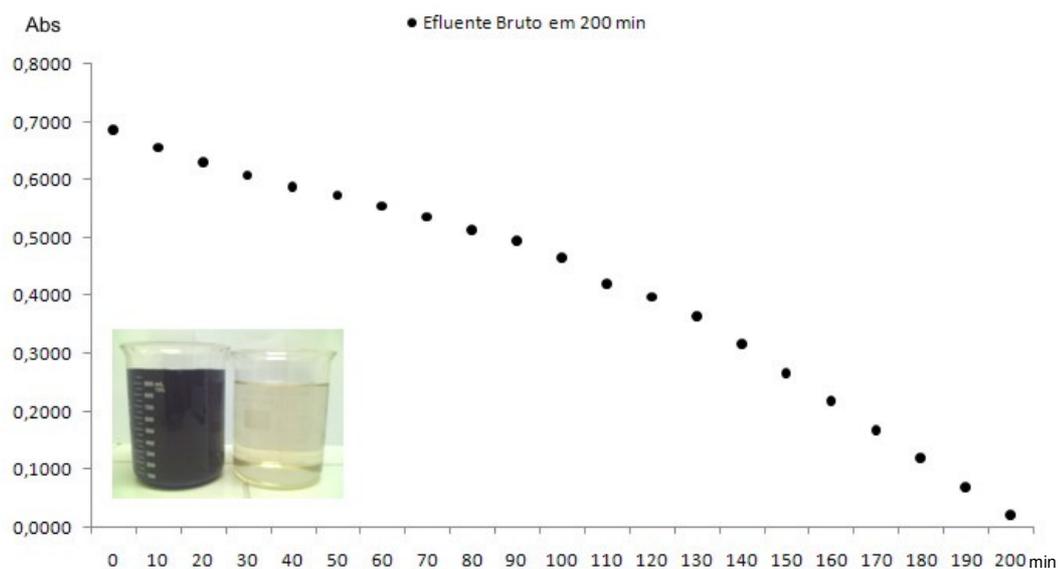
Durante o ensaio inicial na faixa de pH 7,0 percebeu-se uma grande resistência na decomposição fotoquímica do corante. A conversão ficou em apenas 10%, com o efluente praticamente sem descoloração, conforme gráfico ilustrado na Figura 10.



**Figura 10.** Resultado da fotodecomposição do efluente bruto em 70 min

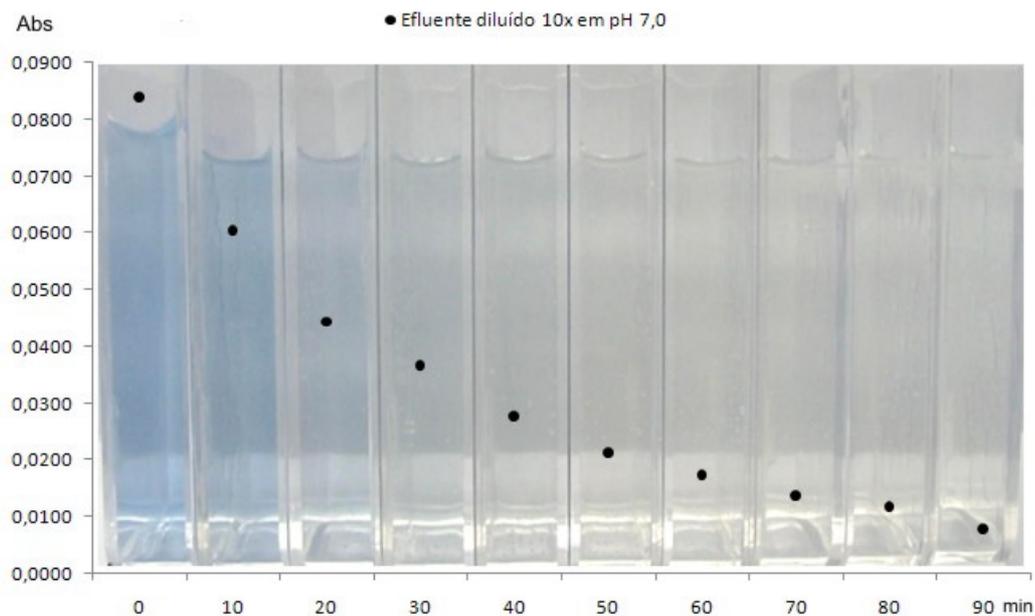
A partir desse resultado, tinham-se duas opções. Tratar os efluentes por mais tempo ou seguir por uma linha de raciocínio adotada por TEIXEIRA *et al.* (2008), onde o efluente estudado pelos autores foi diluído em 30 vezes.

Optou-se então por adotar os dois métodos, porém, com diluição somente em 10 vezes. O efluente sem diluição foi tratado na faixa de pH 7,0 pelo fato da maioria dos processos têxteis serem efetuados nessa faixa. O efluente diluído, em 10 vezes, também foi tratado em pH 7,0 durante 90 min. Ambos os ensaios apresentaram resultados satisfatórios, respectivamente, nos gráficos das Figuras 11 e 12, a seguir.



**Figura 11.** Gráfico de fotodecomposição do efluente bruto em 200 min, sob pH 7.

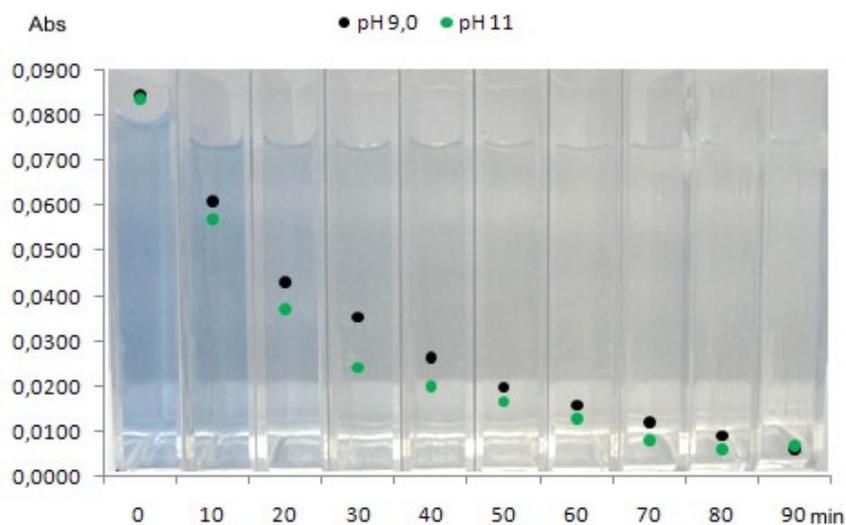
A conversão apresentada nesse ensaio foi de 0,96 o que representa uma eficiência de 96%, com exposição do efluente bruto em pH 7 durante 200 min.



**Figura 12.** Gráfico de fotodecomposição do efluente diluído 10 vezes, em 90 min e pH 7.

A conversão apresentada nesse ensaio foi de 0,91 o que representa uma eficiência de 91% com exposição do efluente diluído em 10 vezes, sob pH 7 durante 90 min.

Baseado nos resultados obtidos, foram efetuados os ensaios com pH 9 e 11 tratados durante 90 min, ambos diluídos em 10 vezes. Assim como no ensaio efetuado em pH 7 os resultados obtidos nesses dois últimos ensaios foram satisfatórios, com eficiência de 93% para pH 9 e 92% para pH 11. Na Figura 13, gráfico de fotodecomposição com dados relativos aos dois ensaios.



**Figura 13.** Gráfico de fotodecomposição do efluente diluído 10 vezes, em 90 min, pH 9,0 e 11,0.

As conversões e as porcentagens de eficiência de todos os ensaios efetuados estão dispostos na Tabela 04 a seguir.

**Tabela 04.** Dados da conversão obtida nos ensaios.

DADOS	pH 7 - 90 min Efluente Bruto	pH 7 - 200 min Efluente Bruto	pH 7 - 90 min Diluído 10 vezes	pH 9 - 90 min Diluído 10 vezes	pH11 - 90 min Diluído 10 vezes
Abs <sub>o</sub>	0,7615	0,6868	0,0839	0,0848	0,0837
Abs <sub>t</sub>	0,6868	0,0219	0,0078	0,0059	0,0066
$\alpha$	0,10	0,97	0,91	0,93	0,92
% Eficiência	9,81	96,81	90,70	93,04	92,11

#### 4.1.2. C.I.RV5 - Reativo do tipo VS de Grupo Cromóforo Azo

Neste estudo foi verificado o comportamento da cinética de fotodegradação do corante C.I. *Reactive Violet 5* (RV5), de grupo cromóforo Azo e grupo reativo do tipo VS, quando em solução feita com água deionizada e presente em efluente têxtil, através de processo de oxidação avançada via UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. O efluente sintético foi obtido através de processo de alvejamento e posterior tingimento. Através da diferença nas leituras de absorvância do banho inicial e final, estimou-se uma concentração para preparo da solução de mesma concentração em água deionizada. Alíquotas de 1,0 L das amostras de água e efluente foram tratadas em um reator a 296 K, com 2,0 mL.L<sup>-1</sup> de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 50%, pH 7,0 e em presença de radiação ultravioleta até conversão máxima admissível. Apesar das conversões de 99% para o corante em água deionizada contra 97% para o efluente, ambas com total descoloração, a solução do corante em água deionizada levou apenas 60 min com constante de velocidade cinética  $k = 5,65 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$  contra 170 min do corante contido em efluente, com constante de velocidade cinética  $k = 1,84 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ .

Realizou-se uma modelagem cinética para determinação da ordem das reações de fotodegradação e uma comparação do comportamento da fotodegradação do corante quando dissolvido em água deionizada *versus* o mesmo contido em efluente real.

#### Modelos Cinéticos

Os símbolos utilizados nos modelos foram [RV5] para concentração de RV5, sendo [RV5]<sub>o</sub> para a concentração inicial, [RV5]<sub>f</sub> para a concentração final, [RV5]<sub>Calc</sub> para a concentração inicial calculada a partir das equações, [RV5]<sub>Real</sub> para a concentração inicial real, em mol.L<sup>-1</sup>, e  $\alpha_{[RV5]}$  para a conversões obtidas no reator.

Para verificação da ordem de reação foram utilizadas as equações descritas a seguir.

a) Ordem 0

$$\frac{d[\text{RV5}]}{dt} = -k \quad \text{onde } k = \text{min}^{-1} \cdot \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

Integrando

$$\int_{[\text{RV5}]_o}^{[\text{RV5}]_f} d[\text{RV5}] = -kt \int_{t_o}^t dt \Rightarrow [\text{RV5}] = [\text{RV5}]_o - kt \quad (4)$$

b) Ordem 1

$$\frac{d[\text{RV5}]}{dt} = -k[\text{RV5}] \quad \text{onde } k = \text{min}^{-1}$$

Integrando

$$\int_{[\text{RV5}]_o}^{[\text{RV5}]_f} \frac{d[\text{RV5}]}{[\text{RV5}]} = -kdt \Rightarrow \ln[\text{RV5}] = \ln[\text{RV5}]_o - kt \Rightarrow [\text{RV5}] = [\text{RV5}]_o \cdot e^{-kt} \quad (5)$$

c) Ordem 2

$$\frac{d[\text{RV5}]}{dt} = -k[\text{RV5}]^2 \quad \text{onde } k = \text{min}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}$$

Integrando

$$\int_{[\text{RV5}]_o}^{[\text{RV5}]_f} \frac{d[\text{RV5}]}{[\text{RV5}]^2} = -k \int_{t_o}^t dt \Rightarrow \frac{1}{[\text{RV5}]} = \frac{1}{[\text{RV5}]_o} - kt \quad (6)$$

Para as conversões obtidas para efluente e corante diluído em água:

$$\alpha = \frac{[\text{RV5}]_o - [\text{RV5}]_f}{[\text{RV5}]_o} \quad (7)$$

Para cálculo do erro experimental:

$$\epsilon_{[\text{RV5}]_o} = \left| \frac{[\text{RV5}]_{\text{Calc}} - [\text{RV5}]_{\text{Real}}}{[\text{RV5}]_{\text{Real}}} \right| \quad (8)$$

## Cinética das Reações de Fotocatálise

## Corante em água deionizada

Ao aplicar-se o método dos mínimos quadrados, correlacionando a matriz da concentração de corante em função do tempo obteve-se o maior valor de  $R^2$  na correlação entre tempo (t) e ln da concentração (ln [RV5]), o que indica uma reação de primeira ordem.

**Tabela 05.** Resultado da matriz de correlação concentração x tempo para o corante diluído em água.

t (min)	[RV5] (mol.L <sup>-1</sup> )	ln [RV5]	1/[RV5]
0	1,92 X 10 <sup>-4</sup>	-8,5569	5,20 x 10 <sup>3</sup>
10	1,10 x 10 <sup>-4</sup>	-9,1110	9,05 x 10 <sup>3</sup>
20	5,93 x 10 <sup>-5</sup>	-9,7332	1,69 x 10 <sup>3</sup>
30	3,42 x 10 <sup>-5</sup>	-10,2832	2,92 x 10 <sup>4</sup>
40	1,98 x 10 <sup>-5</sup>	-10,8316	5,06 x 10 <sup>4</sup>
50	8,13 x 10 <sup>-6</sup>	-11,7204	1,23 x 10 <sup>5</sup>
60	8,06 x 10 <sup>-6</sup>	-11,7282	1,24 x 10 <sup>5</sup>
R <sup>2</sup>	0,82	0,98	0,85

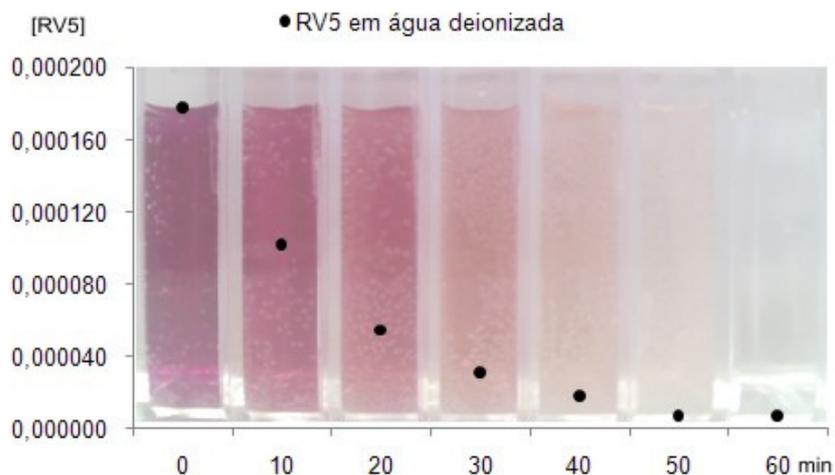
De posse dos dados e através dos cálculos efetuados a partir das equações, pôde-se comprovar a reação como sendo de ordem 1, conforme Tabela 06 a seguir.

**Tabela 06.** Resultados dos cálculos da cinética referente ao corante diluído em água.

Ordem	[RV5] <sub>Calc</sub>	$\epsilon$	k	R <sup>2</sup>
0	1,00 x 10 <sup>-4</sup>	0,438	3,00 x 10 <sup>-6</sup>	0,82
1	1,73 x 10 <sup>-4</sup>	0,028	5,65 x 10 <sup>-2</sup>	0,98
2	6,13 x 10 <sup>-5</sup>	0,655	-2,38 x 10 <sup>3</sup>	0,85

Na Figura 14, o gráfico da cinética de degradação fotoquímica do corante diluído em água. A velocidade média ficou em  $2,84 \times 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}.\text{min}^{-1}$  para uma conversão de  $\alpha_{[RV5]} = 0,99$ .

A equação da reação foi de  $[RV5] = 0,0003e^{-0,565.t}$ , com  $R^2 = 0,98$ .



**Figura 14.** Gráfico da decomposição fotoquímica do corante diluído em água.

#### Corante no efluente

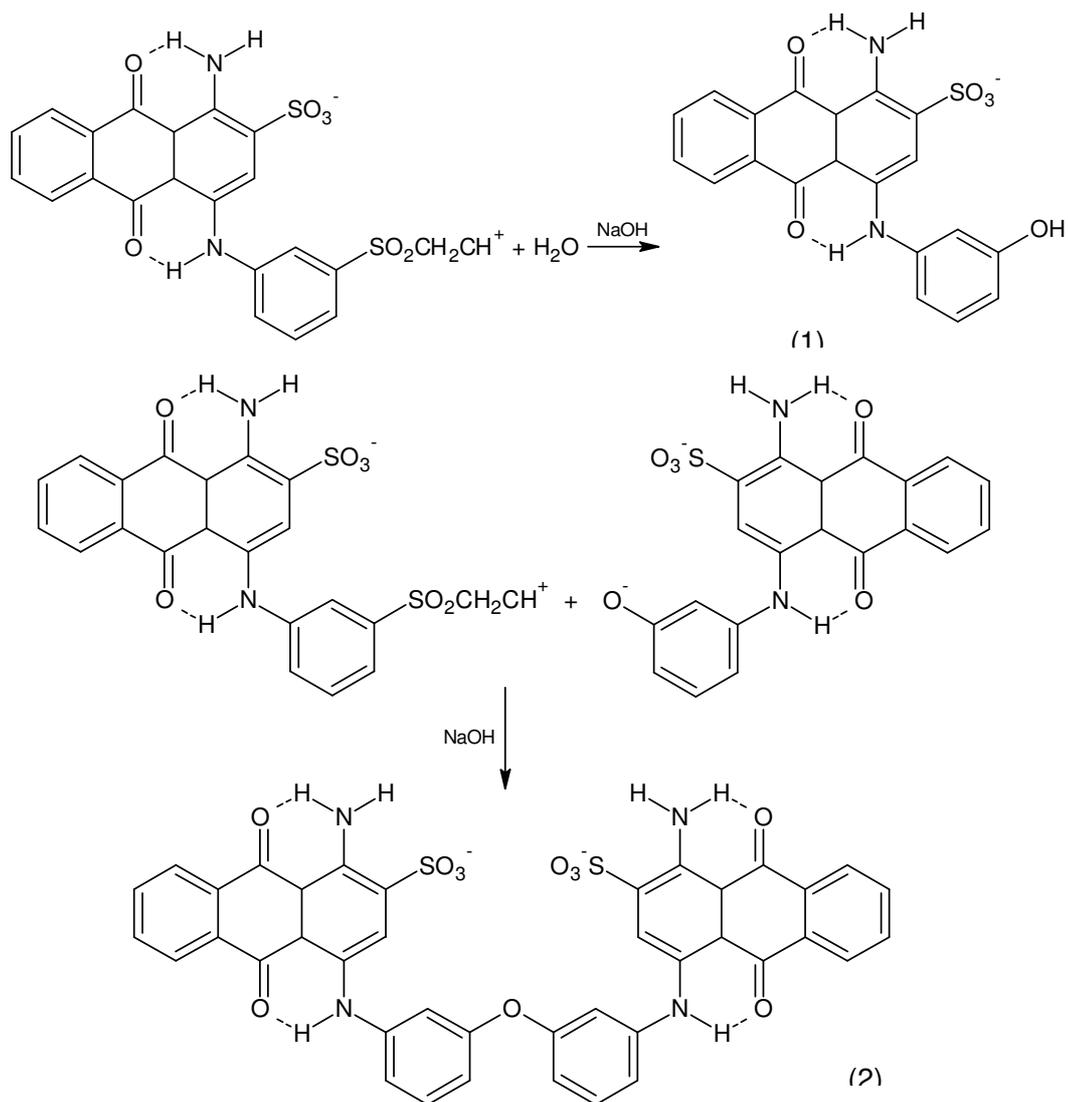
O mesmo método foi aplicado para correlacionar a matriz da concentração de corante no efluente em função do tempo, com  $R^2$  apontando também para uma reação de primeira ordem, conforme dados dispostos na Tabela 07.

Temos que levar em consideração que, além do corante, o efluente contém outros compostos tais como dispersantes, cloreto de sódio, carbonato de sódio, tensoativos, enzimas, silicato de sódio e hidróxido de sódio, além de subprodutos de reações de neutralização, como sulfato e acetato de sódio, que podem interferir na ação dos radicais livres e na fotodegradação da coloração.

**Tabela 07.** Matriz de correlação concentração x tempo para o corante contido em efluente.

t (min)	[RV5] (mol.L <sup>-1</sup> )	ln [RV5]	1/[RV5]
0	0,000178	-8,6340	5620,00
10	0,000147	-8,8232	6790,00
20	0,000123	-9,0070	8160,00
30	0,000099	-9,2166	10100,00
40	0,000081	-9,4261	12400,00
50	0,000066	-9,6226	15100,00
60	0,000053	-9,8372	18700,00
70	0,000043	-10,0510	23200,00
80	0,000034	-10,2944	29600,00
90	0,000026	-10,5643	38700,00
100	0,000021	-10,7824	48200,00
110	0,000017	-10,9767	58500,00
120	0,000015	-11,1414	69000,00
130	0,000013	-11,2387	76000,00
140	0,000012	-11,3416	84300,00
150	0,000011	-11,4047	89700,00
160	0,000010	-11,4733	96100,00
170	0,000010	-11,5334	102000,00
R <sup>2</sup>	0,82	0,98	0,95

É importante frisar que a maior quantidade de corante presente no efluente não é do corante em sua forma original, por causa da reação do corante com a água. SHORE (2002) descreve que essa reação forma compostos etílicos ou etéreos, sendo estes últimos em maior quantidade em cerca de 10% da massa inicial, propondo a formação desses dois possíveis compostos demonstrados na Figura 15.



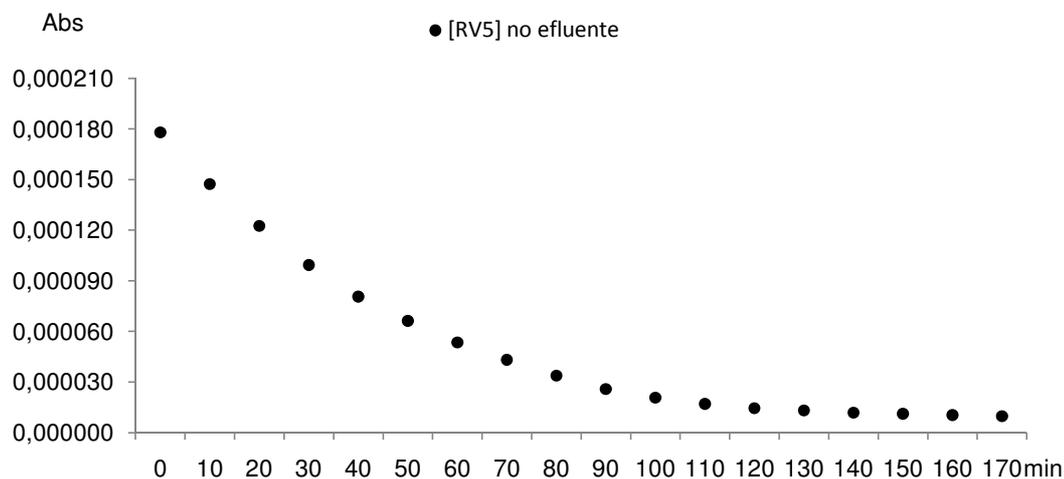
**Figura 15.** Representação do álcool (1) e do éter (2) oriundos da reação corante-água

Os cálculos efetuados através das equações apontaram também para uma reação de ordem 1. Os dados estão dispostos na Tabela 08.

**Tabela 08.** Resultados dos cálculos da cinética referente ao corante contido em efluente.

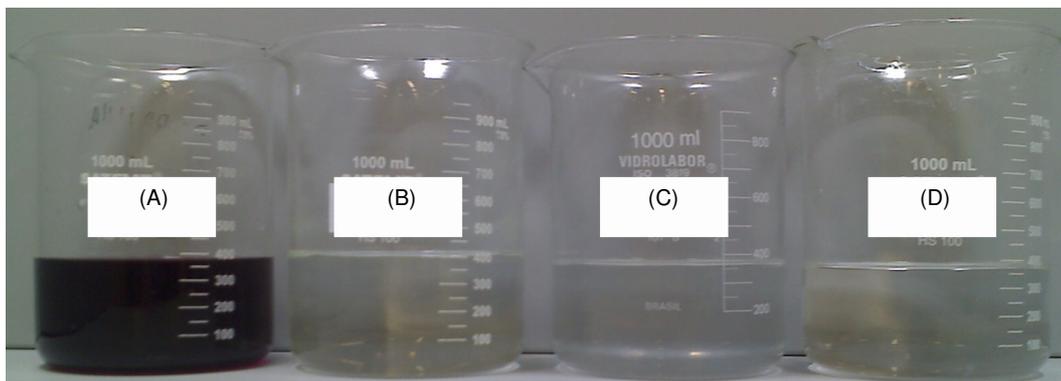
Ordem	$[RV5]_{Calc}$	$\epsilon$	$k$	$R^2$
0	$1,00 \times 10^{-4}$	0,438	$9,00 \times 10^{-6}$	0,81
1	$1,73 \times 10^{-4}$	0,028	$1,84 \times 10^{-2}$	0,98
2	$6,13 \times 10^{-5}$	0,655	$6,28 \times 10^2$	0,95

Apesar de total descoloração obtida, com  $\alpha_{[RV5]} = 0,97$  muito próximo do valor obtido no corante diluído em água e da velocidade média de reação igual a  $9,89 \times 10^{-7} \text{ mol.L}^{-1}.\text{min}^{-1}$ , o tempo de permanência no reator foi bem maior, com equação de cinética igual a  $1,62 \times 10^{-4} e^{-0,0184.t}$ . Isto pode ser observado através da Figura 16 a seguir.



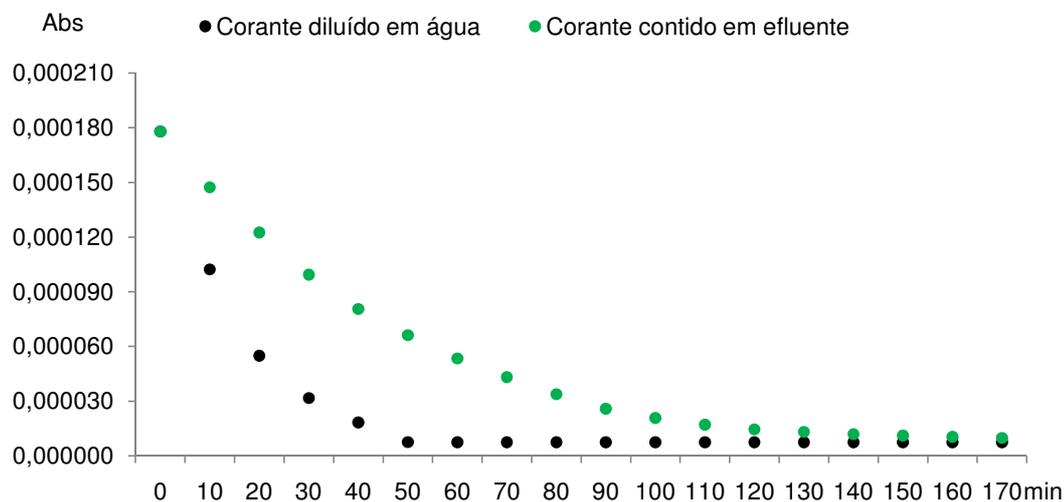
**Figura 16.** Gráfico da decomposição fotoquímica do corante contido em efluente

Na Figura 17, foto do efluente antes do tratamento, do corante diluído em água após tratamento, do efluente após tratamento e da água de abastecimento da Escola SENAI “Francisco Matarazzo”.



**Figura 17.** Efluente (A), corante diluído em água após tratamento (B), efluente após tratamento (C) e água de reabastecimento (D).

A Figura 18 contém as duas curvas da cinética de decomposição, juntamente com os respectivos valores de conversão. Apesar de valores muito próximos, o tempo de residência do efluente no reator foi bem maior. Na Tabela 09, valores de conversão, porcentagem de eficiência, velocidade média e equação da cinética dos dois ensaios.



**Figura 18.** Comparação entre os dois experimentos.

**Tabela 09.** Tabela com os valores relativos aos dois experimentos.

DADOS	$\alpha$	% Eficiência	$k$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$t$ (min)
Corante em água	0,99	99	$5,65 \times 10^{-2}$	60
Corante no efluente	0,97	97	$1,84 \times 10^{-2}$	170

#### 4.1.3. C.I.RB5 - Reativo do tipo Bis-VS de Grupo Cromóforo Azo

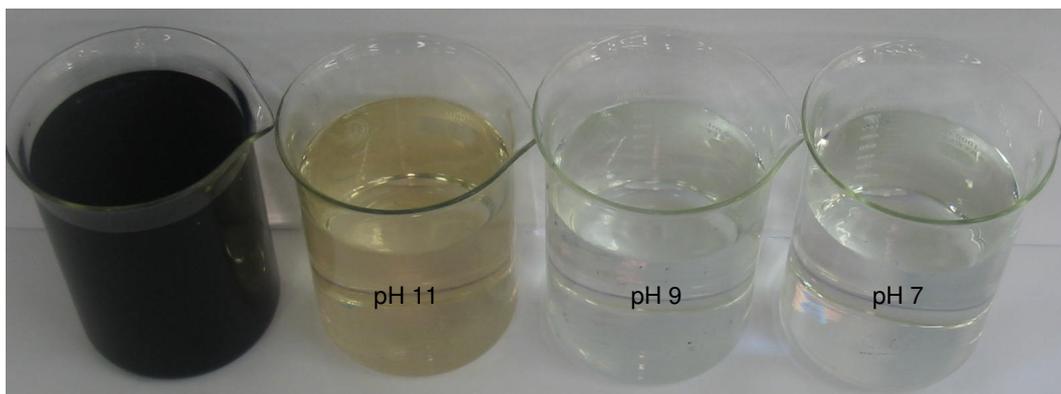
Este estudo foi realizado com o intuito de verificar a possibilidade de reutilização de efluente oriundo de um tingimento efetuado com o corante C.I. *Reactive Black 5*. O efluente pós-tingimento foi tratado em um reator a 296 K, com  $1,0 \text{ mL.L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{O}_2$  50%, nas faixas de pH 7, 9 e 11, em presença de radiação UV, somente com radiação UV e também somente com mesma quantidade de  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Após o tratamento, somente os três primeiros efluentes foram utilizados para tingimento da cor TP 181346, em comparação com tingimento efetuado com água de reabastecimento. Os resultados indicaram que o efluente pode ser reutilizável.

Com base nos dados obtidos pelas medições fotométricas das amostras para os três sistemas analisados em pH 7, 9 e 11, chegou-se aos resultados de conversão do processo de tratamento fotoquímico do efluente. Experimentos efetuados somente em presença de radiação UV ou  $\text{H}_2\text{O}_2$  não surtiram efeito significativo sobre as alíquotas. A Tabela 10 apresenta todos os resultados obtidos.

**Tabela 10.** Resultados dos tratamentos fotoquímicos nas três faixas de pH.

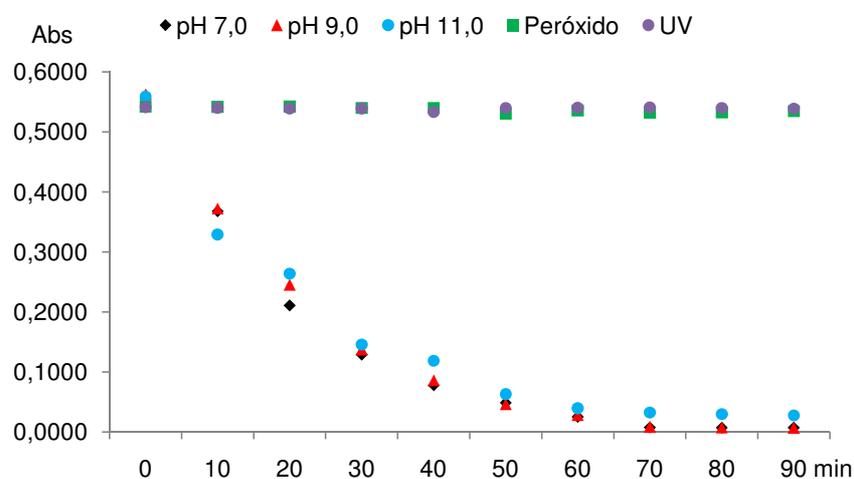
Dados	pH 7	pH 9	pH 11	UV	$\text{H}_2\text{O}_2$
Abs <sub>o</sub>	0,5544	0,5625	0,5588	0,5412	0,5419
Abs <sub>f</sub>	0,0071	0,0072	0,0278	0,5389	0,5347
$\alpha$	0,99	0,99	0,95	0,0043	0,0135
% Eficiência	98,72	98,72	95,03	0,43	1,35

Pelos resultados obtidos na conversão do processo de fotodegradação do corante na faixa de absorvância máxima em 580 nm, não se nota efeito do pH sobre os valores de eficiência. Como o objetivo do ensaio foi o de obter água de reuso para utilização em novos processos e aliado ao fato do pH 7 ser utilizado como pH inicial em todos os processos de beneficiamentos, fica comprovado que o melhor tratamento foi obtido na faixa de pH 7. Na Figura 19, este fato é visto quando os três efluentes tratados são comparados com o efluente bruto.



**Figura 19.** Efluente bruto x efluentes tratados.

Na Figura 20, o gráfico de decomposição fotoquímica comparativo nas faixas de pH 7, 9 e 11, somente UV e somente Peróxido.



**Figura 20.** Fotodecomposição em pH 7, 9 e 11.

### Reuso da Água

A cor TP 181346, do “Caderno Inspirações e Tendências para Design de Moda” (SENAI, 2008), foi selecionada para ser desenvolvida em quatro tingimentos. Em um deles foi utilizado água de reabastecimento e, nos outros três, os efluentes tratados. O processo de preparação do substrato está descrito em Gomes Melo *et al.* (2009) e o de tingimento em Rosa (2008). Os desvios foram obtidos através da Equação de Adams-Nickerson (09) descrita em Lozano (1978).

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (09)$$

Onde:

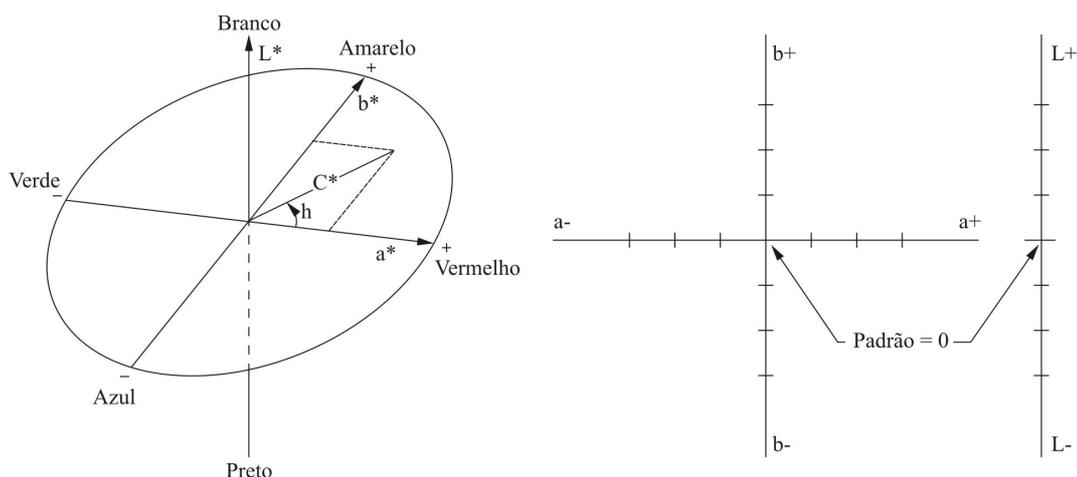
$\Delta E$  = desvio total da cor;

$\Delta L$  = desvio no eixo "L";

$\Delta a$  = desvio no eixo "a" e;

$\Delta b$  = desvio no eixo "b".

Os eixos "L", "a" e "b" fazem parte do Sistema CIELab, definidos pela *International Commission of Illumination* (CIE) como sendo o eixo "L" para a Luminosidade, o eixo "a" para variações de tonalidade entre o Verde e o Vermelho, e o eixo "b", para variações de tonalidade entre o Amarelo e o Azul. O gráfico CIELab está demonstrado na Figura 21, em 3D (todos os eixos juntos) e também em 2D (separados os eixos "L" e "a/b").



**Figura 21.** Sistema CIELab (Traduzido e adaptado pelo autor do original de ZOLLINGER, 1991)

Os resultados para os desvios dos tingimentos efetuados com as amostras de efluentes tratado estão descritos abaixo. Quanto mais próximos de zero estiverem os valores (Padrão = 0), menor a diferença de cor entre eles e o padrão que, neste caso, é o tingimento realizado com água.

Desvios:  $DE_{pH\ 7} = 0,16$ ;  $DE_{pH\ 9} = 0,51$  e  $DE_{pH\ 11} = 0,68$

## 4.2 – Efluente Real

Após a realização dos ensaios definidos no planejamento fatorial os resultados foram analisados para plotagem e análise de suas superfícies de respostas e para Análise de Variância dos Modelos (ANOVA).

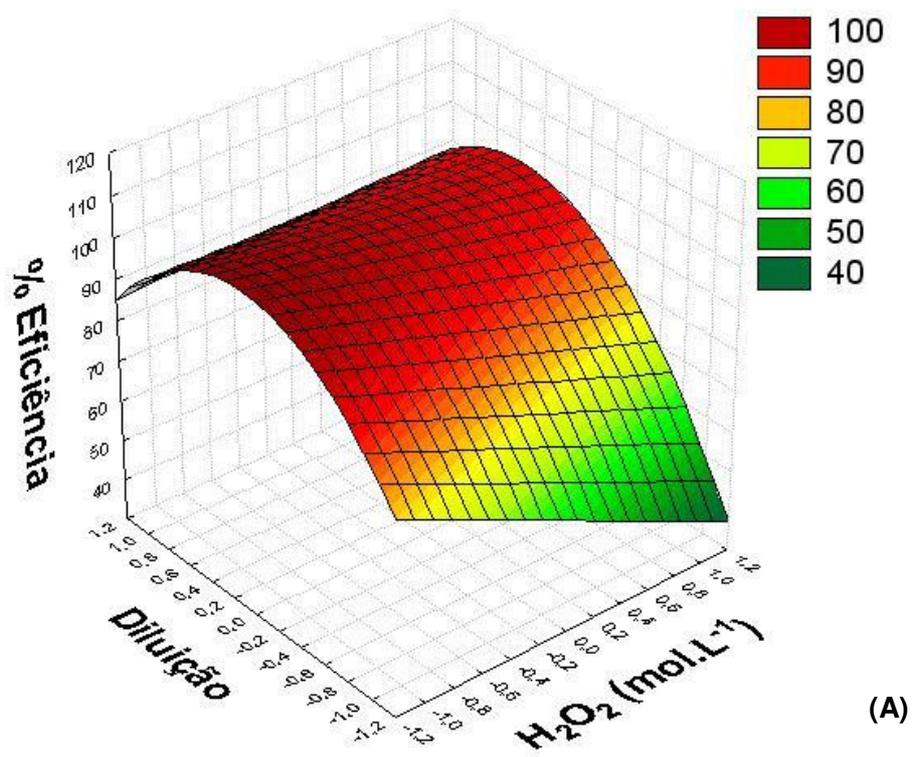
Nas Tabelas 11 e 12, os dados relativos às análises dos dois efluentes. Nas Figuras 22, 23 e 24, as superfícies de respostas dispostas de forma comparativa entre a primeira e a segunda coleta. Na Tabela 13, as conversões obtidas a partir dos ensaios das duas coletas.

**Tabela 11.** Análise de variância do modelo para o efluente castanho.

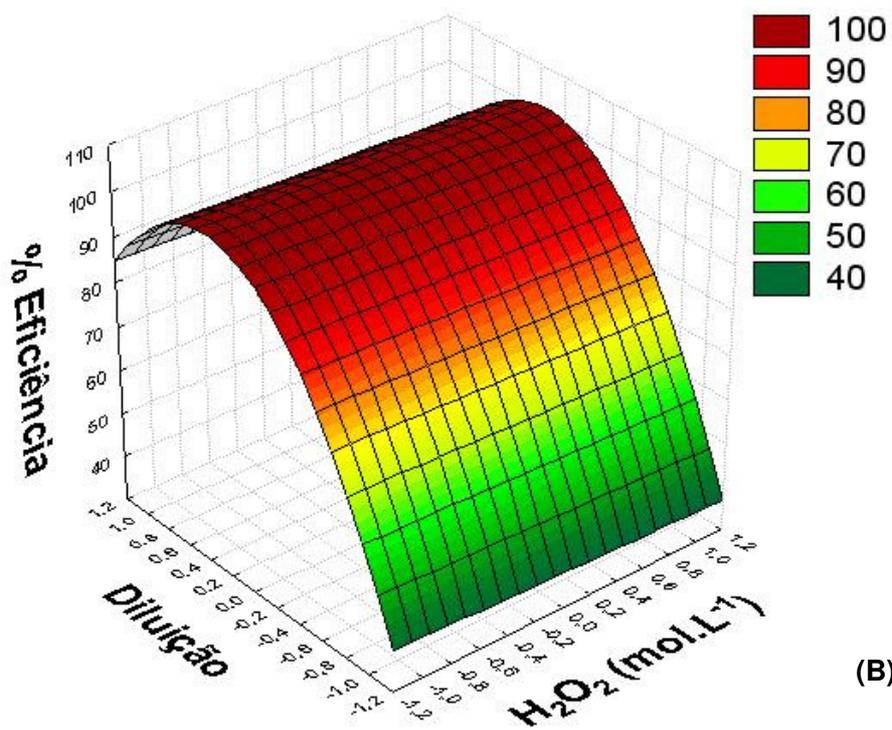
Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Teste F
Regressão	3312	5	662,4	
Resíduos	372,375	5	74,475	8,894
Falta de Ajuste	-290,025	3	-96,675	
Erro Puro	662,4	2	331,2	-0,292
Total	3312	10		
% de variância explicada =		100		
% de máxima variância explicável =		80		

**Tabela 12.** Análise de variância do modelo para o efluente vermelho.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Teste F
Regressão	6514,182	5	1302,836	
Resíduos	918	5	183,6	7,096
Falta de Ajuste	-384,836	3	-128,279	
Erro Puro	1302,836	2	651,418	-0,197
Total	6514,182	10		
% de variância explicada =		100		
% de máxima variância explicável =		80		

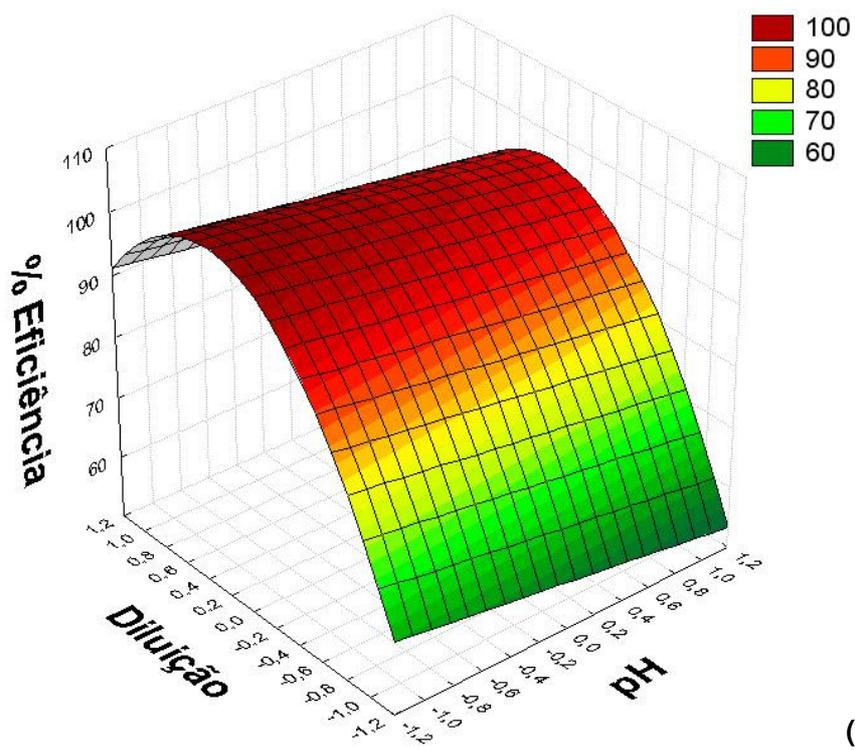


(A)

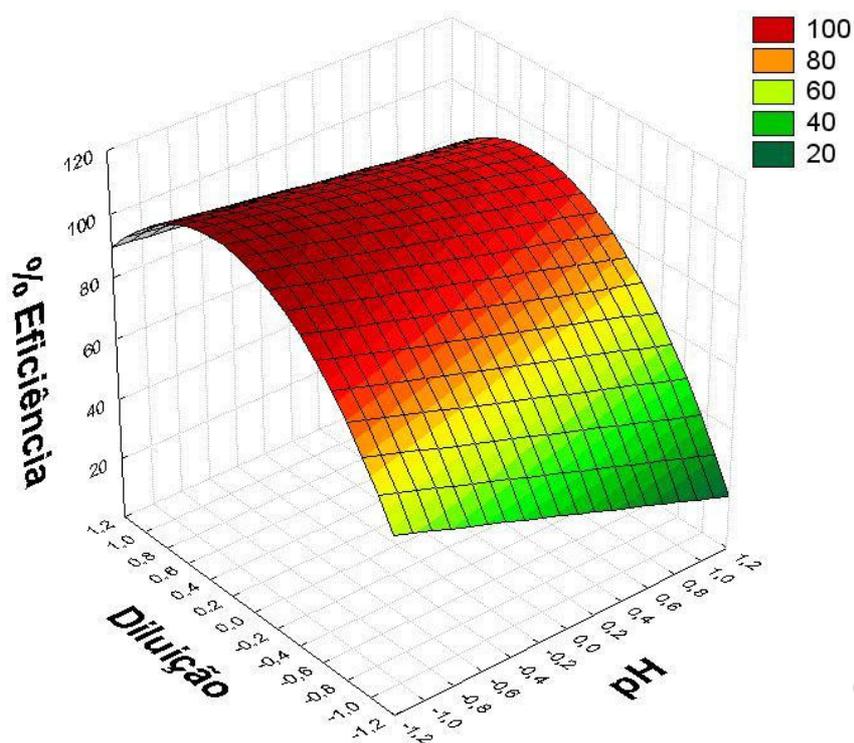


(B)

Figura 22. Diluição e  $[H_2O_2]$ , (A) Efluente Castanho e (B) Efluente Vermelho.



(A)



(B)

Figura 23. Diluição e pH, (A) Efluente Castancho e (B) Efluente Vermelho.

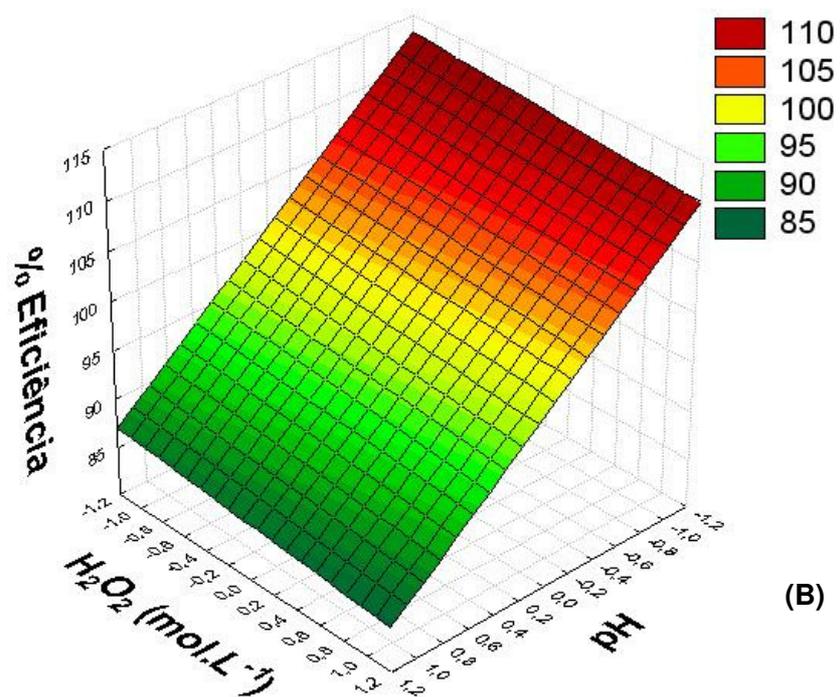
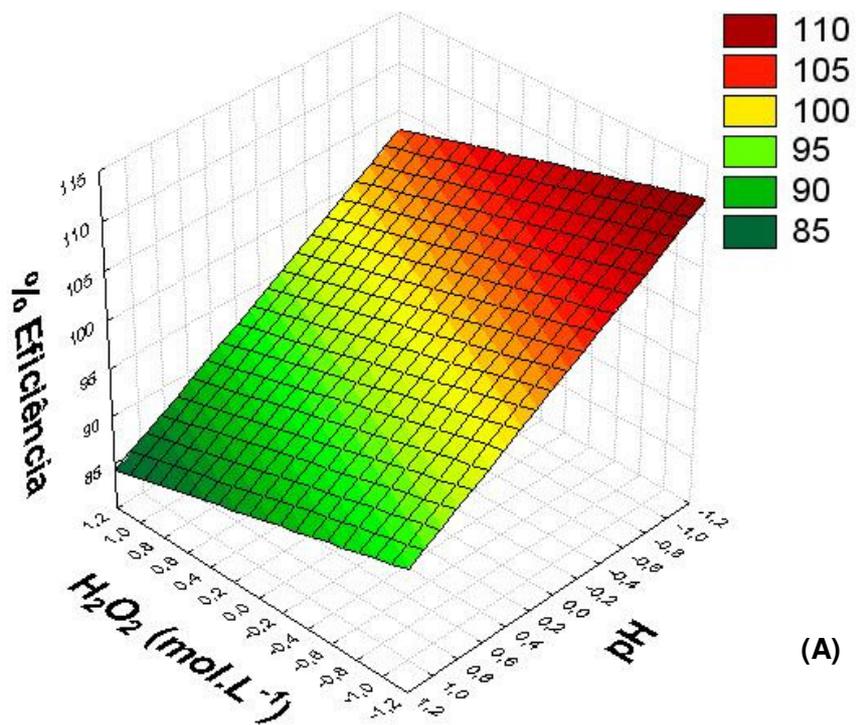


Figura 24.  $[\text{H}_2\text{O}_2]$  e pH, (A) Efluente Castanho e (B) Efluente Vermelho.

**Tabela 13.** Conversões obtidas no planejamento fatorial dos dois efluentes.

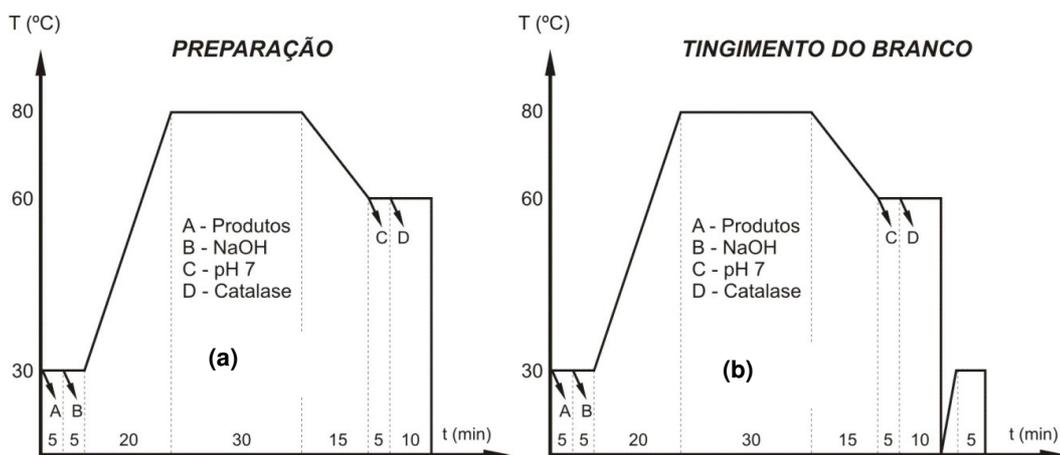
Ensaio	pH	Conc. H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Diluição	$\alpha_{Cast.}$	% Efic.-Cast.	$\alpha_{Verm.}$	% Efic.-Verm.
1	7	$1,75 \times 10^{-2}$	0x	0,98	98,00	0,86	86,00
2	11	$1,75 \times 10^{-1}$	0x	0,69	69,00	0,4	40,00
3	7	$1,75 \times 10^{-2}$	0x	0,49	49,00	0,53	53,00
4	11	$1,75 \times 10^{-1}$	0x	0,56	56,00	0,35	35,00
5	7	$1,75 \times 10^{-2}$	10x	0,92	92,00	0,96	96,00
6	11	$1,75 \times 10^{-1}$	10x	0,93	93,00	0,72	72,00
7	7	$1,75 \times 10^{-2}$	10x	0,96	96,00	0,99	99,00
8	11	$1,75 \times 10^{-1}$	10x	0,88	88,00	0,99	99,00
9	9	$9,63 \times 10^{-2}$	5x	0,98	98,00	0,99	99,00
10	9	$9,63 \times 10^{-2}$	5x	0,98	98,00	0,99	99,00
11	9	$9,63 \times 10^{-2}$	5x	0,98	98,00	0,99	99,00

### 4.3 – Aplicação do processo otimizado

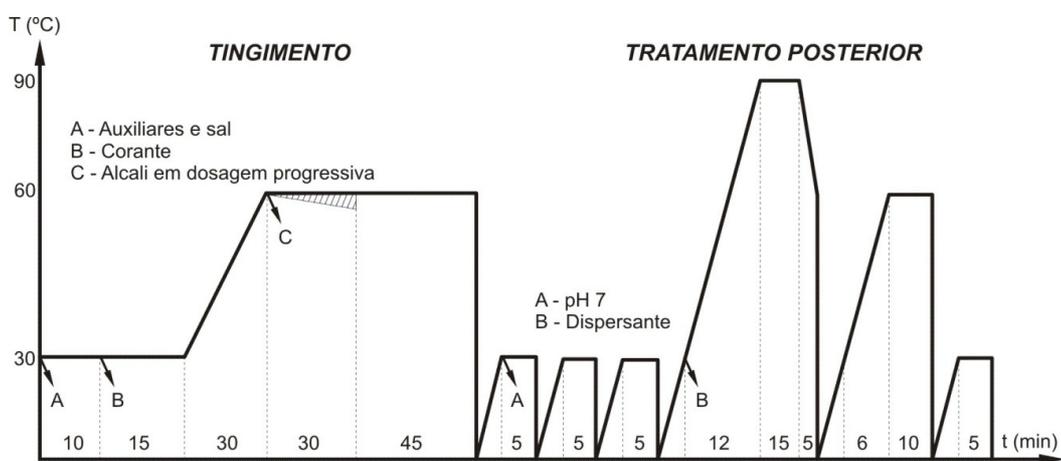
Nesta etapa, aplicou-se o tratamento de fotocatalise com parâmetros ideais obtidos junto ao planejamento fatorial efetuado com o efluente industrial, tendo como objetivo verificar a possibilidade de reuso contínuo de efluente têxtil em novos processos de tingimento.

Foram efetuados cinco processos consecutivos sendo quatro tingimentos em cores escuras com corantes reativos e um tingimento de branco, utilizando-se o mesmo banho após tratamento com POA via UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, cuja eficácia foi maior do que 85% em todos os casos, permitindo total reutilização. Ao comparar os tingimentos feitos com efluente tratado contra tingimentos feitos com água comum de reabastecimento, o maior desvio total apresentado foi DE = 1,10.

Os tecidos foram preparados e tintos segundo instruções dispostas nos gráficos das Figuras 25 e 26. Foram cinco tingimentos no total, sendo os tingimentos A, B, C e D com corantes reativos e o E, branco óptico. Todos os dados encontram-se dispostos na Tabela 14.



**Figura 25.** Gráfico da preparação para os Tingimentos A, B, C e D (a) e gráfico do Tingimento E (b).



**Figura 26.** Gráfico do tingimento e tratamento posterior dos tingimentos A, B, C e D.

Todos os processos tiveram seus efluentes coletados desde a preparação, foram diluídos em cinco vezes e tiveram pH acertado para 7,0. O primeiro deles (Tingimento A), foi diluído com água normal de reabastecimento e os demais (Tingimentos B, C, D e E) foram efetuados e diluídos com o efluente já tratado do primeiro processo.

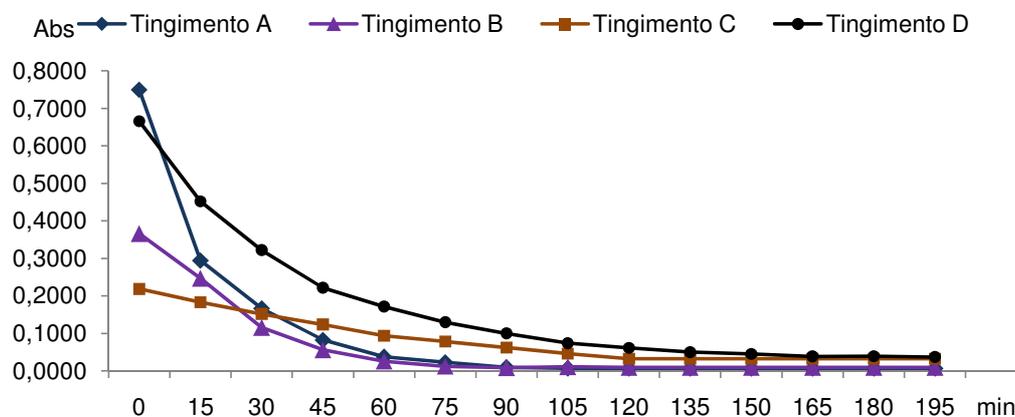
O tratamento foi realizado em pH 7, adicionando-se 2,0 mL.L<sup>-1</sup> de Peróxido de Hidrogênio 35% (m/m), com posterior exposição a ondas até conversão total. Foram realizadas coletas com intervalo de quinze minutos cada para posterior avaliação da Absorbância (Abs) por espectrofotometria UV/VIS, em cubetas de acrílico com 1,0 cm de caminho óptico.

**Tabela 14.** Receitas e ordem de tingimento.

TINGIMENTO	A	B	C	D	E
PANTONE	TP 194025	TP 183828	TP 181230	TP 190303	Branco
<i>C.I. RY145 (%)</i>	-	-	1,3650	-	-
<i>C.I. RR239 (%)</i>	-	-	0,6620	-	-
<i>C.I. RB222 (%)</i>	-	-	0,2430	-	-
<i>C.I. RV5 (%)</i>	-	2,0000	-	-	-
<i>C.I. RB5 (%)</i>	2,5000	-	-	-	-
Preto Base RB5 (%)	-	-	-	5,0000	-
Branco Óptico (%)	-	-	-	-	0,8000

A relação de banho utilizada nos processos de preparação e tingimento de todas as amostras, na obtenção dos valores para o cálculo do gasto de água e também para a projeção de gasto mensal foi de 1:10.

O resultado da fotocatalise através do tratamento fotoquímico está demonstrado na Figura 27, onde se observa os experimentos efetuados nos efluentes dos tingimentos A, B, C e D.



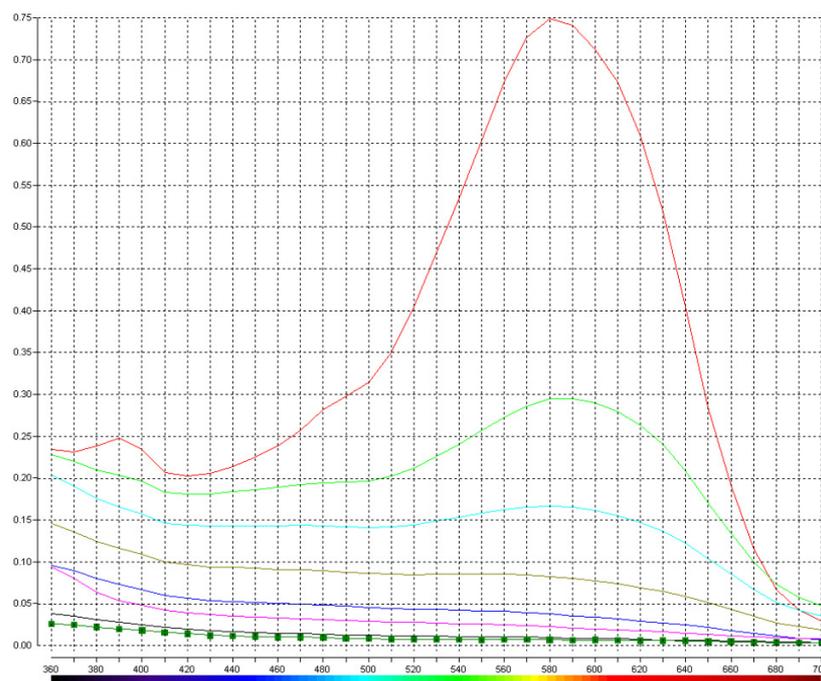
**Figura 27.** Decomposição fotoquímica dos efluentes relativos aos Tingimento A, B, C e D.

Os dados relativos ao alfa de conversão e a porcentagem de eficiência obtidos nos processos de fotocatalise estão demonstrados na Tabela 15, a seguir.

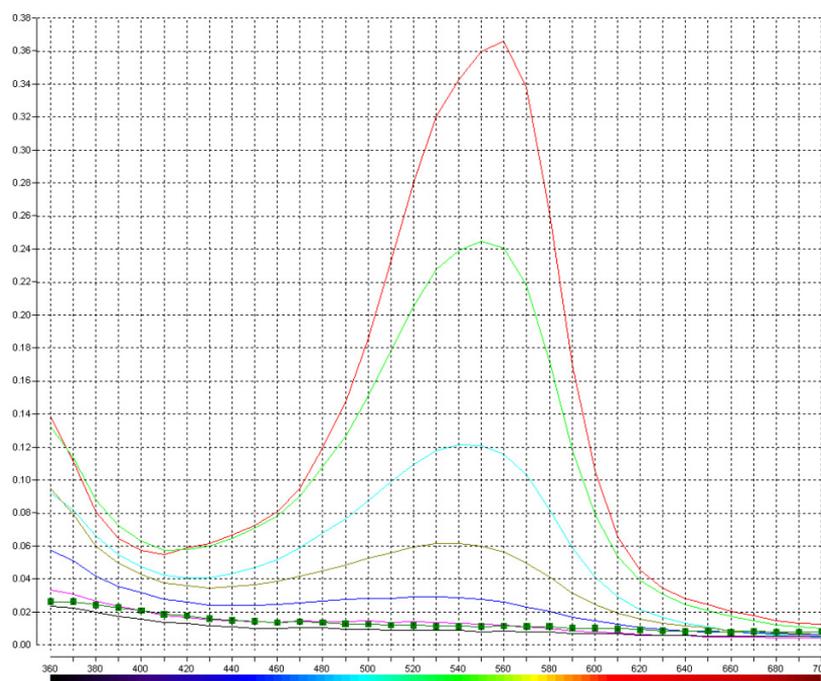
**Tabela 15.** Dados sobre a fotocatalise dos efluentes.

Tingimento	Abs <sub>o</sub>	Abs <sub>f</sub>	$\alpha$	% Eficiência
A	0,7495	0,0072	0,99	99,04
B	0,3659	0,0095	0,97	97,40
C	0,2186	0,0325	0,85	85,13
D	0,6656	0,0372	0,94	94,41

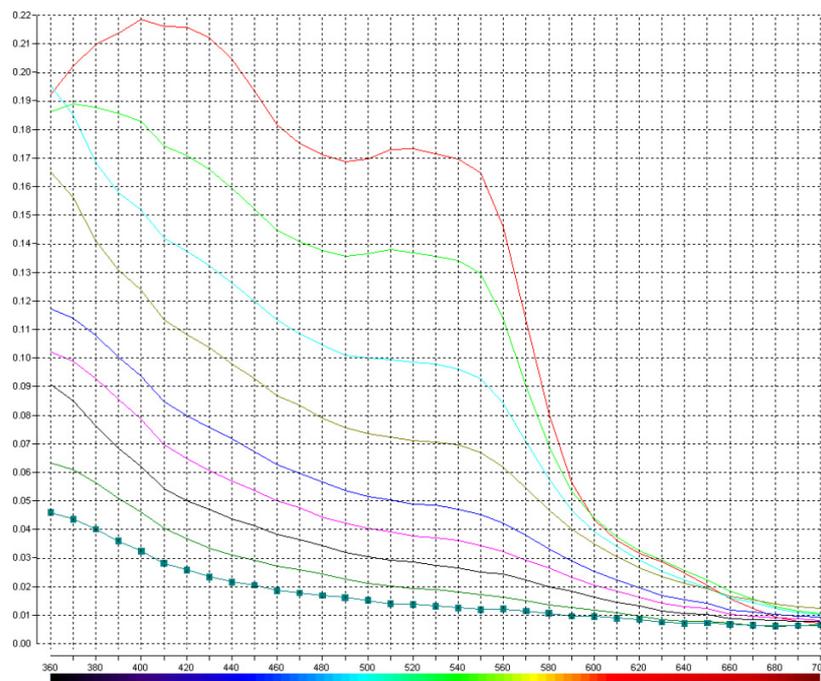
As figuras a seguir mostram as varreduras espectrofotométricas dos tratamentos fotoquímicos estão dispostos nas Figuras 28, 29, 30 e 31, a seguir.



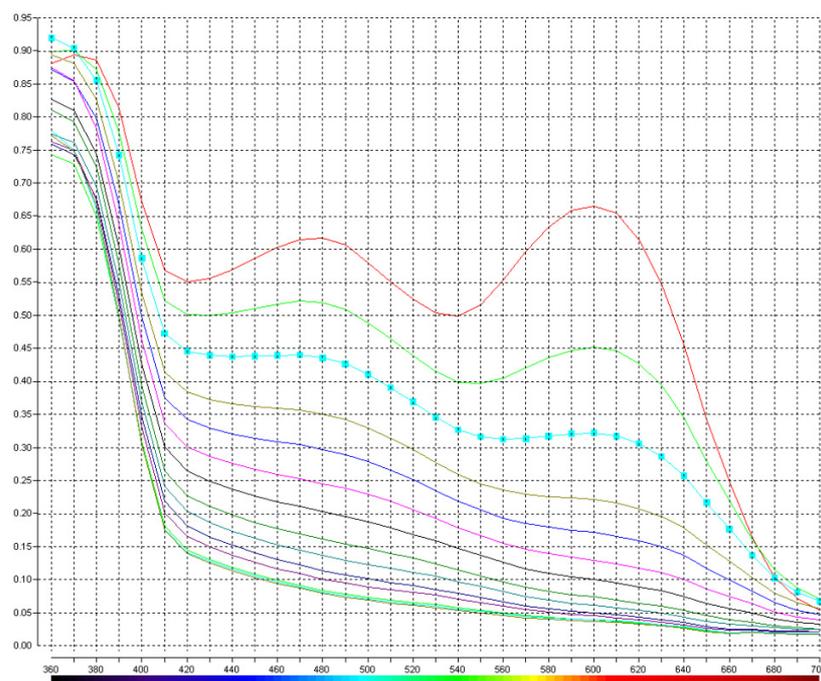
**Figura 28.** Decomposição fotoquímica do efluente relativo ao Tingimento A.



**Figura 29.** Decomposição fotoquímica do efluente relativo ao Tingimento B.

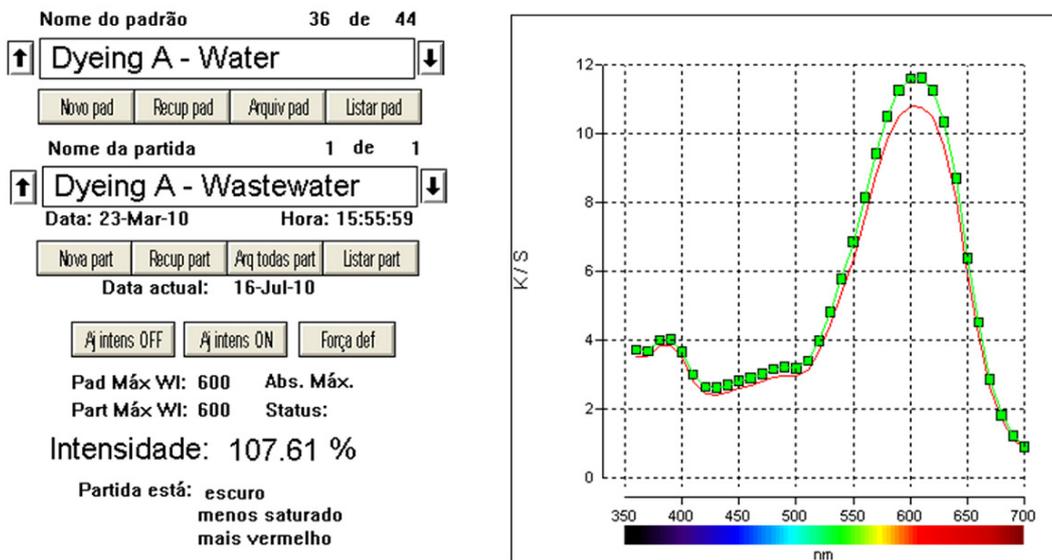


**Figura 30.** Decomposição fotoquímica do efluente relativo ao Tingimento C.

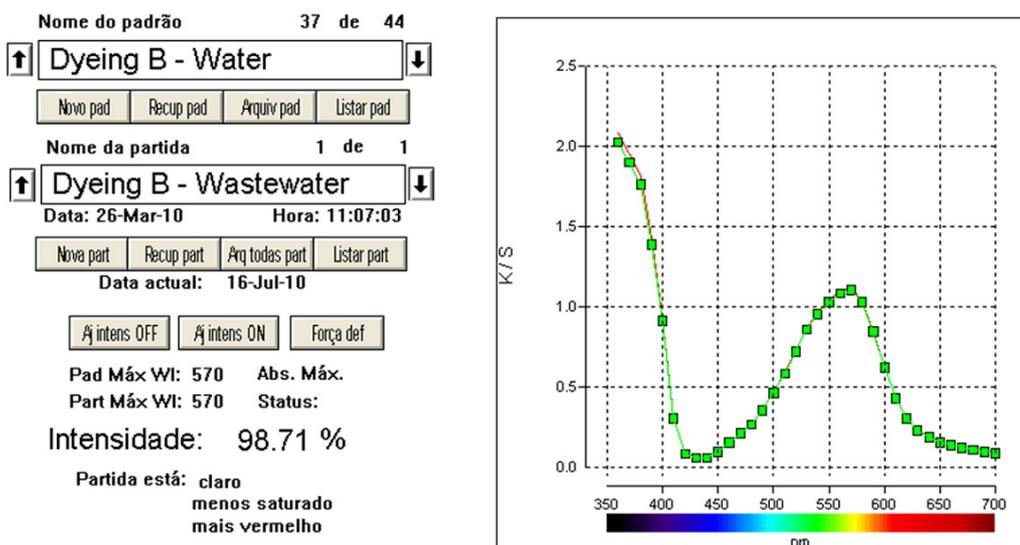


**Figura 31.** Decomposição fotoquímica do efluente relativo ao Tingimento D.

Os resultados dos tingimentos efetuados com efluente tratado comparados com tingimentos efetuados com água normal de reabastecimento estão demonstrados nas Figuras 32, 33, 34, 35, e 36. Em todos os gráficos, a linha contínua representa o tingimento feito com água de reabastecimento e a linha com pontos, os tingimentos efetuados com efluente tratado.



**Figura 32.** Dados relativos ao Tingimento A, efluente tratado e água de reabastecimento.



**Figura 33.** Dados relativos ao Tingimento B, efluente tratado e água de reabastecimento.

Nome do padrão 38 de 44

↑ **Dyeing C - Water** ↓

Novo pad Recup pad Arquiv pad Listar pad

Nome da partida 1 de 1

↑ **Dyeing C - Wastewater** ↓

Data: 26-Mar-10 Hora: 11:07:14

Nova part Recup part Arq todas part Listar part

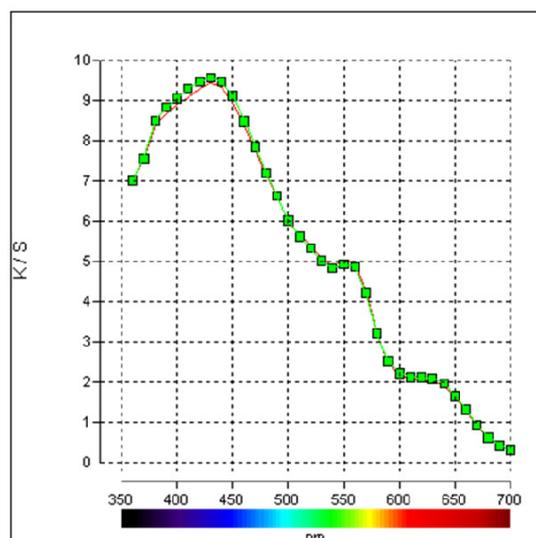
Data actual: 16-Jul-10

intens OFF
  intens ON

Pad Máx WI: 430 Abs. Máx.  
Part Máx WI: 430 Status:

Intensidade: 101.57 %

Partida está: escuro  
menos saturado  
mais amarelo



**Figura 34.** Dados relativos ao Tingimento C, efluente tratado e água de reabastecimento.

Nome do padrão 39 de 44

↑ **Dyeing D - Water** ↓

Novo pad Recup pad Arquiv pad Listar pad

Nome da partida 1 de 1

↑ **Dyeing D - Wastewater** ↓

Data: 26-Mar-10 Hora: 11:07:26

Nova part Recup part Arq todas part Listar part

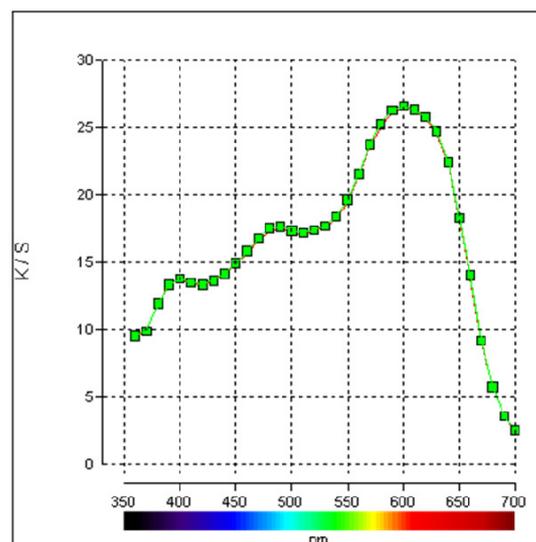
Data actual: 16-Jul-10

intens OFF
  intens ON

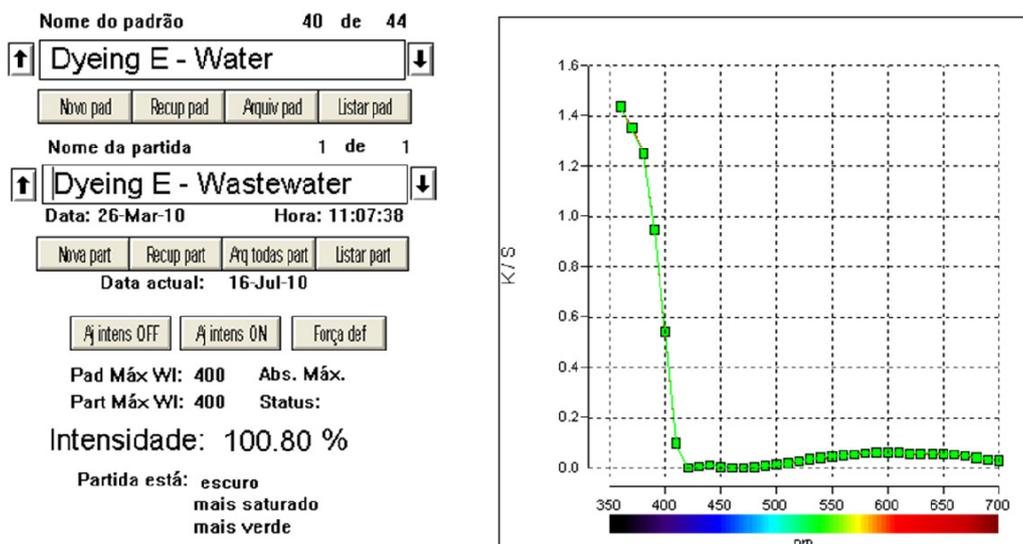
Pad Máx WI: 600 Abs. Máx.  
Part Máx WI: 600 Status:

Intensidade: 100.57 %

Partida está: escuro  
menos saturado  
mais vermelho



**Figura 35.** Dados relativos ao Tingimento D, efluente tratado e água de reabastecimento.



**Figura 36.** Dados relativos ao Tingimento E, efluente tratado e água de reabastecimento.

Os tingimentos foram comparados através de avaliação espectrofotométrica UV/Vis. Os desvios parciais e totais relativos aos tingimentos estão dispostos na Tabela 16, a seguir.

**Tabela 16.** Desvios parciais e totais referentes aos Tingimentos A, B, C, D e E.

Desvios	Tingimentos				
	A	B	C	D	E
DL*	-1,05	0,13	-0,01	-0,07	-0,24
Da*	0,15	-0,10	-0,68	0,03	-0,06
Db*	0,30	0,16	0,26	0,01	-0,34
DE*	1,10	0,23	0,73	0,08	0,26

Na Tabela 17, valores de eficiência de descoloração de seis estudos sobre corantes, juntamente com valores obtidos em experimentos realizados nesta dissertação. Apesar de valores considerados satisfatórios, observa-se que todos os seis estudos foram baseados em corantes contidos em soluções aquosas, diferente dos experimentos da dissertação que, em sua maioria, são sobre corantes contidos em efluentes.

**Tabela 17.** Comparação entre processos.

<b>Autores</b>	<b>Corante</b>	<b>Tratamento</b>	<b>% Remoção</b>	<b>Fonte</b>	<b>Ano</b>
Araujo e Yokoyama	Reativo TCP em água destilada	UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	98,00	Dyes and Pigments	2005
Kaluzna-Czaplinska, Gutowska e Józwiak	C.I. Acid Brown 349 em água desmineralizada	Fe <sup>2+</sup> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	70,00	Dyes and Pigments	2010
Souza e Peralta-Zamora	MCT e VS em água destilada	Fe <sup>0</sup> metálico	99,00	Eng. Sanit. Ambiental	2005
Vianna, Tôrres e Azevedo	Acid Blue 9, Red 18 e Yellow 23 em água destilada	TiO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /UV	98,00	Química Nova	2008
Lucas e Peres	VS em água deionizada	Fe <sup>2+</sup> /UV	98,00	Dyes and Pigments	2009
Wang	Acid Black 1 em água deionizada	Fe <sup>2+</sup> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	98,00	Dyes and Pigments	2008
Liu <i>et al.</i>	C. I. Acid Yellow 17 em água destilada	UV/TiO <sub>2</sub>	70,60	Dyes and Pigments	2006
Amorim, Leão e Moreira	C.I. RR195, VS em água destilada	UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	99,00	Eng. Sanit. Ambiental	2009
	C.I. RB19, VS em efluente		> 90,00		
	C.I. RV5, VS em efluente		97,00		
	C.I. RB5, VS em efluente		> 95,00		
Rosa, J.M.		UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		Dissertação	2010
	Efluente Real - Amostra 01		> 98,00		
	Efluente Real - Amostra 02		> 97,00		
	Quatro efluentes com reuso contínuo		> 85,00		

#### **4.4 – Custos ecológicos no processo de reuso de água na indústria têxtil**

Fresner e Engelhardt (2004) apontam que a base para a compreensão das abordagens para o desenvolvimento sustentável pode ser estabelecida por

traduzir o desenvolvimento em pequenos passos relevantes para as condições reais das empresas e estas medidas são a aplicação de métodos de produção

mais limpa seguido de um sistema integrado de gestão, otimização da cadeia de abastecimento e conseqüentemente as relações dos produtos, procedimento que constitui uma forma eficaz de começar a compreender o desenvolvimento sustentável e suas estratégias nas empresas.

Jimenez (2006) destaca que a Contabilidade de Custos Ecológicos Completos (CCEC) foi proposta como um meio para permitir a apresentação de relatórios sobre a contribuição das empresas para a sustentabilidade através da integração dos custos internos e externos.

Após o tratamento dos efluentes pretende-se o reuso da água no processo, ou seja, a empresa deixaria de captar água e evitaria a produção de efluente altamente poluidor, reduzindo desta forma o seu custo financeiro, ecológico e suas externalidades negativas. Para Burritt e Saka (2006), a contabilidade voltada para gestão ambiental é ferramenta relativamente nova, concebida para rastrear e monitorar os fluxos dos custos ambientais e físicos. Os autores destacam que a gestão contábil ambiental é a gestão de desempenho ambiental e econômico através do desenvolvimento e aplicação de medidas relacionadas com o ambiente e sistemas de práticas contábeis.

Com o tratamento o efluente passaria a seguir um fluxo contínuo, de forma a retornar ao processo para reuso, não ocorrendo necessidade de captação externa nem de descarte do efluente, ou seja, os níveis de poluição e contaminação ao meio ambiente seriam zero. A partir deste ponto a indústria tornar-se-ia plenamente sustentável sob o ponto de vista ecológico.

Ao projetar-se o consumo de uma tinturaria de algodão, com capacidade de produção mensal igual a cem toneladas subdivididas em lotes de duzentos quilos, a economia de recursos hídricos seria em torno de 7.912 m<sup>3</sup> mensais quando comparada a uma tinturaria convencional, conforme dados dispostos na Tabela 18.

**Tabela 18.** Projeção de consumo mensal.

Tinturaria com produção mensal = 100 ton mensais, em lotes de 200 kg cada			
Convencional	m <sup>3</sup> /lote	lotes/mês	CONSUMO (m <sup>3</sup> )
	16	500	8000
Com reuso	m <sup>3</sup> /1º lote	Diluição	Soma 1º lote + diluição + 10% de perda por evaporação
	16	64	88
ECONOMIA MENSAL			7912

A economia mensal seria em torno de R\$ 161.088,30 de acordo com tarifas de consumo da SABESP, cujas se encontram descritas na Tabela 19.

**Tabela 19.** Tarifas dos serviços de fornecimento de água e coleta de esgoto

Classe de Consumo Industrial (m <sup>3</sup> /mês)	Tarifas de água (R\$)	Tarifas de esgoto (R\$)
de 0 a 10	26,21/mês	26,21/mês
de 11 a 20	5,09/m <sup>3</sup>	5,09/m <sup>3</sup>
de 21 a 50	9,78/m <sup>3</sup>	9,78/m <sup>3</sup>
acima de 50	10,18/m <sup>3</sup>	10,18/m <sup>3</sup>

Fonte: SABESP-2009

Além da economia na dimensão financeira, há também economia significativa nas dimensões ecológicas e sociais. Com redução a zero das externalidades negativas, a empresa passa de poluente a sustentável, minimizando seus impactos ambientais, pois não haveria captação de água nem descarte de efluente poluidor.

## 5 – CONCLUSÃO

Baseando-se nos resultados obtidos nos experimentos, pode-se concluir que o tratamento estudado é passível de aplicação. Em todas as variações possíveis foram obtidos valores de descoloração acima de 85%, permitindo total reutilização do efluente tratado. Para o tratamento do RB19, foram necessárias 5:30 h para uma decomposição satisfatória no efluente bruto ou então trabalhar com diluição do efluente para posterior tratamento. Os resultados mostraram que, para o efluente diluído, em qualquer pH utilizado no tratamento fotoquímico, a eficiência da decomposição do corante na faixa de  $\lambda_{\text{máx}} = 600$ , via fotocatalise com  $\text{H}_2\text{O}_2$  na presença de luz UV foi acima de 90%, demonstrando que o pH não interfere nessa faixa.

Ficou demonstrado também que o corante RV5 possui comportamento totalmente diferente quando diluído em água destilada e presente em efluente após processo de tingimento. Apesar dos experimentos apresentarem total descoloração, com eficiência de 97% para o corante em água e 94% para o corante em efluente, o tempo de residência no reator fotoquímico para o corante diluído ficou em 50 min contra 170 min do corante contido em efluente. Com base nesses resultados, fica comprovado que a decomposição pode efetuar-se de formas diferentes, quando o corante encontra-se em diferentes situações.

No experimento com o RB5, os resultados demonstraram que para qualquer pH utilizado no processo de fotodecomposição, não há interferência significativa. Os três efluentes obtidos puderam ser utilizados como água de reuso para tingimento em cores escuras, como pudemos observar nos desvios  $DE_{\text{pH}7} = 0,16$ ;  $DE_{\text{pH}9} = 0,51$  e  $DE_{\text{pH}11} = 0,68$ ; perfeitamente aceitáveis dentro dos padrões exigidos no mercado atual, que é de  $DE = 1,0$ . Além disso, como o aspecto visual do efluente tratado em pH 7 foi melhor que os demais, recomenda-se a decomposição nesta faixa de pH pelo fato de ser este o pH inicial da quase totalidade dos processos de beneficiamento.

Nos experimentos planejados e realizados com o efluente industrial, ficou demonstrado que as melhores condições foram para o efluente diluído em cinco vezes, em pH 7, pelo fato deste pH ser utilizado no início da maioria dos

processos de beneficiamento e também que a concentração de peróxido de hidrogênio não possui influência significativa, propiciando resultados positivos em concentrações abaixo de  $1,75 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$ , com tempos de exposição não superiores a três horas.

Estes parâmetros foram comprovados na realização de cinco tingimentos consecutivos utilizando-se o mesmo banho após tratamento com fotocatalise, onde os resultados demonstraram igualdade entre as cores feitas com água de reabastecimento e com o efluente tratado. Ao realizar o tratamento do efluente e, posteriormente, utilizá-lo como água de reabastecimento, a indústria torna-se sustentável. Além de não descartar produtos altamente poluentes, deixa de captar água para seu processo produtivo através do reuso.

Com a simulação através de experimentos realizados em efluentes sintetizados em laboratório e também com efluente industrial para verificação da eficácia do processo e seu reuso no processo produtivo da indústria têxtil, conclui-se que a indústria reduziria o consumo de recursos hídricos, impactos ecológicos negativos e também as externalidades negativas ao se tornar sustentável.

O estudo demonstra que o processo e a aplicação da metodologia são eficientes e podem ser empregados pelas tinturarias, visto que, ao projetar-se o consumo de uma tinturaria de algodão, com capacidade de produção mensal igual a cem toneladas subdivididas em lotes de duzentos quilos, a economia de recursos hídricos seria em torno de  $7.912 \text{ m}^3$  mensais quando comparada a uma tinturaria convencional.

Entretanto, é importante frisar que ainda há várias etapas a serem desenvolvidas, pois este é somente o estudo de três corantes reativos de mesmo grupo e de duas coletas industriais, todos advindos do beneficiamento de algodão 100% e sob determinadas condições. Ainda há vários estudos a serem desenvolvidos com variações de tempo, concentração de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , fatores de diluição, potência, dentre outras variáveis. A quantidade de grupos cromóforos é vasta e estes grupos podem estar contidos em vários tipos de sistemas cromógenos que podem, ou não, possuírem comportamento semelhante ao comportamento dos efluentes estudados até o momento.

### 5.1 – Sugestões para novas pesquisas

- Projetar um reator do tipo batelada contendo quatro lâmpadas de 4W cada, com sistemas de aquecimento, resfriamento e circulação, com capacidade mínima de cinco litros;
- Estudar o comportamento de fotocatalise de uma das mais comercializadas classes de corantes reativos;
- Com auxílio de planejamento fatorial de experimentos, testar variações de potência, temperatura, diluição e quantidade de oxidante;
- Determinar a cinética de fotodecomposição de diversos efluentes para, com o auxílio dos dados obtidos no planejamento dos experimentos, poder projetar e testar um reator do tipo contínuo e;
- Efetuar, durante o estudo, tingimentos consecutivos para poder determinar o número máximo admissível de tingimentos efetuados com efluente tratado.

## 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEPRO: **Referências de Conteúdos da Engenharia de Produção**. Disponível em [www.abepro.org.br](http://www.abepro.org.br), acessado em 12/07/2010, às 23:56h.

ABIQUIM - Associação Brasileira da Indústria Química. **Atividades Setoriais: Corantes e Pigmentos**, 2009. Disponível em [www.abiquim.org.br/corantes](http://www.abiquim.org.br/corantes). Acessado em 22/02/2010, às 23:55h.

ABRAHART, E.N.: **Dyes and Their Intermediates**, 2<sup>nd</sup> Edition, Edward Arnold Publishers Ltd, Hill Street, London, 265 p., 1977.

ALEBOYEH, A.; ALEBOYEH, H.; MOUSSA, Y.: "Critical" effect of hydrogen peroxide in photochemical oxidative decolorization of dyes: Acid orange 8, Acid Blue 74 and Methyl Orange". **Dyes and Pigments**, n.57, p.67-75, 2003.

ALEBOYEH, A.; KASIRI, M.B.; OLYA, M.E., ALEBOYEH, H.: Prediction of azo dye decolorization by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> using artificial neural networks. **Dyes and Pigments**, n.77, p.288-294, 2008.

ALINSAFI, A.; EVENOU, F.; ABDULKARIM, E.M.; PONS, M.N.; ZAHRAA, O.; BENHAMMOU, A.; YAACOUBI, A.; NEJMEDDINE, A.: "Treatment of textile industry wastewater by supported photocatalysis". In: **Dyes and Pigments**, n<sup>o</sup> 74, p. 439-445, Elsevier, april 2006.

AMORIM, C.C.; LEÃO, M.M.D.; MOREIRA, R.F.P.M.: "Comparação entre diferentes processos oxidativos avançados para degradação de corante azo". In: **Engenharia Sanitária e Ambiental**, vol. 14, n<sup>o</sup> 4, Rio de Janeiro, dezembro, 2009.

ARAUJO, F.V.F.; YOKOYAMA, L.: "Remoção de cor em soluções de corantes reativos por oxidação com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV". In: **Química Nova**, vol. 29, n<sup>o</sup> 1, p. 11-14, 2006.

BABAN, A. et al.: Biodegradability oriented treatability studies strenght segregated wastewater of a woolen textile dyeing plant. **Chemosphere**, V.57, p.731-738, 2004.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S. & BRUNS, R.E.: **Planejamento e Otimização de Experimentos**. Vol. 1, 1<sup>a</sup> edição, Série Manuais, Editora da UNICAMP, Campinas – SP, 302 p.,1995.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S. & BRUNS, R.E.: **Como Fazer Experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**. Vol. 1, 1<sup>a</sup> edição, Coleção Livros - Textos, Editora da UNICAMP, Campinas – SP, 406 p., 2001.

BEYDILLI, M.I.; PAVLOSTATHIS, S.G.: Decolorization kinetics of the azo dye Reactive Red under mathanogenic conditions: effect of long term culture acclimation. **Biodegradation**, New York, v.64, n.2, p135-146, mar., 2005.

BILLMEYER JR, F.W.; SALTZMAN, M.: **Principles of Color Technology**. Ed. John Wiley & Sons, Second Edition, New York, USA, 240 p., 1981.

BRAÚNA, C.H.C; MOTA, S.; SANTOS, A.B.: "Descoloração reductiva do corante azo RR2 na ausência e presença de mediador redox e acceptor de elétrons nitrato". In: **Eng. Sanit. Ambiental**, v.14, n.2, p. 275-284, abr/jun 2009.

BRITO, J.M.; RANGEL, M.C.: Processos Avançados de Oxidação de Compostos Fenólicos em Efluentes Industriais, **Química Nova**, V.31, n.1, p.114-122, 2008.

BURRITT, R.L.; SAKA, C.: *Environmental management accounting applications and eco-efficiency: case studies from Japan*. **Journal of Cleaner Production** n.14, p.1262-1275, 2006.

CONCHON, J. A.: *Tratamento de Efluentes na Indústria Têxtil*. **Revista Base Textil**. Federación Argentina de la Industria Textil, nº 123, 1999.

CONAMA Legislação Federal sobre Classificação das Águas (potabilidade/balneabilidade) e Poluição das Águas. **Resoluções Nº 020/1986**, 1986.

CONAMA Legislação Federal sobre Classificação das Águas (potabilidade / balneabilidade) e Poluição das Águas. **Resoluções Nº 274/2000**, 2000.

COUGHLIN, M.F.; KINKLE, B.K.; BISHOP, P.L.: *High performance degradation of azo dye acid orange 7 and sulfanilic acid in a laboratory scale reactor after seeding with cultured bacterial strains*, **Water Res.**, New York, v.37, n.11, p.2757-2763, 2003.

EDGARD, T.F. & HIMMELBLAU, D.M.: **Optimization of Chemical Processes**. 1ª edition, *Chemical Engineering Series*, McGraw-Hill International Editions, printed in Singapore, 654 p., 1989.

*Editorial, Dyes and Pigments*, n. 79, Ed. Elsevier, 2008.

GOMES MELO, C.; SOUZA, R.C.; ROSA, J.M.: "Colorimetria: O banco de dados em tinturarias". In: **Química Têxtil**, n.95, p. 36-47, ABQCT, jun 2009.

HASSEMER, M; SENS, M.: Tratamento do Efluente de uma Indústria Têxtil: Processo Físico-Químico com Ozônio e Coagulação/Floculação. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, V.7, p.30-36, 2002.

HWAN MO, J.; LEE, Y.H.; KIM, J.; JEONG, J.Y.; JEGAL, J.: "Treatment of dye aqueous solutions using nanofiltration polyamide composite membranes for the dye wastewater reuse". In: **Dyes and Pigments**, nº 76, p. 429-434, Elsevier, nov 2008.

IEMI – Instituto de Estudos de Marketing Industrial. **Relatório Setorial da Indústria Têxtil Brasileira**, 2007. Disponível em [www.textilia.net](http://www.textilia.net). Acessado em 25 de Março de 2010, às 23:45h.

*IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, 2<sup>nd</sup> Edition. Gold Book. Compiled by A. D. McNaught and A. Wilkinson. Blackwell Scientific Publications, Oxford (1997). XML on-line corrected version: <http://goldbook.iupac.org> (2006) created by M. Nic, J. Jirat, B. Kosata; updates compiled by A. Jenkins. ISBN 0-9678550-9-8. doi:10.1351/goldbook. Last update: 2009-09-07; version: 2.1.5. DOI of this term: doi:10.1351/goldbook.A00536.*

FRESNER, J.; ENGELHARDT, G.: *Experiences with integrated management systems for two small companies in Austria. Journal of Cleaner Production*, n.12, p.623–631, 2004.

JIMENÉZ, I.C.: *Contabilidad de costes ecológicos en España: valoración de los costes externos de las empresas. Documento de trabalho 05/06. Universidad de Burgos, 2006.*

JOHNSON, A. (Ed.): **The theory of coloration of textiles**. 2<sup>nd</sup> Edition. Perkin House: Society of Dyers and Colourists, 275 p., 1989.

KALUZNA-CZAPLINSKA, J.; GUTOWSKA, A.; JÓZWIAK, W.K.: *The chemical degradation of C.I. Acid Brown 349 in aqueous solution using hydrogen peroxide and sodium hypochlorite and its implications for biodegradation. Dyes and Pigments*, n.87, p.62-68, 2010.

KUNZ, A.; PERALTA-ZAMORA, P.; MORAES, S. G.; DURÁN, N. *Novas Tendências no Tratamento de Efluentes Têxteis, Química Nova*, v.25, n.1, p.78-82, 2002.

LIU, C.; HSIEH, Y.; LAI, P.; LI, C.; KAO, C.: *Photodegradation treatment of azo dye wastewater by UV/TiO<sub>2</sub> process. In: Dyes and Pigments*, n.68, p 191-195, 2006.

LOZANO, R.D.: **El color y su medición**. Editorial Américalee S.R.L., Buenos Aires, 639 p., 1978.

LUCAS, M.; JEREMIAS, P.F.P.T; ANDREAUS, J.; BARCELLOS, I.O.; PERALTA-ZAMORA, P.: "Reutilização de efluente de tingimentos de fibras acrílicas pós-tratamento fotoeletroquímico". **Química Nova**. V. 31, n. 6, São Paulo, 2008.

LUCAS, M.S.; PERES, J.A.: *Degradation of Reactive Black 5 by Fenton/UV-C and ferrioxalate/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/solar light processes. Dyes and Pigments*, n.74, p.622-629, 2007.

MACHADO, E. et al.: Remediação mais limpa na indústria de tingimento têxtil. In: **XXX Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental**, Punta del Este, V.1, p.1-6, 2006.

ROSA, J.M.: Reativo ou Tina? Vantagens e Desvantagens no tingimento de algodão 100% acondicionados em bobinas cruzadas. In: **Proceedings of XIX Congresso Latinoamericano de Química y Textil**, Santiago, Chile, out/2008.

ROSA, J.M.; BAPTISTA, E.A.; SANTANA, J.C.C.: Estudo da influência do pH na degradação fotoquímica de grupos antraquinônicos em corantes reativos do tipo vinilsulfônico. In: **Química Têxtil**, n. 96, ABQCT, setembro, 2009.

*NEAMTU, M. et al. "Kinetics of decolorization and mineralization of reactive azo dyes in aqueous solution by the UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidation". **Dyes and Pigments**, v. 53, p. 93-99, 2002.*

OLIVEIRA, S.M.A.C.; VON SPERLING, M.: Avaliação de 166 ETEs em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Parte I - Análise de Desempenho. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, V.10, p.347-357, 2005.

PRADO, M.V.; PRADO, R.V.B.: **Relatório Setorial da Indústria Têxtil Brasileira**. ABIT/IEMI, V.8, n.8, 152 p., São Paulo, 2008.

*RIVERA, M.; PAZOS, M.; SANROMAN: Improvement of dye electrochemical treatment by combination with ultrasound technique. **J Chem Technol Biotechnol**, n.84, p.1118-1124, 2009.*

RUSCHIONI, R.: Processos de acabamento em úmido de malha em aberto sob considerações ecológicas e aspectos de qualidade. **Química Têxtil**, n.86, p.54-65, 2007.

SALEM, V.: **Curso de Tingimento**. São Paulo, Golden Química, 1999.

SALGADO, B.C.B; NOGUEIRA, M.I.C.; RODRIGUES, K.A.; SAMPAIO, G.M.M.S.; BUARQUE, H.L.B.; ARAÚJO, R.S.: "Descoloração de efluentes aquosos sintéticos e têxtil contendo corantes índigo e azo via processos Fenton e foto-assistidos (UV e UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)", **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.14, n.1, p. 1-8, 2009.

*SDC - Society of Dyers and Colourists, AATCC - American Association of Textile Chemists and Colorists, **Colour Index**, Manchester, UK, 1971.*

SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, 2008. **Caderno Inspirações e Tendências para Design de Moda**, Editora do SENAI, São Paulo - SP.

*SHIMOKAWA, T.; HITAI, M.; SHODA, M.; SUGANO, Y.: Efficient Dye Decolorization and Production of Dye Decolorizing Enzymes by the Basidiomycete *Thanatephorus cucumeris* Dec 1 in a Liquid and Solid Hybrid*

*Culture. Journal of Bioscience and Bioengineering*, V.106, n.5, p.481-487, 2008.

SHORE, J.: **Colorants and Auxiliaries**, v.1: *Colorants*, 2<sup>nd</sup> Edition, SDC, Manchester, UK, 286 p., 2002.

SOUZA, C.L.R.; PERALTA-ZAMORA, P.: "Degradação de corantes reativos pelo sistema ferro metálico/peróxido de hidrogênio". In: **Química Nova**, vol.28, nº2, São Paulo, Abr, 2005.

TEIXEIRA, C. P. A. B.; JARDIM, W. F. **Caderno Temático: Processos Oxidativos Avançados - Conceitos Teóricos**, v.3, Unicamp, Campinas - SP, Brasil, 2004.

TEIXEIRA, W.A.; COSTA, S.M.; P. JUNIOR, A.; COSTA, S.A.: "Descoloração de um Efluente Têxtil via Oxidação Avançada H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV". In: **XVI Encontro de Química da Região Sul**, FURB, Blumenau, Nov/2008.

TUNUSSI, J.L.; ALEM SOBRINHO, P.: Remoção de cor e nitrificação de efluentes de tinturaria têxtil através de processos biológicos anaeróbio-aeróbio. In: XXVIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental da AIDIS. **Anais**, Cancun, México, 2002.

VANDEVIVERE, P.C.; BIANCHI, R.; VERSTRAETE, W. - *Treatment and Reuse of Wastewater from the Textile Wet-Processing Industry: Review of Emerging Technologies*. **J. Chem. Technol. Biotechnol.** n 72, p.289-302, 1998.

VIANNA, V.B; TÔRRES, A.R.; AZEVEDO, E.B.: "Degradação de corantes ácidos por processos oxidativos avançados usando um reator com disco rotatório de baixa velocidade". In: **Química Nova**, vol. 31, nº 6, São Paulo, 2008.

WANG, S.: *A Comparative study of Fenton and Fenton-like reaction kinetics in decolourisation of wastewater*. **Dyes and Pigments**, n.76, p.714-720, 2008.

ZHANG, X.; LIU, Y.; YAN, K.; WU, H.: *Decolorization of Antraquinone-Type Dye by Bilirubin Oxidase-Producing Nonligninolytic Fungus Myrothecium sp. IMER1*. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, V.104, n.2, p.104-110, 2007.

ZOLLINGER, Z.: **Color Chemistry: Syntheses, Properties and Applications on Organic Dyes and Pigments**. 2<sup>nd</sup> Edition, New York, VCH Publishers, Inc, 496 p., 1991.

## 7 – GLOSSÁRIO

O presente glossário foi montado respeitando-se a ordem alfabética.

- **Absorciometria:** através desta técnica, analisam-se espécies químicas orgânicas e inorgânicas que absorvem radiações nas regiões espectrais do ultravioleta e do visível, faixa de comprimento de onda entre 320 a 700 nm.
- **Antraquinônico:** nome dado a um grupo cromóforo derivado da antraquinona.
- **Azo:** Nome dado a um grupo químico que possui dois átomos de nitrogênio unidos entre si através de uma dupla ligação (-N=N-). A maioria dos corantes estudados nos dias de hoje possui esse grupo em sua estrutura.
- **Corantes Bifuncionais:** corantes com dois, ou mais, grupos reativos que podem ser iguais, bi-homofuncionais ou diferentes, bi-heterofuncionais.
- **Corantes Halogenoheterocíclicos:** são corantes reativos que contém anéis de triazina ou pirimidina (anéis heterocíclicos) ligados à átomos de Flúor ou Cloro (halogênios).
- **Corantes Monofuncionais:** corantes que possuem somente um grupo reativo.
- **Etapas do processo de tingimento:** para um tingimento de algodão com corantes reativos as etapas são: alvejamento e neutralização; tingimento e tratamento posterior. Em média um banho para alvejamento, um para o tingimento e seis para a lavagem, sendo que um banho para processamento de um quilograma com uma RB = 1:10 equivale a 10 litros.
- **Grupo Cromóforo:** grupo que, em conjunto com grupos de alta e baixa densidade eletrônica, formam compostos que refletem luz visível. São exemplos de grupo cromóforos os grupos Azo, Antraquinônico, Trifenilmetano, dentre outros.
- **H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:** O Peróxido de Hidrogênio, um agente oxidante, é o reagente que, sob influência de ondas UV, irá gerar os radicais livres. Uma das vantagens desse produto é o subproduto formado em sua decomposição: a água.

- **Radicais Hidroxila (OH•):** radicais livres oriundos da catálise do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.
- **Reatores anaeróbios:** são reatores que propiciam um método econômico e muito eficiente, onde se trabalha com bactérias anaeróbias que não precisam de oxigênio para sobreviver.
- **Relação de banho:** conhecida por RB, é a relação existente entre a massa do substrato a ser tinto e a quantidade de banho a ser utilizada para o processo, por exemplo, uma relação de banho igual a 1:10 significa que utiliza-se 10 litros de banho para cada 1 quilograma de substrato.
- **Sistema cromógeno:** denominação química designada para corantes.
- **Substrato:** denominação para quaisquer materiais a serem beneficiados tais como fios, tecidos de malha, tecidos planos ou fibras.
- **UV:** Ondas ultravioletas do tipo UV-C, com comprimento de onda de 237 nm, capazes de fornecer energia de ativação para formação de radicais livres que irão agir na decomposição de matéria orgânica.
- **Vinilsulfônico (VS):** grupo reativo característico de alguns corantes, gerado a partir da reação entre um grupo β-sulfatoetilsulfona e um álcali. O corante Reactive Black 5 (RB5), um dos contemplados neste estudo, é um corante que possui dois grupos β-sulfatoetilsulfona.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)