

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Vinicius da Silva Pires

**Avaliação da remoção da cor do efluente têxtil através do processo de adsorção com
carvão ativado proveniente de folhas de Abacateiro (*Persea americana Mill.*)**

Florianópolis

2020

Vinicius da Silva Pires

Avaliação da remoção da cor do efluente têxtil através do processo de adsorção com carvão ativado proveniente de folhas de Abacateiro (*Persea Americana Mill.*)

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (ENS) do Centro Tecnológico (CTC) da Universidade Federal de Santa Catarina, apresentado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental. Orientador: Profa. Fabíola Tomassoni, Dra.

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Pires, Vinicius

Avaliação da remoção da cor do efluente têxtil através do processo de adsorção com carvão ativado proveniente de folhas de Abacateiro (Persea Americana Mill.) / Vinicius Pires ; orientador, fabiola tomassoni , 2020.

54 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental,
Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Efluente têxtil. 3. Carvão ativado. 4. Persea Americana Mill. 5. Processo de adsorção. I. , fabiola tomassoni. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Vinicius da Silva Pires

Avaliação da remoção da cor do efluente têxtil através do processo de adsorção com carvão ativado proveniente de folhas de Abacateiro (*Persea Americana Mill.*)

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro Sanitarista e Ambiental” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

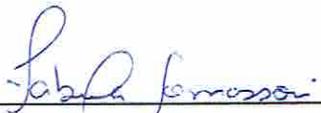
Florianópolis, 02 de Março de 2020.



Documento assinado digitalmente
Maria Elisa Magri
Data: 03/03/2020 14:10:37-0300
CPF: 044.011.369-50

Profª. Maria Elisa Magri, Dra.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



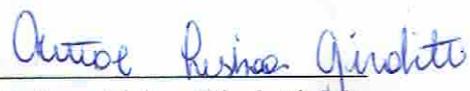
Profª. Fabíola Tomassoni, Dra.
Orientadora

Universidade Federal de Santa Catarina



Elisângela Edila Schneider, Dra.
Avaliadora

Universidade Federal de Santa Catarina



Cristiane Lisboa Giroletti, Me.
Avaliadora

Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus amigos e a minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Lourivaldo Inácio Pires Filho e Débora Eunice da Silva Pires, pelo apoio, alegria e amor, e por sempre trabalharem para garantir ótimas condições de vida e estudo para mim.

À minha noiva, Mariam Freitas Marques, pelo apoio, incentivo, diversão e amor.

À minha orientadora, Fabíola Tomassoni, pela paciência e orientação.

Ao Laboratório de Reuso de Águas (LaRA) e seus pesquisadores, pela disponibilidade do espaço e de materiais para realização deste estudo.

Por fim, agradeço aos docentes e colegas do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina.

RESUMO

As indústrias têxteis destacam-se na economia, produção e industrialização no Brasil. Contudo, são grandes potências na poluição e contaminação ambiental. A cor presente nos efluentes têxteis liberados na natureza, sem tratamento realizado pelas indústrias, dificulta que a luz solar penetre nos corpos d'água em que o efluente foi despejado, comprometendo taxas de oxigênio dissolvido e causando danos na fauna e flora. O tratamento da cor do efluente têxtil pode ser efetuado por diversos métodos, sendo o tratamento biológico o mais utilizado, seguido do tratamento físico-químico, com efetuação do processo de adsorção com carvão ativado. O carvão ativado comercial tem alto custo financeiro e inviabiliza alguns métodos de tratamento. Atualmente, o carvão ativado proveniente de biomassa de resíduos agrícolas mostra-se eficiente na remoção de corantes presentes em efluentes, sendo uma opção eficaz no tratamento, como é o caso do carvão ativado proveniente de folhas de Abacateiro (*Persea americana Mill.*). Este é um estudo, qualitativo e quantitativo, descritivo e exploratório, cujo objetivo geral é avaliar a remoção da concentração de cor do efluente têxtil real através do processo de adsorção com carvão ativado produzido de folhas de Abacateiro. O carvão ativado utilizado no estudo foi produzido através do método simples de ativação física. Para a averiguação da eficiência de remoção da concentração de cor pelo processo de adsorção efetuou-se o planejamento fatorial experimental pelo método de delineamento composto central rotacional (DCCR), tendo como variável dependente a remoção da concentração de cor e como variáveis independentes o pH da solução e a velocidade de agitação. Após a determinação das melhores condições na adsorção para a remoção da concentração de cor, realizou-se ensaios cinéticos. Como resultado do DCCR, as melhores condições de operação do processo de adsorção foram a faixa de pH da solução entre 5 e 7, e a faixa de velocidade de agitação entre 180 a 240 rpm, alcançando eficiência de remoção da concentração de cor superior a 97%. O termo linear de velocidade de agitação e o termo quadrático de pH da solução mostraram-se estatisticamente significativos, obtendo a equação do modelo: % remoção de cor = $79,60 - 0,208 X_1^2 + 0,096 X_2$. Em termos cinéticos, atingiu-se o equilíbrio de adsorção com 90 minutos de ensaio e o melhor modelo cinético que descreveu o experimento realizado foi o de pseudo-segunda ordem, apontando que a etapa limitante no processo adsorptivo é a parte química ou quimissorção. Destaca-se que mesmo apresentando remoção superior a 97%, a cor do efluente tratado permaneceu superior aos parâmetros estabelecidos nas resoluções e leis vigentes no país.

Palavras-chave: Efluente têxtil. Carvão ativado. Indústrias Têxteis. *Persea americana Mill.* Processo de adsorção.

ABSTRACT

The textile industries stand out in the Brazilian economy and production, as well as being great powers in pollution and environmental contamination. The color present in textile effluents released into nature, without treatment carried out by industries, makes it difficult for sunlight to penetrate the bodies of water into which the effluent was dumped, compromising dissolved oxygen rates and causing damage to fauna and flora. The treatment of the color of the textile effluent can be carried out by several methods, with biological treatment being the most used, followed by physical-chemical treatment, with effect of the adsorption process with activated carbon. Commercial activated carbon has a high financial cost and makes some treatment methods unfeasible, while activated carbon from biomass from agricultural residues is efficient in removing dyes present in effluents, being an effective treatment option, such as coal activated from leaves of Avocado (*Persea americana Mill.*). This is a basic, qualitative and quantitative, descriptive and exploratory study, whose general objective is to evaluate the removal of the color concentration of the textile effluent through the adsorption process with activated carbon produced from Avocado leaves, and the specific objectives are: to analyze whether the color of the textile effluent treated after adsorption meets the standard established by current legislation; determine the best experimental conditions for the removal of color concentration using the adsorbent from Avocado leaf; and determine which kinetic model best describes the process of removing the color concentration with the adsorbent used. The activated carbon used in the study was produced using the simple method of physical activation. For the verification of the efficiency of removal of the color concentration by the adsorption process, the experimental factorial design of the central rotational composite design (DCCR) was performed, with the removal of the color concentration as the dependent variable and the pH of the solution as independent variables and stirring speed. After determining the best conditions for adsorption to remove color concentration, kinetic tests were performed. As a result of the DCCR, the best operating conditions for the adsorption process were the pH range between 5 and 7, and the range of agitation speed between 180 and 240rpm, achieving efficiency in removing the color concentration above 97%. The linear term of agitation speed and the quadratic term of pH of the solution were statistically significant, obtaining the model equation: % color removal = $79,60 + -0,208 X_1^2 + 0,096 X_2$. In kinetic terms, the adsorption equilibrium was reached with 90 minutes of testing and the best kinetic model that described the experiment carried out was the pseudo-second order, pointing out that the limiting step in the adsorptive process is the chemical or chemisorption part. It is noteworthy that even with removal greater than 97%, the color of the treated effluent remained superior to the parameters established in the resolutions and laws in force in the country.

Keywords: Activated charcoal. Textile effluent. Textile Industries. *Persea Americana Mill.* Adsorption process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Filtração com membrana de acetado de celulose com porosidade de 0,45 μ m	33
Figura 2 – Ensaio cinéticos	34
Figura 3 – Gráfico de Pareto para remoção da concentração de cor de fluente têxtil através de adsorção com carvão ativado proveniente de folhas de <i>Persea americana Mill.</i> L – Termos lineares. Q – Termos quadráticos. 1Lby2L interação entre os parâmetros analisados.....	36
Figura 4 – Distribuição dos resíduos para remoção da concentração de cor.....	39
Figura 5 – Perfil de contorno indicando a remoção da concentração de cor do efluente têxtil através da adsorção com carvão ativado produzido de folhas de Abacateiro	41
Figura 6 – Superfície de resposta indicando a remoção da concentração de cor do efluente têxtil através da adsorção com carvão ativado produzido de folhas de Abacateiro	42
Figura 7 – Gráfico Remoção de cor (%) por tempo (min)	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros cinéticos característicos e coeficientes de correlação dos modelos avaliados	48
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz de dados do DCCR para o processo de adsorção.....	31
Tabela 2 – Matriz dos resultados obtidos através do DCCR.....	37
Tabela 3 – Teste ANOVA efeitos estimados para as variáveis experimentais avaliadas.....	40
Tabela 4 – Resultados da remoção da concentração de cor de efluente têxtil ao longo do tempo	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIT	Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção
ANOVA	Análise de Variância
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DCCR	Delineamento Composto Central Rotacional
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EDS	Dispersão por energia
ENS	Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
EPAGRI	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
ETAD	<i>Ecological and Toxicological Association of the Dyestuff Manufacturing Industry</i>
Fe(II)	Óxido de ferro
g	Grama
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
L	Linear
L	Litro
LaRA	Laboratório de Reuso das Águas
LIMA	Laboratório Integrado de Meio Ambiente
Mg	miligrama
Min	minuto
ml	Mililitro
pH	Potencial hidrogênio
Q	Quadrático
RDC	Resolução da Diretoria Colegiada
rpm	Rotação por minuto
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
µm	Micrometro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo Geral	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
1.3 JUSTIFICATIVAS	17
1.3.1 Justificativa científica	17
1.3.2 Justificativa social e pessoal	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 INDÚSTRIAS TÊXTEIS	18
2.1.1 Indústrias Têxteis catarinenses	19
2.2 EFLUENTES TÊXTEIS	20
2.2.1 Corantes e produtos químicos	21
2.2.2 Efeitos dos efluentes têxteis no meio ambiente	22
2.3 TRATAMENTO PARA REMOÇÃO DE COR NOS EFLUENTES TÊXTEIS	23
2.3.1 Tratamento físico-químico	24
2.3.2 Tratamento biológico	25
2.3.3 Adsorção	25
2.4 ADSORVENTES	26
2.5 ABACATEIRO (<i>PERSEA AMERICANA MILL.</i>)	27
2.6 LEGISLAÇÃO DE PADRÕES E LANÇAMENTO DE EFLUENTES	28
3 ASPECTOS METODOLÓGICOS	29
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	29
3.1.1 Procedimentos metodológicos	29
3.1.1.1 <i>Local</i>	29
3.1.1.2 <i>Produção do adsorvente</i>	30
3.1.1.3 <i>Caracterização do efluente têxtil</i>	30
3.1.2 Planejamento fatorial experimental de DCCR	31
3.1.3 Estudo da cinética de adsorção	33
4 RESULTADOS	35
4.1 PLANEJAMENTO FATORIAL EXPERIMENTAL DE DCCR DO PROCESSO DE ADSORÇÃO	35

4.2 ESTUDO DE CINÉTICA DE ADSORÇÃO	41
4.2.1 Adequação aos modelos cinéticos	44
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores destaques de produção industrial e econômico brasileira são as indústrias têxteis, também ganham destaque por serem potências poluidoras e contaminadoras ambientais. O ramo têxtil pode ser notado como um dos avanços sociais mais antigos, visto que desde os primórdios da sociedade existe a necessidade de fabricação e utilização de peças de vestuário e peças para uso doméstico (BELLIS, 2019).

As indústrias têxteis são responsáveis pela transformação das fibras em tecidos, procedimento oriundo de várias etapas do processo têxtil que, antigamente, dependia do trabalho manual humano e do auxílio animal, mas conforme os avanços tecnológicos globais subordinou-se a automação industrial e passou a depender de máquinas a vapor e de motores elétricos (BELLIS, 2019).

Porém, a produtividade têxtil ocasiona alguns impasses no meio ambiente. No Brasil, as indústrias têxteis são consideradas as maiores consumidoras de produtos químicos, energia e água do país. A constante utilização de água faz com que as indústrias instalem-se em regiões próximas de rios e lagos, visando a ampla oferta de água. Arslan-Alaton et al. (2008) citam que o maior consumo ocorre nos processos de tintura e acabamento, e corroboram este fato ao afirmarem que para cada quilo de tecido produzido geram-se de 50 a 100 L de efluentes, de acordo com o método utilizado no procedimento têxtil.

Efluentes têxteis são oriundos da produtividade têxtil dos processos de lavagem, tingimento e acabamento de fibras, cuja sua produtividade têxtil origina alta quantidade de resíduos, principalmente resíduos de corantes que são poluidores potenciais devido a sua toxicidade e dificultosa biodegradabilidade (ZAFRILLA et al., 2008; PASCHOAL; TREMILIOSI-FILHO, 2005). Cerca de 20% da pigmentação dos corantes não se fixam à fibra do tecido (KARTHIKEYAN et al., 2017).

Ao adentrar na natureza, efluentes provocam impasses ambientais no ecossistema aquático, como por exemplo, a diminuição da transparência da água, alta penetração da radiação solar e aumento da mortalidade de seres aquáticos (KARTHIKEYAN et al., 2017). De acordo com Lalnunhlimi e Krishnaswamy (2016), descartar efluente têxtil em corpos d'água sem tratá-los, pode alterar a atividade relaciona a fotossíntese, além da contaminação e poluição afetando a fauna e flora dos locais atingidos na natureza, ocasionando o desaparecimento e até extinção de espécies de animais e plantas dos ambientes degradados.

A conscientização da necessidade de proteção ambiental está presente em discussões recorrentes da sociedade, mas a preocupação com danos causados pelo ramo têxtil aos corpos d'água, obteve amparo legal somente nas últimas décadas, com auxílio do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Com isso, surgiram métodos de tratamento para remoção da cor do efluente têxtil, no entanto, a maioria é inviável para utilização em larga escala, geralmente necessitando de combinações de tratamentos para que o resultado seja satisfatório.

Os métodos mais viáveis financeiramente são os de tratamento biológico, tendo a agressividade dos corantes como fator limitante para com o meio microbiológico responsável pelo tratamento. Já os tratamentos físico-químicos mostram-se mais eficientes para remoção de corantes, mas nem sempre são viáveis financeiramente. Os métodos estudados que resultaram em maiores eficiências são os métodos adsorptivos e métodos químicos como a ozonização e fotodegradação (FARAH et al., 2007).

O carvão ativado é o método de adsorção mais utilizado, apresenta ampla habilidade para adsorver componentes orgânicos de baixo peso molecular e possui alta heterogeneidade superficial e porosidade, devido às diversas formas, tamanhos e profundidade dos seus poros (PODKOSCIELNY; NIESZPOREK; SZABELSKI, 2006). Por este fato, torna-se um material de alto custo para ser utilizado em larga escala nas indústrias têxteis. Idealizando materiais que combinem matrizes orgânicas e sustentabilidade, pesquisas como as dos autores Nor et al. (2013), Kankiliç et al. (2016) e Ahmed (2017) destacam o uso do carvão ativado proveniente de biomassas. Nesta linha de estudos, destaca-se a pesquisa de Tomassoni (2019), que apresentou a folha de Abacateiro, cientificamente denominada *Persea americana Mill.*, como material de uso para a produção do carvão ativado, resultando na eficiência de remoção de corantes por meio de processos adsorptivos.

O presente estudo avaliou o processo de adsorção com o uso de carvão ativado proveniente das folhas de *Persea americana Mill.*, visando a remoção da concentração de cor de efluente têxtil real. Classifica-se como pesquisa de natureza básica, qualitativa e quantitativa, descritiva e experimental, embasada em pesquisa bibliográfica e documental realizada em literatura nacional e internacional nas áreas e subáreas da Gestão Ambiental.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a remoção da cor do efluente têxtil real por meio do processo de adsorção com uso de carvão ativado proveniente de folhas de *Persea americana Mill.*

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Analisar se a cor presente no efluente têxtil tratado após o processo de adsorção atende ao padrão estabelecido pela legislação vigente;
- b) Determinar, com métodos estatísticos, as melhores condições experimentais para a remoção da cor utilizando o adsorvente proveniente de folha de *Persea americana Mill.*, com base nos parâmetros pH da solução e velocidade de agitação;
- c) Determinar os parâmetros cinéticos que regem o processo de adsorção de remoção da cor pelo adsorvente estudado.

1.2 JUSTIFICATIVAS

A construção desta pesquisa justifica-se por meio de aspectos científicos, sociais e pessoais.

1.2.1 Justificativa científica

Havendo a necessidade contínua de conscientização de proteção do meio ambiente com auxílio de tecnologias que possam minimizar, e até remover, os poluentes causados pelas indústrias têxteis, a incumbência de elaborar esta pesquisa é explorar e fomentar estudos que evidenciem métodos eficientes para adsorção de efluentes têxteis de modo sustentável, ágil e bom custo benefício para a sociedade.

A construção deste estudo também justifica-se pela motivação do pesquisador em contribuir com a produção de material informativo que avalie e analise novos métodos de tratamento de efluentes têxteis, relacionando às áreas e subáreas da Gestão Ambiental e

colaborando com a relevância do tema para atuais e futuras produções bibliográficas e pesquisas científicas.

1.2.2 Justificativa social e pessoal

Considerando o amplo consumo de produtos químicos, energia e água, bem como os resíduos de corantes e de equipamentos utilizados nas indústrias têxteis que contaminam e poluem o meio ambiente, justifica-se a elaboração desta pesquisa no aspecto social.

A sociedade necessita instruir-se e conscientizar-se frente as consequências ambientais sofridas devido ao descaso das indústrias nos procedimentos têxteis, as quais deveriam recorrer e investir em equipamentos e materiais sustentáveis e que não ameacem fatores biológicos, químicos e físicos que cercam os seres vivos.

Nesta perspectiva, justifica-se o aspecto pessoal da construção deste estudo, referente a afinidade e atrativo particular do pesquisador em explorar fatores de sustentabilidade e de melhores métodos de tratamento de efluentes que não prejudiquem o ecossistema, a fim de obter um resultado satisfatório nos aspectos financeiros e sustentáveis.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresenta contextualizações relativas ao tema da pesquisa, referentes às indústrias têxteis; efluentes têxteis e seus impactos no meio ambiente; adsorção; e sobre a folha de Abacateiro (*Persea americana Mill.*).

2.1 INDÚSTRIAS TÊXTEIS

O processo evolutivo humano incumbido de utilizar matérias-primas como algodão, linho e lã para produzir fibras, fios e tecidos para uso doméstico ou técnico originou as indústrias têxteis, responsáveis pelos procedimentos de fiação, tecelagem e beneficiamento de tecidos, primordialmente, subordinados ao trabalho manual e animal, e conforme o progresso dos avanços tecnológicos e industriais, passou-se a utilizar máquinas (BELLIS, 2019).

No Brasil, a indústria têxtil e de confecção caracteriza-se em âmbito global por seus aspectos de criatividade, tecnologia, profissionalismo e dimensões de seu parque industrial, posicionando o país na quarta posição entre os maiores produtores de vestuário e quinta posição

entre os produtores de manufaturas têxteis, sendo referência mundial nas categorias de produção têxtil, como: *beachwear*, *jeanswear* e *homewear* (BRASIL, 2017).

A indústria têxtil marcou papel incumbente na industrialização do país, visto que o ramo têxtil foi o primeiro setor industrial a possuir maquinários, caracterizando-se pioneiro no processo de industrialização no Brasil, durante o período da Revolução Industrial. Esse processo de adaptação dos meios artesanais para os meios mecânicos foi excepcional para atingir a escala global e apresentar inúmeras inovações diárias (FEBRATEX, 2019).

O Brasil apresenta a maior cadeia produtiva completa da indústria têxtil no ocidente, seguimento de quase 200 anos. Segundo a Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT) no ano de 2019, o Brasil faturou em torno de 176,8 bilhões de reais, gerando cerca de 16,7% de empregos no país (ABIT, 2019; FEBRATEX, 2019). A ABIT (2019) salienta que a moda brasileira é influência mundial e encontra-se entre as cinco melhores semanas de moda do mundo, tendo mais de 100 faculdades e escolas de moda no país.

No desenvolvimento no ramo têxtil considera-se as influências da Indústria 4.0 ou 4.^a Revolução Industrial, a qual o mundo vivencia – adentrando na 5.0 e avistando a 6.0 – que reflete e justifica a constante evolução em diversos outros ramos industriais, pois engloba desta tecnologia à manufatura, potencializando o avanço e inovação das tecnologias computacionais, da comunicação e informação (CUNHA, 2018). A 4.^a Revolução Industrial apresenta inovações globais, como a mecanização das tarefas que antes eram exclusivas do intelecto humano, contudo, a inteligência artificial e as técnicas de *machine learning* e nanotecnologia possibilitam que as máquinas executem tarefas nunca antes realizadas sem a tarefa manual no setor têxtil (ROCKENBACH, 2018; CUNHA, 2018).

De acordo com Cunha (2018), a cada dia a robótica possibilita tornar independente processos que até então eram executados por humanos ou animais e essa autonomia tecnológica torna-se nítida na indústria têxtil, uma vez que funções específicas do respectivo ramo que antes exigiam trabalho manual ou animal exaustivo, estão sendo substituídas por robôs que, a cada evolução inovadora, obtêm mais chances de sucesso.

2.1.1 Indústrias Têxteis catarinenses

As indústrias têxteis do Estado de Santa Catarina possuem grande representatividade em âmbito brasileiro, sendo o segundo maior polo têxtil do país, atrás de São Paulo, conforme os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015). O polo têxtil

catarinense localiza-se no Vale do Itajaí, destacando as cidades de Brusque e Blumenau. A ampla produção na região se dá a partir da presença de rios que percorrem pelo Vale do Itajaí, visto que o vasto consumo de água no processo produtivo têxtil é a principal característica deste ramo (MARIANO, 2011).

Luclktenberg (2004), destaca que a consolidação nacional da indústria têxtil no Vale do Itajaí ocorreu durante a primeira e segunda Guerra Mundial, com o fornecimento de malhas e tecidos nos grandes mercados do Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul e São Paulo. As indústrias passaram a atuar no mercado nacional e internacional, e especializaram-se na fabricação de malhas e tecidos para cama, mesa e banho, gerando conhecimento pós-guerra, devido ao crescimento acelerado do ramo têxtil.

Os números das indústrias têxteis catarinenses são promissores, uma vez que o valor bruto da produção gira em torno de 22,8 bilhões de reais e 160 mil trabalhadores atuam de forma direta ou indiretamente neste setor (OBSERVATÓRIO FIESC, 2019). Em 2017, o estado catarinense responsabilizou-se por 18,5% dos estabelecimentos industriais e 21,8% de empregos em indústrias (MORILO, 2018).

2.2 EFLUENTES TÊXTEIS

Apesar do alto índice de empregabilidade e valor econômico acarretado, as indústrias têxteis são geradoras de efluentes, oriundos de seus processos produtivos que são despejados no meio ambiente, de modo direto ou por meio de esgotos, descartando em torno de 50 a 100 L de efluentes por quilo de tecido produzido (ARSLAN-ALATON et al., 2008). Tal produção necessita de monitoramento da geração e gerenciamento para descarte com o propósito de redução interna e proporcionando possibilidades de reuso destes efluentes (BRASIL, 2017).

A natureza do efluente têxtil gerado depende do tipo de fibra e produtos químicos utilizados, no qual apresentam, muitas vezes, altos valores de potencial hidrogênio (pH) e temperatura, além de grande número de contaminantes, incluindo: ácidos, altas concentrações de matéria orgânica, matéria não-biodegradável, substâncias tóxicas, detergentes, óleos e gorduras, sólidos suspensos e dissolvidos, alcalinidade e um dos seus principais poluentes, os corantes. Apesar de serem biologicamente degradáveis, os efluentes situam-se na classe dos recalcitrantes, pois apresentam difícil biodegradação (PALA; TOKAT, 2002; OZMIHCI; KARGI, 2006; CHRISTIE, 2007; LUCAS et al., 2008; LEECHART et al., 2009).

Broadbent (2001) salienta que por muitos anos, a indústria têxtil era a principal fonte de poluição das águas, mas que a sensibilização social para esse impasse resultou em legislações rigorosas de proteção ao meio ambiente que determina o limite de contaminante nos efluentes que podem ser liberados pelas indústrias, gerando maior controle sobre contaminantes e montantes liberados. Apesar disso, Horvat et al. (2012) afirmam que ainda assim corantes sintéticos que são poluentes emergentes não foram incluídos em programas de monitoramento ou em legislação pertinente a qualidade ambiental, mas estão introduzidos no ambiente devido às atividades antrópicas.

2.2.1 Corantes e produtos químicos

Dos produtos químicos fabricados para utilização das indústrias no ramo têxtil, pode-se destacar: agentes redutores, antimofos, antiespumantes, branqueadores ópticos, carriers, corantes, desengomantes, dispersantes, encorpantes, sequestrantes, umectantes e fixadores (EXATACOR, 2020). Dentre estes, os corantes que adicionam e alteram cor na substância ou material no qual foram adicionados são os poluentes potenciais utilizados pelas indústrias têxteis mais perigosos.

Devido ao seu fim para coloração, os corantes são comparados com pigmentos, mas conforme exemplifica Broadbent (2001) e Zollinger (2003) a diferença de ambos se dá na solubilidade. O corante é solúvel no meio de aplicação, na maioria das vezes água, e o pigmento é insolúvel e não penetra no tecido, permanece na superfície e possui maior facilidade de remoção. Todavia, a coloração dos corantes é tóxica e considera-se como poluição visível, pois reduz a transmissão de luz para a água, diminui os limites de fotossíntese e interfere no crescimento de organismos aquáticos (FERNÁNDEZ et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2007). Como afirmam Guaratini e Zanoni (2000):

A fixação do corante à fibra é feita através de reações químicas, da simples insolubilização do corante ou de derivados gerados e ocorre usualmente em diferentes etapas durante a fase de montagem e fixação. Entretanto, todo processo de tintura envolve como operação final uma etapa de lavagem em banhos correntes para retirada do excesso de corante original ou corante hidrolisado não fixado à fibra nas etapas precedentes (GUARATINI; ZANONI, 2000, p. 71).

Os corantes são utilizados no processo de tingimento durante a produção têxtil, responsável por adicionar cor aos fios dos tecidos, fator fundamental no comércio têxtil e que necessita apresentar alta afinidade e uniformidade para resistir aos agentes de desbotamento durante uso inicial e prolongado (GUARATINI; ZANONI, 2000). Estima-se que de 10% a 15% dos corantes utilizados nos processos produtivos têxteis são liberados como resíduos das etapas de produção dos corantes e perdas subsequentes ao processo de tingimento das fibras (GUPTA; SUHAS, 2009; LANG, 2009).

O corante possui papel central de beneficiamento dos tecidos e pode ser classificado como sintético ou natural. Conforme a crescente preocupação social com o meio ambiente, os corantes naturais ganharam destaque no mercado, como por exemplo, a andiroba, o jenipapo e urucum, que ainda são estudados no Brasil para uso têxtil, mas que são utilizados por povos indígenas desde os primórdios (MAGALHÃES, 2013).

O desafio atual das indústrias têxteis é aplicar o uso dos corantes naturais de modo viável economicamente e de sustentabilidade, até que atinjam níveis de qualidade semelhantes aos sintéticos. Enquanto os corantes naturais não conseguem atender a demanda da indústria, inúmeros compostos químicos de coloração foram sintetizados nos últimos 100 anos, dentre os quais, cerca de 10.000 são produzidos em escala industrial, mas estima-se que 2.000 tipos de corantes estão disponíveis para indústria têxtil (GUARATINI; ZANONI, 2000).

Os corantes utilizados pelas indústrias têxteis são classificados conforme sua estrutura química ou com o método o qual são fixados à fibra. Guaratini e Zanoni (2000) destacam os: corantes reativos; diretos ou substantivos; ácidos; azoicos; tina; enxofre; dispersos, entre outros; sendo os ácidos e reativos os mais utilizados.

Os autores Gupta e Suhas (2009), Broadbent (2001), Guaratini e Zanoni (2000) e Carr (1995) caracterizam corantes solúveis em água mais utilizados no tingimento. Os corantes ácidos tingem fibras com sítios catiônicos. Nos corantes básicos, a adsorção é através do uso de banho em condições alcalinas. Corantes diretos são aplicados em fibras celulósicas por meio do banho neutro ou levemente alcalino. Os corantes reativos formam ligações covalentes com os substratos adequados. Conforme Sonai (2012), por mais que os dispersivos estejam classificados no grupo dos corantes solúveis em água, são insolúveis e utilizados para fibras hidrofóbicas por meio de uma fina dispersão aquosa.

2.2.2 Efeitos dos efluentes têxteis no meio ambiente

Azevedo (2010), salienta que a indústria têxtil é responsável pela maior geração de poluentes no meio ambiente, que, ao não serem tratados corretamente, são indutores de diversos impasses referentes a contaminação e poluição da natureza. Resíduos de corantes e produtos utilizados no processo produtivo têxtil, geram conturbações ambientais que ameaçam a fauna e flora, a qual, podem alterar o ecossistema e comprometer a vida, além de serem cancerígenos e mutagênicos (KARTHIKEYAN et al., 2017). Tomassoni (2019), destaca que os efluentes podem gerar impasses eco toxicológicos de curto a longo prazo, devido a seus compostos que possuem efeitos de acumulação e que podem atingir concentrações superiores à dose letal de alguns organismos, levando à morte.

O uso de corantes gera potencial efeito negativo ao meio ambiente, à saúde humana e animal, necessitando de regularização e monitoramento por parte das indústrias. Para minimizar possíveis adversidades decorrentes da produção e aplicação de corantes, no ano de 1974 foi fundada a associação internacional *Ecological and Toxicological Association of the Dyestuff Manufacturing Industry* (ETAD), que coordena a fabricação de corantes. A ETAD desenvolve fichas de segurança com dados sobre potenciais riscos de corantes e seus intermediários (CHRISTIE, 2007; ZOLLINGER, 2003).

Broadbent (2001) e Christie (2007) destacam que a presença de coloração na água é indesejável por indicar a presença de inúmeras substâncias químicas auxiliares de tingimento. Relata-se que mais de 90% dos produtos químicos orgânicos e auxiliares de pré-tratamento e tingimento não pigmentam na fibra, e até compostos químicos simples como o ácido acético, aumentam significativamente a demanda bioquímica de oxigênio (DBO). A toxicidade de corantes pode ocasionar irritação e sensibilidade da pele humana, e geralmente são causadas por corantes reativos e dispersivos (CHRISTIE, 2007).

Santos e Fernandes (2012) afirmam que para diminuir, e até cessar, a poluição causada pelas indústrias têxteis, estas necessitam: escolher equipamentos de produção como filtros de remoção de materiais particulados e gasosos, e tanques para tratamento da água; deve-se prevalecer o uso de produtos biodegradáveis e não tóxicos; a reciclagem necessita ser constante em materiais que não podem ser reaproveitados; e recursos energéticos necessitam ser utilizados de modo mais racional.

2.3 TRATAMENTO PARA REMOÇÃO DE COR NOS EFLUENTES TÊXTEIS

A grande liberação de efluentes da indústria têxtil por meio de descargas de água residuárias é preocupante. Twardokus (2004) relata que o desenvolvimento de tecnologias adequadas para o tratamento de efluentes é o grande interesse atualmente, devido ao aumento da conscientização e leis ambientais.

Os fatores de origem, caracterização, volume do efluente e as metas delineadas após seu tratamento são decisivos para a escolha do método de tratamento dos efluentes têxteis. Até o momento, não há um único tipo de tratamento que seja completamente eficiente e economicamente atraente para ser utilizado no processo de remoção da cor de efluentes têxteis, contudo, estudos fomentaram avanços na área ambiental (SANTOS, 2006; CHAGAS, 2009).

Após quase 10 anos da afirmação de Chagas (2009), os autores Almeida, Dilarri e Corso (2016) reafirmam que não há um sistema geral de tratamento para efluentes, mas que existem diversas formas para tratar, ainda assim, nenhuma é eficaz e de baixo custo. Cada método de tratamento tem suas particularidades e eficiência na remoção de cor em determinados parâmetros, além da escolha do melhor método, deve-se considerar o custo e os aspectos sustentáveis.

De acordo com Chagas (2009), os métodos mais utilizados são: o tratamento físico-químico, geralmente para corantes muito coloridos e pouco biodegradáveis; e o tratamento biológico, para as matérias biodegradáveis que estão sendo dissolvidas.

2.3.1 Tratamento físico-químico

O tratamento físico-químico de efluentes é responsável pela remoção de poluentes inorgânicos, materiais insolúveis, metais pesados, material orgânico não biodegradável, sólidos em suspensão, fósforo orgânico solúvel, nitrogênio, DBO, DQO, bactéria e vírus, sólidos em suspensão, sólidos coloidais e soluções que contribuam para turbidez (TERA AMBIENTAL, 2020).

O processo de tratamento físico-químico consiste nos métodos de: coagulação, acumula impurezas em suspensões finais ou dissolvidas em partículas maiores que possam ser removidas por decantação ou filtração; Flocculação, os flocos são agregados às partículas dissolvidas ou em estado coloidal por meio da adsorção; Decantação, os flocos são sedimentados e as partículas são levadas até o fundo do decantador para constituírem lodo químico; Por fim, há separação entre o lodo e os efluentes (TERA AMBIENTAL, 2020).

A coagulação, oxidação por ozônio, irradiação, precipitação-floculação com Fe(II)/Ca(OH)_2 e adsorção destacam-se como métodos que possuem custo elevado e sua utilização é inviável para a maioria das indústrias têxteis. O método de coagulação ou floculação combinadas com flotação e filtração são viáveis economicamente e são utilizados em larga escala, possibilitando tratamento satisfatório.

2.3.2 Tratamento biológico

Saratale et al. (2011) exemplificam que o tratamento biológico é baseado na biorremediação. Um determinado micro-organismo pode transformar diferentes substâncias químicas tóxicas em substâncias menos nocivas, por meio da biotransformação causada por diferentes tipos de enzimas produzidas por diversos tipos de micro-organismos que podem ser utilizados no processo de degradação.

Como todo método de tratamento, o biológico possui vantagens e desvantagens, o baixo custo destaca-se como principal fator favorável para a utilização deste método. A digestão anaeróbia de efluentes têxteis é uma tecnologia promissora desde que aliada ao custo, eficiência e segurança ambiental (BALAMURUGAN; THIRUMARIMURUGAN; KANNADASAN, 2011).

No entanto, segundo Meyer, Carlsson e Oellermann (1992), micro-organismos anaeróbicos são eficientes na degradação de alguns corantes, contudo, produzem aminas aromáticas que podem ser carcinogênicas e tóxicas. Isso devido aos corantes têxteis serem parcialmente resistentes à degradação microbiana aeróbia, sendo necessário um tratamento complementar. Outro fator dificultoso para utilizar o tratamento biológico é a necessidade de grande área para tratar grandes vazões, sendo os produtos químicos utilizados no processo industrial prejudiciais às condições de vida das bactérias e seus ciclos reprodutivo.

Tan et al. (2016) afirmam que dentre os tipos de tratamentos utilizados, o tratamento biológico é considerado uma alternativa melhor que o tratamento físico-químico para a remoção de corantes das águas, uma vez que possuem menor custo, eficiência e geram menos poluição secundária.

2.3.3 Adsorção

Um dos métodos que vem ganhando destaque é a adsorção, que provou ser um dos métodos físico-químicos mais eficazes para a remoção de poluentes, alcançando altos índices de eficiência e reduzindo a formação de lodo. Trata-se de um processo de separação com importante aplicação na solução de problemas ambientais, principalmente para descontaminação de água ou ar poluídos (ADINATA et al., 2007).

A adsorção é um processo de transferência de massa que estuda a habilidade de certos sólidos em concentrar em sua superfície substâncias existentes em fluidos líquidos ou gasosos, possibilitando a separação dos componentes desses fluidos (NASCIMENTO et al., 2014). Denomina-se adsorbato a espécie que acumula-se na superfície do material e adsorvente a superfície sólida na qual o adsorbato é adsorvida (KUNZ et al., 2002).

Na adsorção, moléculas estão distribuídas e confinadas à superfície dos microporos da estrutura sólida. Assim, somente os sólidos que contenham grandes áreas de superfície interna serão mais eficientes como adsorventes (RADECKI, 1999; COULSON; RICHARDSON, 1979). Este processo depende da existência de um campo de força que pode ser físico ou químico, que atrai a molécula de algum constituinte da fase líquida para a superfície do sólido adsorvente. Na adsorção física, forças atuantes são as intermoleculares de Vander Waals e eletrostáticas, já na adsorção química ocorre ligações químicas (RADECKI, 1999; COULSON; RICHARDSON, 1979).

Um fator incumbente da adsorção é o estudo da cinética e isoterma de adsorção do conjunto sólido-líquido. O estudo cinético possibilita aperfeiçoar parâmetros de controle do processo de adsorção influenciados por fatores como ordem de reação, constante de velocidade e energia de ativação, assim como, determinar o tempo necessário para que ocorra o equilíbrio da adsorção (CHATTERJEE et al., 2007).

Quando o adsorbato é colocado em contato com o adsorvente, moléculas ou íons tendem a fluir do meio aquoso para a superfície externa do adsorvente e nos macroporos, mesoporos, microporos e submicroporos até que a concentração de soluto na fase líquida (C_e) permaneça constante. Nesse estágio, é dito que o sistema atingiu o estado de equilíbrio e a capacidade de adsorção do adsorvente (q_e) é determinada (METCALF; EDDY, 2015).

2.4 ADSORVENTES

Dentre os diversos adsorventes utilizados nas indústrias, destacam-se: sílica gel, carvão ativado, argilas ativadas, alumina ativada, entre outros. O carvão ativado comercial é o

adsorvente mais utilizado para remoção de corantes, sendo um material carbonáceo com alto grau de porosidade, grande área superficial que pode variar de 500 a 1500 m².g⁻¹, podendo apresentar grupos funcionais na superfície que ajudam na adsorção (RUTHVEN, 1984).

O carvão ativado comercial apresenta desvantagens, como: alto valor financeiro, ineficiência com alguns corantes específicos e dificuldade no processo de regeneração (CRINI, 2006). Dessa forma, há o interesse na produção de adsorventes alternativos para substituí-lo, destacando-se materiais sólidos naturais com baixo custo e alta disponibilidade na natureza, como os subprodutos da produção agrícola.

Nesta linha de produção de novos adsorventes, destaca-se os bioadsorventes que são adsorventes oriundos de biomassa inativa, no qual apresentam em sua parede celular uma variedade de grupos orgânicos que podem reter corantes por atração eletrostática e troca iônica (CALVETE, 2011). Os bioadsorventes são ricos em celulose, hemicelulose e pectina, compostos que auxiliam na etapa física da adsorção (CARDOSO, 2012).

Alguns bioadsorventes foram utilizados para a remoção de corantes em meio aquoso, apresentando alta eficiência de remoção, como: casca de coco, caroço de cereja (AHMAD, 2009), grão de milho (WENG, 2009), farelo de trigo (HARERELKAS, 2009), fibra de casca de coco (VIJAYARANGHAVAN, 2009), casca de eucalipto (VAGHELA et al., 2005), casca de laranja (GOODELL et al., 2004). Há a presença de celulose, hemicelulose e lignina nas folhas, sendo a lignina o principal componente da biomassa responsável pela adsorção, composta por alto teor de carbono e por ter semelhante estrutura ao carvão betuminoso (ROSS; POSSETI, 2018).

Estudos revelam resultados satisfatórios na remoção de poluentes ao efetuar-se a adsorção com folhas de salgueiro (LIU et al., 2016), folhas de palmeiras (DENIZ; KARAMAN, 2011; SOLIMAN et al., 2016) e folhas de abacateiro (TOMASSONI, 2019). A quantidade relativa de lignina presente nas folhas variam entre as espécies, portanto, não há estudos que garantem a eficiência de todos os adsorventes provenientes de folhas de árvores.

2.5 ABACATEIRO (*PERSEA AMERICANA MILL.*)

A *Persea americana Mill.*, popularmente conhecida como Abacateiro, possui folhas simples, alongadas em formato de elipse ou oval-acuminadas, inodoras e com pouco fator adstringente. O Abacateiro tem seu crescimento relativamente rápido, alcançando 20 metros de altura, e caracteriza-se por sua copa com alta densidade de folhas (BRASIL, 2010).

É cultivado principalmente na região sul e sudeste do Brasil, com os estados de São Paulo, Minas Gerais e Paraná em destaque. Sua produção para fins comerciais gera cerca de 157,6 mil toneladas de abacate por ano, aproximadamente, em uma área de 9,4 mil hectares. Em 2013, conforme a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), o estado catarinense produziu cerca de 11,5 toneladas de abacate (FAO, 2016)

Muluh et al. (2017) estudou a eficiência da semente do abacate como matéria prima para carvão ativado para remover fenol através do processo de adsorção. Regti et al. (2017) estudou o uso do planejamento fatorial para otimização do processo de adsorção de corantes utilizando carvão ativado de *Persea americana Mill.* Tomassoni (2019) utilizou folha do Abacateiro na produção de carvão ativado com fins voltados para remoção de corante têxtil encontrando resultados acima de 90% de remoção.

2.6 LEGISLAÇÃO DE PADRÕES E LANÇAMENTO DE EFLUENTES

A Resolução CONAMA n.º 357, de 17 de março de 2005, publicada no Diário Oficial da União de 18 de março de 2005, “dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências”. Estipula em sua seção II, Art. 15:

- I - não será permitida a presença de corantes provenientes de fontes antrópicas que não sejam removíveis por processo de coagulação, sedimentação e filtração convencionais;
- II - [...] não deverá ser excedido um limite de 1.000 coliformes termotolerantes por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 6 (seis) amostras coletadas durante o período de um ano, com frequência bimestral.
- [...] III - cor verdadeira: até 75 mg Pt/L;
- IV - turbidez: até 100 UNT;
- V - DBO 5 dias a 20°C até 5 mg/L O₂;
- VI - OD, em qualquer amostra, não inferior a 5 mg/L O₂;
- VII - clorofila *a*: até 30 µg/L;
- VIII - densidade de cianobactérias: até 50000 cel/mL ou 5 mm³/L; e
- IX - fósforo total:
 - a) até 0,030 mg/L, em ambientes lênticos; e
 - b) até 0,050 mg/L, em ambientes intermediários, com tempo de residência entre 2 e 40 dias, e tributários diretos de ambiente lêntico (BRASIL, 2005).

Com base na respectiva legislação vigente, entende-se as condições e padrões de liberação de efluentes têxteis.

3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

Nesta seção, descreve-se os aspectos metodológicos que auxiliaram na construção desta pesquisa e na análise para obtenção de resultados experimentais, bem como descreve os procedimentos e materiais utilizados para a realização dos experimentos.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Quanto a natureza deste estudo, o mesmo classifica-se como pesquisa básica, visto que gera novos conhecimentos, contudo, sem previsão de aplicação prática. A questão de pesquisa envolve o método qualitativo em que atua com significados, motivos, aspirações, crenças, valores e atitudes (MINAYO, 2001). Também envolve método quantitativa, uma vez que as melhores condições experimentais para a remoção da concentração de cor utilizando o adsorvente proveniente da folha de Abacateiro, são apresentadas por meio de métodos estatísticos.

Do ponto de vista dos objetivos é uma pesquisa descritiva e exploratória, pois proporciona familiaridade com determinado problema e torna-o explícito para construir hipóteses (GIL, 2007). A pesquisa descritiva exige informações quanto ao tema abordado e descreve aspectos de determinada população ou fenômeno (GIL, 2007). Os procedimentos técnicos abordam a pesquisa documental, realizada em *websites*, bem como em pesquisas bibliográficas, realizada em literaturas científicas nacionais e internacionais obtidas em periódicos.

3.1.1 Procedimentos metodológicos

Foram realizados experimentos da redução de coloração de efluente têxtil através do método de adsorção com o uso de carvão ativado proveniente de folhas de Abacateiro.

3.1.1.1 Local

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Reuso das Águas (LaRA), associado ao Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA) do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (ESM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

3.1.1.2 Produção do adsorvente

O carvão ativado foi produzido com folhas de Abacateiro (*Persea americana Mill.*), de acordo com a metodologia proposta por Tomassoni (2019). As folhas utilizadas na produção do carvão ativado foram recolhidas após sua queda natural, posteriormente higienizadas com água destilada para remoção de partículas não provenientes da própria folha.

Após esta etapa, ocorreu a secagem do material, primeiramente em temperatura ambiente e posteriormente em estufa a 60°C durante 48 horas. As folhas foram trituradas e peneiradas, a fim de garantir um material com tamanho conhecido de partículas e aspecto homogêneo.

Para o processo de carbonização do carvão ativado, o pó das folhas anteriormente peneirado foi carbonizado através do forno Mufla da marca Hipperquímica em temperatura de 800°C e a taxa de aquecimento de 10°C.min⁻¹ por 1 hora. Após a carbonização, o carvão ativado foi armazenado em recipiente hermeticamente fechado até seu momento de uso.

3.1.1.3 Caracterização do efluente têxtil

As amostras de efluente têxtil foram cedidas por uma empresa de tinturaria localizada em Brusque/SC, a qual presta serviços de tingimento e acabamento para diversas malharias. A empresa possui ampla gama de corantes, pois tingue tecidos fornecidos pelos próprios clientes conforme a coloração requerida, resultando em efluentes bastante diversificados.

Na empresa existe uma estação de tratamento que consiste em peneiramento, trocador de calor, equalização, lodo ativado, coagulação e decantação, tratando tanto o efluente gerado pela lavagem e tingimento dos tecidos, como os efluentes provenientes dos banheiros e do refeitório.

Para a realização do experimento, as amostras do efluente foram coletadas na saída do decantador secundário (efluente pós-biológico de lodos ativados) da respectiva empresa, com uso de galões de 10 L, transportada em condições refrigeradas, armazenadas no freezer para preservar suas características até o momento das análises.

3.1.2 Planejamento fatorial experimental de DCCR

O Delineamento Composto Central Rotacional é um dos delineamentos mais populares para ajustar os modelos de até segunda ordem, permitindo que haja análise estatística dos dados obtidos com o mínimo de experimentos em termos dos parâmetros principais, dentro de certo nível de confiança (MYERS; MONTGOMERY, 1995; CALADO; MONTGOMERY, 2003). Este método permite obter um modelo matemático válido e representativo para a análise do fenômeno estudado.

Com base na literatura científica (PODKOSCIELNY; NIESZPOREK; SZABELSKI, 2006; IMMICH, 2016; TOMASSONI, 2019) e de modo a obter melhor estimativa de operação no processo de adsorção, o DCCR foi analisado com dois parâmetros influenciadores no processo, sendo eles: pH da solução e velocidade de agitação (rpm).

Na fase de planejamento, utilizou-se quatro ensaios com pontos axiais (+1,41 e -1,41), 4 ensaios com pontos centrais (0) e quatro ensaios com pontos fatoriais (+1 e -1), ou seja, foram realizados 12 ensaios de forma duplicada, totalizando 24 ensaios, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Matriz de dados do DCCR para o processo de adsorção.

Ensaios	x2	pH	x1	Velocidade de Agitação (rpm)
1	1	10	1	200
2	1	10	-1	80
3	-1	4	1	200
4	-1	4	-1	80
5	0	7	0	140
6	0	7	0	140
7	0	7	0	140
8	0	7	0	140
9	1,41	11,26	0	140
10	-1,41	2,77	0	140
11	0	7	1,41	224,6
12	0	7	-1,41	55,4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os ensaios adsorptivos do planejamento foram realizados em batelada com 150 mL de efluente têxtil (em *erlenmeyer* de 250 mL), misturados a 2g do adsorvente proveniente das folhas de *Persea americana Mill.* em banho termostático (Dubnoff NT232). A dose de adsorvente foi constante em todas as análises, pois a influência deste parâmetro não foi alvo de análise no presente trabalho. O pH da solução e a velocidade de agitação foram ajustados de acordo com

a matriz de dados do planejamento fatorial (Tabela 1). O tempo de contato utilizado para os experimentos foi fixado em 24 horas em temperatura ambiente ($25^{\circ}\text{C} \pm 1$). Posteriormente, as amostras foram filtradas em membranas de acetado de celulose com porosidade de $0,45\mu\text{m}$, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Filtração com membrana de acetado de celulose com porosidade de $0,45\mu\text{m}$.



Fonte: Autor.

Após a filtração das amostras, a remoção da cor do efluente foi avaliada por espectrofotometria, através da leitura da absorvância, usando espectrofotômetro (Hach modelo DR/5000) no comprimento de onda na faixa do visível (465nm e 455nm), conforme determina a Resolução CONAMA n.º 357 de 17/03/2005. Nas condições experimentais, pode-se aplicar a Lei de Lambert-Beer entre as concentrações de cor e a absorvância das soluções. A remoção dos corantes (RC%) foi avaliada conforme a Equação 1.

$$\text{RC (\%)} = \frac{C_{\text{CST}} - C_{\text{CT}}}{C_{\text{CST}}} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Na Equação 1, C_{CST} corresponde ao valor da concentração de cor no efluente sem o tratamento, enquanto C_{CT} corresponde ao valor da concentração de cor do efluente tratado.

Posteriormente, a análise estatística dos resultados dos ensaios do planejamento foi realizada por meio do programa Statistica® (Statsoft, Inc), que possibilitou a obtenção do modelo matemático relacionando à remoção da concentração de cor com as variáveis testadas. A representação gráfica do modelo e o auxílio do gráfico de superfície de resposta, orientou a determinação da região ótima de operação do processo de adsorção, para então ser realizado ensaios adsorptivos cinéticos.

3.1.3 Estudo da cinética de adsorção

Para determinar o tempo de contato em que o equilíbrio de adsorção é atingido, os experimentos cinéticos foram realizados em banho termostático (Dubnoff NT232), utilizando 150 mL de efluente dispostos em *erlenmeyers* de vidro (com capacidade máxima de 250 mL, não estéreis e fechados com papel alumínio) com 2g de adsorvente, velocidade de agitação de 220 rpm e pH da solução 7. Foram pré-definidos intervalos temporais para retiradas de alíquotas das amostras, sendo eles: 15; 30; 45; 60; 90; 120; 180; 240; 300 e 1440 minutos. Todas as amostras foram preparadas em duplicada e identificadas por meio de etiquetas enumerando-as, conforme a Figura 2.

Figura 2 – Ensaio cinéticos.



Fonte: Autor.

Conforme o tempo de agitação previamente determinado, cada efluente presente nos ensaios foram filtrados em membrana de acetato com porosidade de $0,45\mu\text{m}$. Determinando as

concentrações de cor presentes no efluente através de leituras de absorvância no espectrofotômetro, conforme o Item 3.1.2.

Com os valores obtidos através da análise em espectrofotômetro dos ensaios retirados em seus devidos intervalos de tempo, é possível a realização da curva cinética (concentração X tempo), a fim de determinar o tempo de equilíbrio de adsorção. O equilíbrio é atingido quando a concentração permanece constante ao longo do tempo.

Para identificar o mecanismo cinético que rege o processo, os resultados experimentais foram examinados pelos modelos de *pseudo-primeira ordem*, *pseudo-segunda ordem*, *difusão intrapartícula* e a *Equação de Elovich* e sua validade determinada pelo coeficiente de correlação (R^2) (SCHULTZ, 2016 apud TOMASSONI, 2019).

A equação linearizada da *pseudo-primeira ordem* de Lagergren (1898) é dada por:

$$\text{Log}(q_e - q) = \text{Log } q_e - \frac{K_1 t}{2,303} \quad (\text{Equação 2})$$

Na Equação 2, q_e e q : quantidade da concentração de remoção de cor removida; Quando no equilíbrio por unidade de massa de adsorvente ($mg \cdot g^{-1}$) o tempo é dado em minutos e representa o instante que se alcança o equilíbrio; K_1 : constante de adsorção de primeira ordem.

De acordo com Ho e Mackay (1999), o modelo de *pseudo-segunda ordem* descreve bem o processo de adsorção química e sua equação linearizada se dá da maneira como mostra a Equação 3:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (\text{Equação 3})$$

Na Equação 3, K_2 é a constante de segunda ordem de adsorção ($g \cdot mg^{-1}$).

O modelo da linearização de difusão intrapartícula é dada pela Equação 4:

$$q_{t=K_{in}} t^{1/2} + C \quad (\text{Equação 4})$$

Na Equação 4, K_{in} é a constante de difusão intrapartícula ($mg \cdot g^{-1} \cdot min^{1/2}$), e C é uma constante relacionada com a resistência à difusão ($mg \cdot g^{-1}$).

Há também o modelo da equação de Elovich, descrito pela Equação 5:

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln(t) \quad (\text{Equação 5})$$

Na Equação 5, β é a constante de dessorção (mg. g^{-1}), e α é a taxa inicial de adsorção (mg. g^{-1}).

4 RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir dos experimentos e análises efetuadas no presente estudo.

4.1 PLANEJAMENTO FATORIAL EXPERIMENTAL DE DCCR DO PROCESSO DE ADSORÇÃO

A fim de comprovar a eficiência de remoção da concentração de cor com o processo de adsorção utilizando o adsorvente proveniente das folhas de *Persea americana Mill.* A Tabela 2, apresenta resultados do DCCR proposto neste estudo. Nesta etapa, identifica-se os parâmetros ideais do experimento e o grau de influência das variáveis escolhidas na taxa de remoção da concentração de cor do efluente têxtil.

Tabela 2 – Matriz dos resultados obtidos através do DCCR.

Ensaio	Variáveis independentes		Variável dependente
	Velocidade de agitação(rpm)	pH	Remoção de cor (%)
1	200	10	97,31%
2	80	10	90,86%
3	200	4	97,66%
4	80	4	92,34%
5	140	7	95,89%
6	140	7	96,15%
7	140	7	96,79%
8	140	7	95,11%
9	140	11,26	88,61%
10	140	2,77	93,24%
11	224,6	7	95,23%
12	55,4	7	90,60%

Fonte: Elaborado pelo autor.

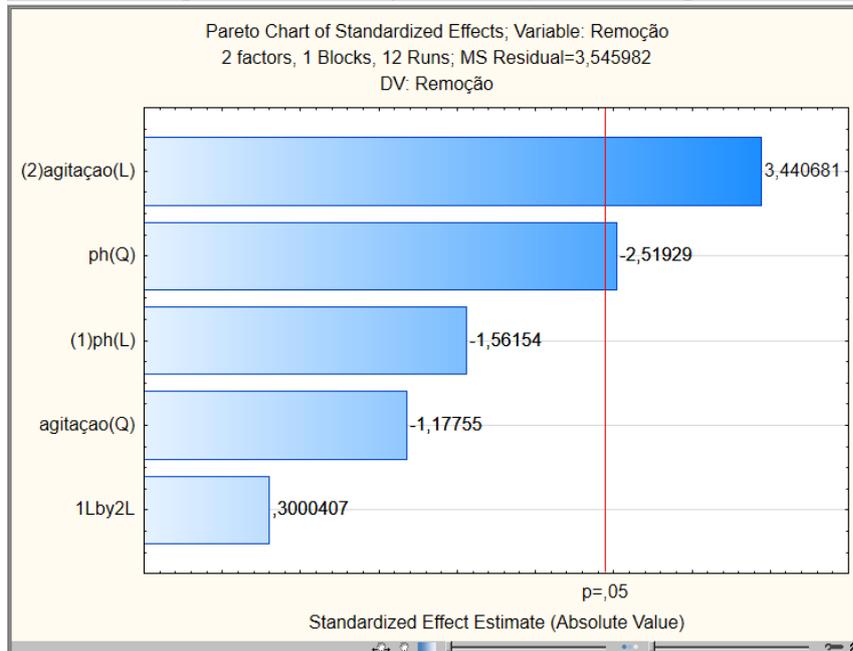
Nota-se pela Tabela 2 que a maioria dos resultados apresentou eficiência acima de 90%, apontando como melhores ensaios de remoção da concentração de cor do efluente têxtil, os ensaios 1 e 3, com velocidade de agitação de 200 rpm e pH da solução 10 e 4. Já a menor porcentagem de remoção da concentração de cor pelo adsorvente proveniente das folhas de *Persea americana Mill.* foi o ensaio 9, com velocidade de agitação de 140 rpm e pH da solução 11,26. Vale salientar que por se tratar de um efluente têxtil real a condução do experimento e suas particularidades influenciam no resultado final, assim como as características do efluente no momento das análises.

Estes resultados corroboram com o estudo realizado por Tomassoni (2019), em que a melhor configuração de remoção da concentração de corantes utilizando o processo de adsorção com carvão ativado proveniente da folha de *Persea americana Mill.* em efluente têxtil sintético, ocorreram com velocidade de agitação superior a 100 rpm e dose de adsorvente entre 5 e 7,5 $g.L^{-1}$, indicando que a velocidade de agitação tem influência significativa no processo de adsorção. Entretanto, estudo realizado por Immich (2006), no qual avaliou a remoção de corante utilizado na indústria têxtil através de adsorção com carvão ativado proveniente de folhas de *Azadirachta Indica*, a melhor configuração de remoção ocorreu com o pH igual a 10 não sendo significativo a velocidade de agitação.

Nota-se que para o presente estudo o pH interferiu, com efeito negativo, na eficiência de remoção da concentração de cor do efluente, diferentemente do que foi encontrado no estudo de Immich (2006), em que o meio básico se demonstrou mais eficiente para a remoção do determinado corante. A diferença de resultado para o estudo presente, pode ter ocorrido em função da natureza química do adsorbato e a diferença entre as demais variáveis presentes nos estudos.

Buscando a validação do ajuste dos modelos propostos com o resultado obtido dos testes realizados realizou-se a análise de variância (ANOVA). O método de análise utilizado foi o gráfico de Pareto. Para que uma variável seja estatisticamente significante, o valor de p deve ser menor que 0,05 ao nível de significância 95%. Observa-se na Figura 3, a significância dos resultados, com 95% de confiança, através da linha vermelha ($p=0,05$).

Figura 3 – Gráfico de Pareto para remoção da concentração de cor de fluente têxtil através de adsorção com carvão ativado proveniente de folhas de *Persea americana Mill.* L – Termos lineares. Q – Termos quadráticos. 1Lby2L interação entre os parâmetros analisados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As extensões horizontais das barras revelam o resultado estatístico do efeito das variáveis sobre o resultado, esses efeitos podem ser lineares (L), quadrático (Q) e de interação linear das variáveis escolhidas para análise. De acordo com a Figura 3, conclui-se que o termo linear da variável velocidade de agitação apresenta maior significância estatística, com efeito positivo, ou seja, quanto maior a velocidade de agitação, maior será a remoção da concentração de cor do efluente estudado.

Já a variável pH da solução, em termos quadráticos mostrou-se significativa com efeito negativo, ou seja, quanto maior o pH da solução, menor será a porcentagem de remoção da concentração de cor. O termo quadrático da variável velocidade de agitação não se mostrou estatisticamente significativo. O mesmo ocorreu para os termos lineares da variável pH da solução e a interação entre as 2 variáveis.

No estudo realizado por Tomassoni (2019), o termo quadrático que representava a velocidade de agitação em rpm, mostrou-se não significativo estatisticamente, corroborando com o resultado do presente estudo. Não foi encontrado na literatura estudos sobre a significância estatística para os termos referentes ao pH, a fim de comparação com o presente trabalho.

A Tabela 3 apresenta os efeitos estimados para as variáveis experimentais avaliadas neste estudo pelo teste ANOVA e exemplificadas na Figura 3.

Tabela 3 – Teste ANOVA efeitos estimados para as variáveis experimentais avaliadas.

	COEFICIENTES	EFEITO	ERRO PADRÃO
pH(L)	Q_1	-2,07	1,33
Agitação (L)	Q_2	4,58	1,33
pH (Q)	Q_{12}	-3,74	1,48
Agitação (Q)	Q_{22}	-1,76	1,49
pH x Agitação	Q_1 vs Q_2	0,56	1,88

Fonte: Elaborado pelo autor.

O coeficiente de Correlação deste modelo fornece a medida da proporção da variação explicada pela equação de regressão em relação a variação das respostas. O R^2 obtido neste estudo foi de 0,78 ou 78%. Isto indica que aproximadamente 78% dos resultados das eficiências de remoção encontradas neste estudo podem ser explicadas pelo modelo proposto.

Portanto, considerando apenas os termos significativos no modelo de remoção da concentração de cor do efluente têxtil, pode-se escrever a equação de remoção da seguinte maneira: Equação 6. Os coeficientes da equação do modelo podem ser obtidos através da tabela de regressão linear encontrada no *software* Statistica Inc. Salienta-se que os termos foram arredondados na terceira casa decimal.

$$\% \text{ remoção de cor} = 79,603 - 0,208 X_1^2 + 0,096 X_2 \quad (\text{Equação 6})$$

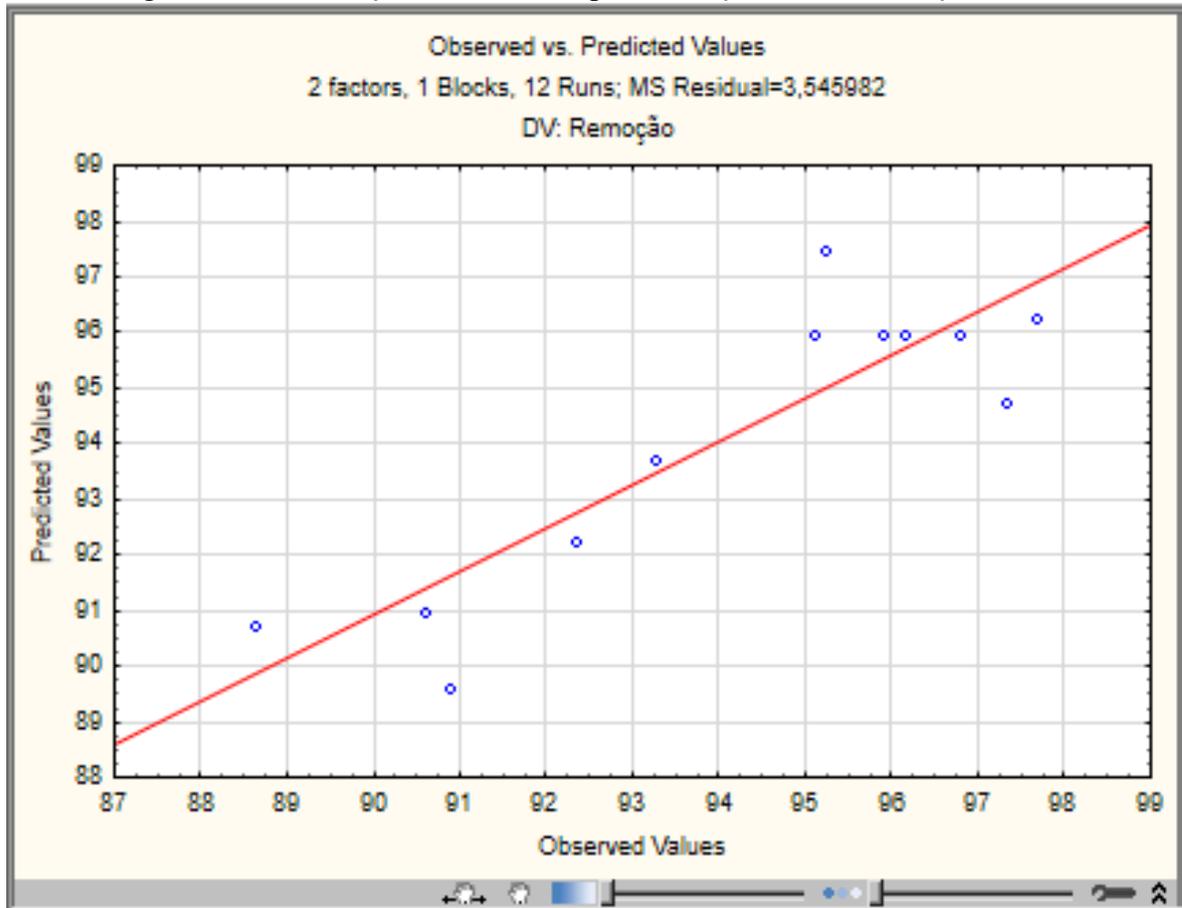
Na Equação 6, X_1 é a variável pH da solução e X_2 é a velocidade de agitação em rpm. De acordo com a mesma, nota-se que as duas variáveis são estatisticamente significativas, em termos lineares para a velocidade de agitação e quadrático para o pH da solução.

No estudo de Tomassoni (2019), utilizou-se o mesmo carvão ativado proveniente de folhas do Abacateiro para a remoção da concentração de corantes em efluente têxtil sintético, a velocidade de agitação em termos lineares, também mostrou-se significativa estatisticamente e com efeito positivo. Já para a variável pH da solução, o estudo realizado por Regti et al (2017), que avaliou a remoção de corante básico através de adsorção com carvão ativado proveniente da semente do fruto de Abacateiro, o pH da solução também mostrou-se significativo.

É possível realizar validação complementar do modelo encontrado pelos dados estatísticos através do gráfico de distribuição de resíduos. No gráfico exibido na Figura 4, os

valores previstos na equação são representados pela reta e os valores observados são representados pelos pontos.

Figura 4 – Distribuição dos resíduos para remoção da concentração de cor.

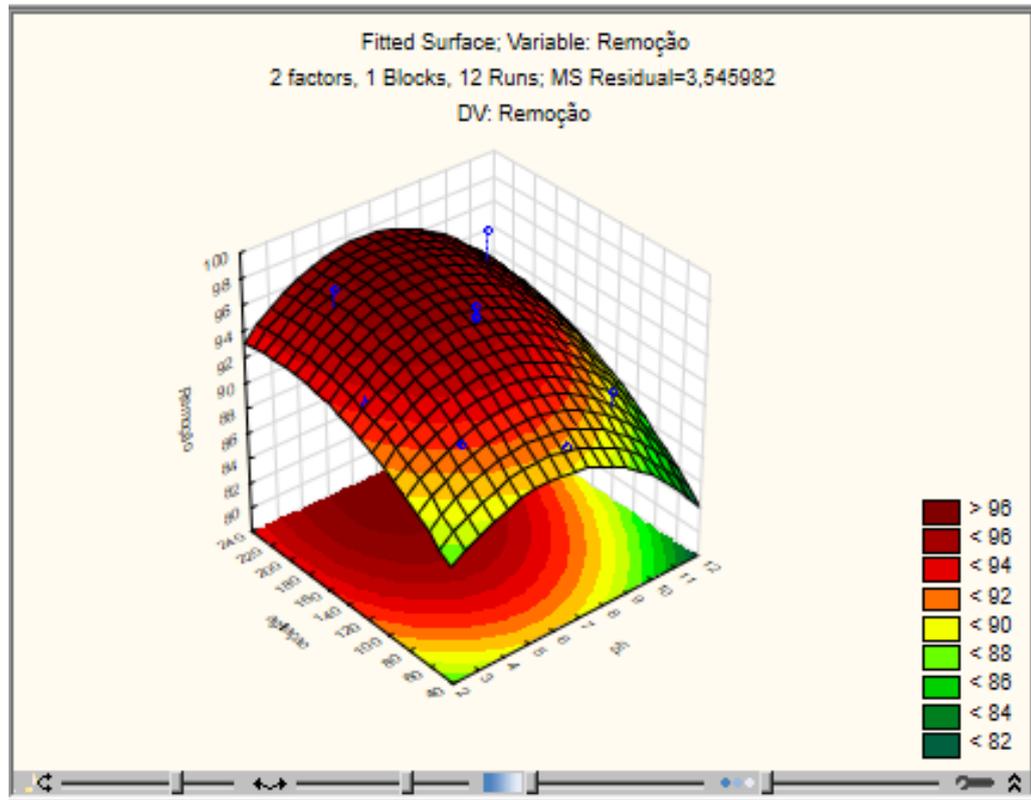


Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando a Figura 4, nota-se que os valores observados nos ensaios laboratoriais estão relativamente próximos aos esperados na reta do modelo, apresentando desvios tanto positivos quanto negativos. Outra questão relevante é o ponto ótimo da reação, ou seja, a melhor condição em que poderia se realizar o experimento maximizando os resultados. Para a identificação do ponto ótimo utilizou-se o gráfico de superfície de resposta.

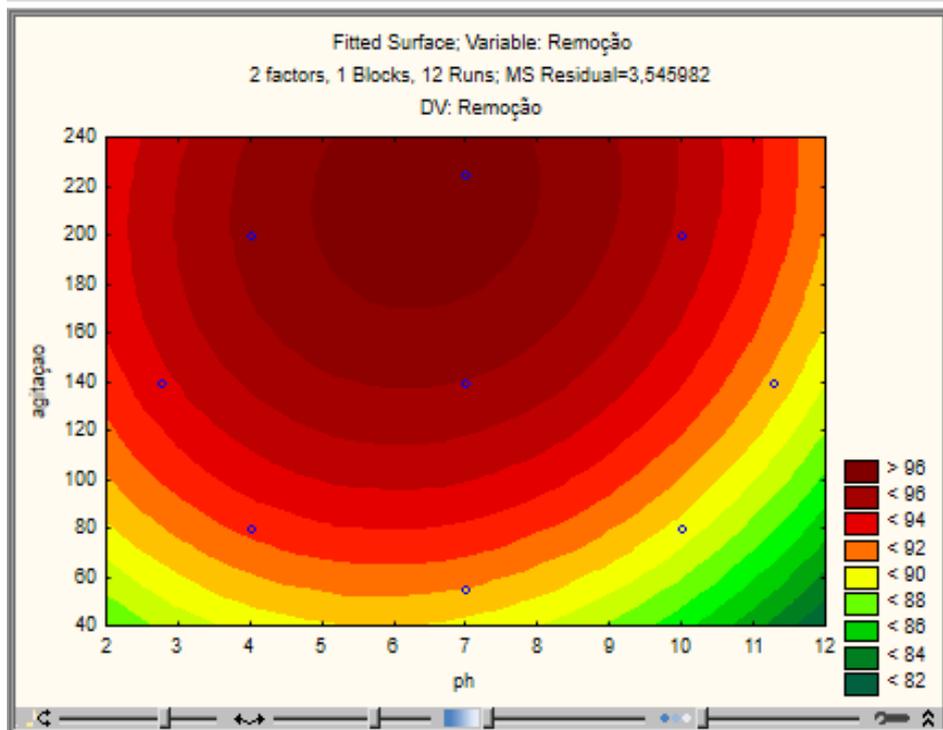
O gráfico de superfície de resposta é produzido por meio do *software* Statistica, com os coeficientes lineares e suas interações o modelo define a superfície de resposta onde devido a sua diferenciação de cores é possível visualizar o ponto ótimo. A Figura 5 e 6 apresentam os gráficos do perfil de contorno e superfície de resposta para a remoção da concentração de cor do efluente têxtil através da adsorção com carvão ativado proveniente de folhas de *Persea americana Mill.*

Figura 5 – Perfil de contorno indicando a remoção da concentração de cor do efluente têxtil através da adsorção com carvão ativado produzido de folhas de *Persea americana Mill.*



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 6 – Superfície de resposta indicando a remoção da concentração de cor do efluente têxtil através da adsorção com carvão ativado produzido de folhas de *Persea americana Mill.*



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os resultados obtidos, é possível determinar estatisticamente quais as melhores condições que resultariam a melhor eficiência. Observando as Figuras 5 e 6, nota-se que a faixa de maior remoção ocorreu com o pH da solução entre 5 e 7,5 e velocidade de agitação entre 180 a 240 rpm, nesta faixa podemos chegar a remoções da concentração de cor superiores a 96%. É possível observar que nos extremos do pH a remoção foi menor e com velocidade de agitações menores a eficiência de remoção da concentração de cor tende a diminuir também.

Ao utilizar estas faixas, os experimentos realizados no futuro tendem a ser mais eficientes na remoção da concentração de cor. Então, destaca-se através da análise dos dados apresentados que a melhor condição para a remoção da concentração de cor de efluente têxtil acontece com pH da solução igual a 6 e velocidade de agitação de 220 rpm.

Após análise dos resultados de remoção da concentração de cor, notou-se que mesmo com as taxas de remoções atingindo 98% a concentração presente no efluente final tratado é superior à exigida pela legislação para lançamento em corpos d'água, fato exemplificado pela ampla concentração do efluente bruto.

4.2 ESTUDO DE CINÉTICA DE ADSORÇÃO

O estudo cinético teve o objetivo de determinar o tempo que acontece o equilíbrio de adsorção assim como identifica o modelo que melhor explica o fenômeno de adsorção presente neste estudo. Com base no resultado das melhores condições experimentais obtidos através do planejamento fatorial completo, DCCR (2²), foi feito o ensaio cinético para a determinação do tempo ideal de adsorção máxima. Foi utilizado o melhor valor de velocidade de agitação 220 rpm e o pH da solução igual a 6,5.

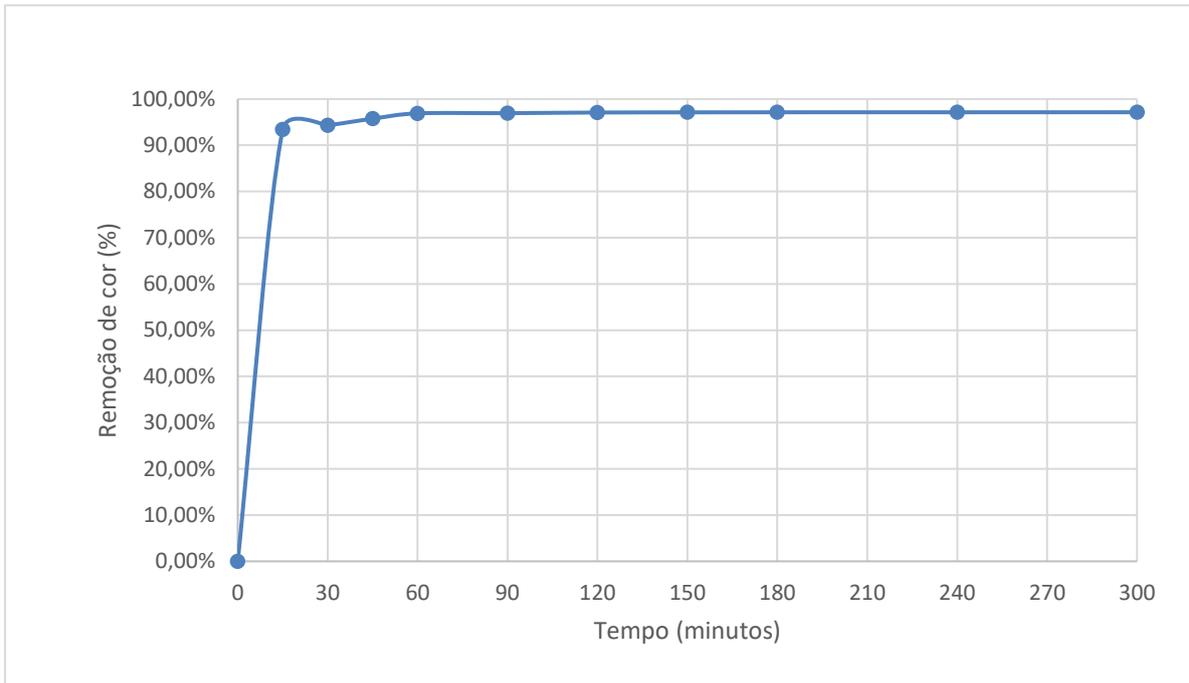
Na tabela 4 apresenta-se resultados obtidos nos ensaios cinéticos com os diferentes tempos de experimento, bem como demonstrando a hora da retirada da alíquota. Nota-se que o ensaio foi feito durante intervalos de tempos variados por um período de 24 horas. Na Figura 7, apresenta-se o gráfico que relaciona tempo em minutos com a remoção da concentração de cor do efluente têxtil (%).

Tabela 4 – Resultados da remoção da concentração de cor de efluente têxtil ao longo do tempo.

ENSAIO	HORA DA RETIRADA	TEMPO DE ENSAIO	REMOÇÃO DE COR (%)
1	10:00h	0min	0
2	10:15h	15min	93,34
3	10:30h	30min	94,32
4	10:45h	45min	95,74
5	11:00h	1h	96,89
6	11:30h	1h30min	96,94
7	12:00h	2h	97,07
8	12:30h	2h30min	96,97
9	13:00h	3h	97,10
10	14:00h	4h	97,12
11	15:00h	5h	97,13
12	10:00h	24h	97,14

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 7 – Gráfico de remoção da concentração de cor (%) por tempo (min).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base na Tabela 4 e na Figura 7, é possível estimar o tempo que se atinge o equilíbrio de reação, bem como as eficiências de remoção atingidas para cada período de tempo. Nota-se na Figura 7, que nos primeiros 15 minutos de contato a remoção da concentração de cor alcançada com o adsorvente proveniente das folhas de *Persea americana Mill.* foi de aproximadamente 90%, chegando à faixa de 94% aos 30 minutos de reação. Percebe-se uma tendência a estabilização cinética a partir de 90 minutos, com aproximadamente 97,12%, esta estabilização foi confirmada com o ensaio de 24h onde os valores confirmaram que o equilíbrio cinético de adsorção foi atingido.

Para a elaboração dos gráficos e das linhas de tendências dos modelos cinéticos anteriormente apresentados, foi utilizado todos os dados obtidos na Tabela 4. Porém, a fim de melhorar a apresentação gráfica, utilizou-se os 8 primeiros ensaios não interferindo na equação da reta e tampouco na obtenção do R^2 .

Nos ensaios de cinética utilizando as melhores condições obtidas através do planejamento fatorial completo, observa-se que o máximo valor atingido de remoção da concentração de cor foi 97,14%, não superando o maior valor de remoção obtido pela etapa do planejamento que foi de 97,66%. Esperava-se que ao ajustar os parâmetros de acordo com as melhores condições operacionais estabelecidas pelo planejamento, seria obtido melhores

resultados de remoção da concentração de cor pelos estudos cinéticos, porém não foi isso que ocorreu.

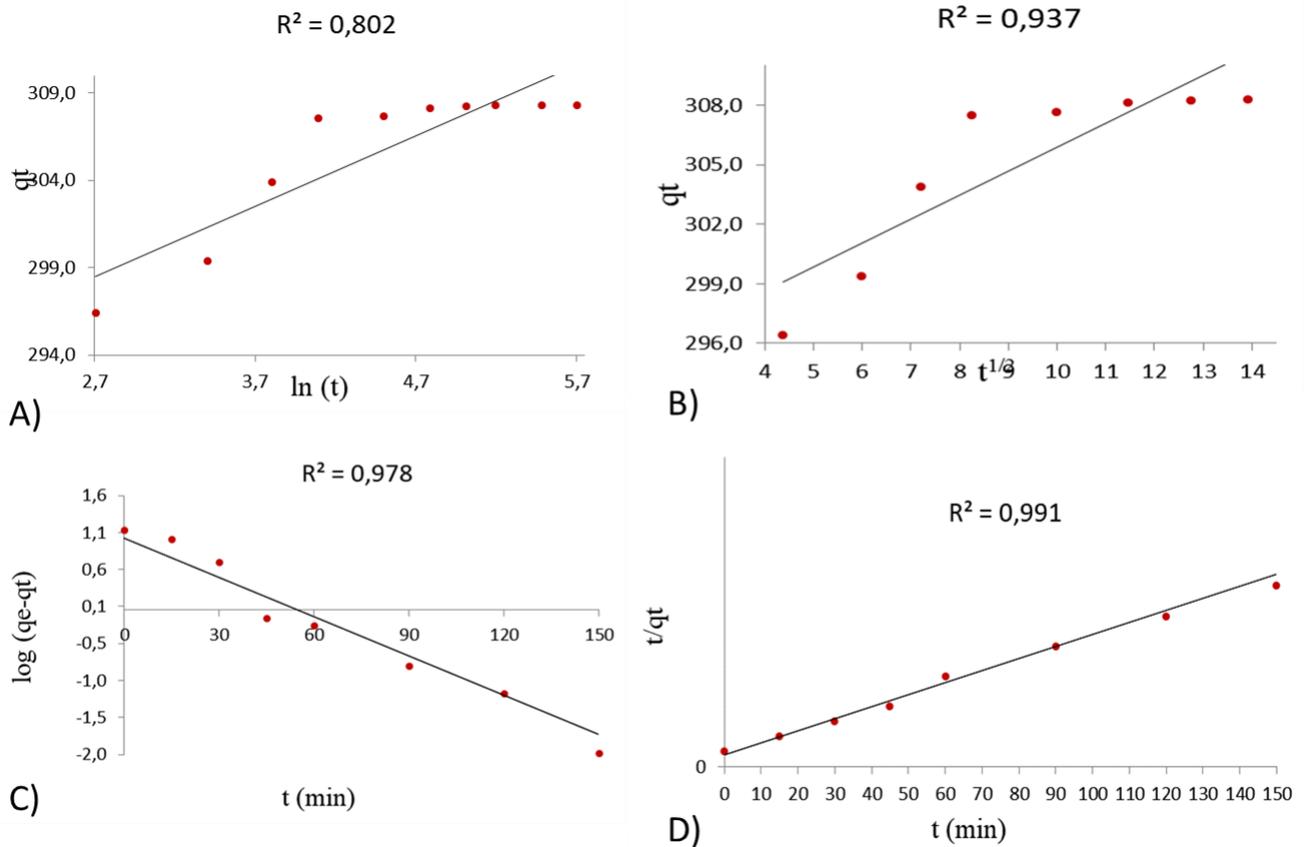
Este fenômeno pode ser explicado de diversas maneiras, como já citado anteriormente neste estudo, os parâmetros pH da solução e velocidade de agitação não são os únicos influenciadores na eficiência do processo de adsorção, podendo o resultado ter sido influenciado por outro fator não controlado no experimento.

4.2.1 Adequação aos modelos cinéticos

Para a obtenção do melhor modelo cinético que rege o processo de adsorção de efluente têxtil com carvão ativado proveniente de folhas de *Persea americana Mill.*, foram construídos 4 (quatro) gráficos lineares de $\log(q_t - q_e)$ versus t , $(\frac{t}{q_t})$ versus t , q_t versus $\ln(t)$ e q_t versus $t^{1/2}$ para os modelos de *pseudo-primeira ordem*, *pseudo-segunda ordem*, equação de Elovich e difusão intrapartícula, respectivamente.

Para ajustar o modelo cinético de *pseudo-primeira ordem* aos dados experimentais, foi preciso estimar a capacidade de sorção no equilíbrio q_e . Este parâmetro não era conhecido anteriormente e não foi encontrado na literatura valor que poderia ser utilizado para este caso. Estabeleceu-se que o valor de q_e seria o maior valor de q_t calculado (+ 0,001 mg.g⁻¹). A Figura 8 (A, B, C e D) apresentam os dados ajustados aos modelos estudados.

Figura 8- A) Modelo da Equação de Elovich; B) Modelo de Difusão intrapartícula; C) Modelo de *Pseudo-primeira ordem* e D) Modelo de *Pseudo-segunda ordem*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos nos ensaios não se ajustaram corretamente aos modelos da Equação de Elovich e difusão intrapartícula, obtendo coeficientes de correlação de 0,802 e 0,937, respectivamente. Portanto para este experimento, não podemos explicar a cinética de acordo com as teorias apresentadas nestes dois modelos anteriormente citados. Para os modelos de *pseudo-primeira ordem* e *pseudo-segunda ordem*, os dados obtidos no experimento ajustaram-se bem, sendo obtidos os seguintes coeficientes de correlação 0,978 e 0,991, respectivamente.

No estudo realizado por Tomassoni (2019), o modelo cinético que se ajustou melhor ao fenômeno de adsorção com carvão ativado proveniente da folha do abacateiro foi o de *pseudo-primeira ordem*, diferentemente do encontrado no presente estudo. Justifica-se pelo fato de que o adsorbato do presente estudo é um efluente têxtil real, apresentando outras características e poluentes no efluente, mudando assim, o mecanismo de adsorção.

Nos gráficos, nota-se que o modelo de *pseudo-segunda ordem* obteve melhor ajuste e, portanto, obtém destaque. A taxa de adsorção no modelo de *pseudo-segunda ordem* depende da quantidade da espécie química adsorvida na superfície do adsorvente (HO; MACKAY,

1998), ou seja, este modelo caracteriza uma quimissorção e pode-se calcular a velocidade inicial de adsorção através da Equação 8.

$$h_0 = K_2 q_e^2 \quad (\text{Equação 8})$$

Os dados laboratoriais aplicados aos modelos, assim como as características e coeficientes de correlação dos modelos avaliados, estão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros cinéticos característicos e coeficientes de correlação dos modelos avaliados.

Pseudo-primeira ordem	Equação	$\text{Log}(q_e - qt) = -0,0177x + 0,9709$
	R^2	0,0978
	$K_1 (L \cdot \text{min}^{-1})$	0,0407
	$q_e \text{ calculado}(mg \cdot g^{-1})$	9,35
Pseudo-segunda ordem	Equação	$\frac{t}{qt} = 0,0039x + 0,038$
	R^2	0,9909
	$K_2 [g(mg \cdot \text{min}^{-1})]$	0,0004
	$H_0 (g \cdot mg^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	26,29
	$q_e \text{ calculado}(mg \cdot g^{-1})$	256,41
Elovich	Equação	$qt = 4,0369 x + 287,97$
	R^2	0,8019
Difusão intraparticulada	Equação	$qt = 0,0786 x + 1,446$
	R^2	0,937

Fonte: Elaborado pelo autor.

É notório no Quadro 1, que a constante de velocidade de adsorção de *pseudo-segunda ordem* é baixa, porém, devido à alta capacidade de sorção no equilíbrio a velocidade inicial de adsorção é relativamente alta. O valor de q_e identificado neste estudo é superior aos valores encontrados em outros estudos, como por exemplo, o realizado por Tomassoni (2019), que utilizou o mesmo adsorvente, mas com diferente adsorbato. No estudo realizado por Tomassoni (2019) foi encontrado o valor de q_e igual a $1,78 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. Isto indica que o adsorvente proveniente de folhas de Abacateiro funciona de maneira melhor e mais rápida quando utilizado para a remoção da concentração de cor de efluente têxtil real em relação ao adsorbato utilizado por Tomassoni (2019) no efluente têxtil sintético.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo avaliou a eficiência de remoção da concentração de cor de efluente têxtil real através do processo de adsorção com carvão ativado proveniente de folha do abacateiro (*Persea americana Mill.*). Após as análises laboratoriais, o carvão ativado mostrou-se eficaz tendo alcançado 98% de eficiência para a remoção da concentração de cor do efluente estudado. Os ensaios experimentais organizados pelo DDCR mostraram variação na eficiência da remoção da concentração de cor em relação as variáveis pH da solução e velocidade de agitação. As melhores condições operacionais para essas variáveis foram: pH da solução igual a 4 e velocidade de agitação 200 rpm

O modelo obtido através do DDCR mostrou-se válido estatisticamente, após testes estatísticos de análise de variância. Através do gráfico de Pareto, pode-se perceber que os parâmetros velocidade de agitação e pH da solução foram considerados estatisticamente significativos, obtendo a equação de remoção da concentração de cor. Ainda pelo planejamento fatorial foi possível determinar através da análise da superfície de resposta a faixa ótima dos parâmetros para maximização dos resultados de remoção da concentração de cor. Ficou estabelecido neste estudo que a faixa ótima de pH da solução varia de 5 a 7 e a faixa de velocidade de agitação entre 180 a 240 rpm.

Os estudos cinéticos de adsorção mostraram que o carvão ativado proveniente da folha do abacateiro foi efetivo como adsorvente na redução da concentração de cor do efluente têxtil real, atingindo remoção de 94% aos 30 minutos de ensaio. Os resultados dos modelos cinéticos avaliados revelaram que os dados obtidos melhor se adequaram ao modelo de *pseudo-segunda ordem*, atingindo coeficiente de correlação de 0,991, indicando que o principal mecanismo de adsorção é via química.

Com os resultados apresentados neste estudo, afirma-se que o carvão ativado proveniente da folha do abacateiro mostrou-se eficiente, apesar de sua remoção não atingir os parâmetros estabelecidos para lançamento em conformidade a Resolução CONAMA n.º 357 de 17/03/2005. Isto deve-se ao fato de que o efluente têxtil bruto apresenta valores de cor elevada. Portanto, torna-se necessária a efetuação de estudos complementares para a determinação da viabilidade de lançamento do efluente tratado através do método apresentado neste estudo.

Sugere-se para o desenvolvimento de pesquisas futuras o estudo das isotermas de adsorção para este caso, pois é uma etapa relevante para maior e melhor entendimento do

fenômeno de adsorção. Também, pode-se sugerir o estudo utilizando o adsorvente apresentado no presente trabalho no processo de adsorção em leito fixo, pois foram feitos apenas ensaios em batelada. Ainda, sugere-se realizar novos estudos estatísticos com diferentes parâmetros operacionais que influenciam o processo, além de realizar um estudo completo do processo de dessorção para obter as melhores condições de operação.

REFERÊNCIAS

ADINATA, D.; DAUD, W. M. A. W; AROUA, M. K. Preparation and characterization of activated carbon from palm shell by chemical activation with K₂CO₃. **Bioresource Technology**, v. 98, p. 145-149, 2007.

AHMED, M. Application of raw and activated Phragmites australis as potential adsorbents for wastewater treatments. **Ecological Engineering**, v. 102, p. 262-269, 2017.

_____. Studies on adsorption of crystal violet dye from aqueous solution onto coniferous pinus bark poder (CPBP). **J Hazard Mater**, v. 171, n. 1-2, p. 767-773. nov./2009.

ALMEIDA, E. J. R. de; DILARRI, G.; CORSO. C. R. **A indústria têxtil no Brasil: Uma revisão dos seus impactos ambientais e possíveis tratamentos para os seus efluentes**. São Paulo, Universidade Estadual Paulista, 2016.

ARSLAN-ALATON, I.; GURSOY, B. H.; SCHMIDT, J. E. Advanced oxidation of acid and reactive dyes: Effect of Fenton treatment on aerobic, anoxic and anaerobic processes. **Dyes and Pigments**, v. 78, p. 117-130, 2008.

AZEVEDO, J. **Poluição pela indústria têxtil**. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental e Ordenamento do Território) – Universidade do Minho, Portugal, 2010.

BALAMURUGAN, B. THIRUMARIMURUGAN, M.; KANNADASAN, T. Anaerobic degradation of textile dye bath effluente using *Halomonas sp.* **Bioresour Technol**, v. 102, p. 6365-6369, 2011.

BELLIS, M. **A History of the Textile Revolution**. In: Thoughtco, 2019. Disponível em: <https://www.thoughtco.com/textile-revolution-britains-role-1991935>. Acesso em: 16 jan. 2020.

BELTRAME, K. K; et al. Adsorption of caffeine on mesoporous activated carbon fibers prepared from pineapple plant leaves. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 147, p. 64-71, 2018.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Farmacopeia Brasileira**. 5. ed., v. 1, Brasília: Anvisa, 2010. 524 p. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/documents/33832/260079/5%C2%AA+edi%C3%A7%C3%A3o+-+Volume+1/4c530f86-fe83-4c4a-b907-6a96b5c2d2fc>. Acesso em: 18 dez. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL. Disponível em: <https://www.abit.org.br/>. Acesso em 08 nov. 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI. **O setor têxtil e de confecção e os desafios da sustentabilidade**. CNI, Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção, Brasília, 2017. 108 p. Disponível em: <https://bucket-gw-cni-static-cms->

si.s3.amazonaws.com/media/filer_public/bb/6f/bb6fdd8d-8201-41ca-981d-deef4f58461f/abit.pdf. Acesso em: 22 dez. 2019.

Resolução COMANA n.º 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 2005. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=2747>. Acesso em 13 fev. 2020.

BROADBENT, A. D. **Basic principles of textile coloration**. England: Society of Dyres and Colourists, 2001.

CALADO, V; MONTGOMERY, D. C. **Planejamento de Experimentos usando o Statistica**. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais LTDA. p.260, 2003.

CALVETE, T. **Casca de Pinhão – in natura e carvão ativo – Adsorventes para remoção de corantes em efluentes aquosos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

CARDOSO, N. F. **Adsorção de corantes têxteis utilizando biossorventes alternativos**. Tese (Doutorado em Química) – Programa de Pós-graduação em Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2012. 120 p.

CARR, C. M. **Chemistry of the textiles industry**. Glasgow: Blackie Academic & Professional, 1995.

CHAGAS, M. de A. **Tratamento de efluente têxtil por processos físico-químico e biológico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, 2009. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5020/1/arquivo2214_1.pdf. Acesso em 12 fev. 2020.

CHATTERJEE, S.; et al. **Colloids and surfaces A**, 299, p. 146- 152, 2007.

CHRISTIE, R. M. **Color chemistry**. Cambridge: Boockraft Ltda, 2001.

COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. F. **Tecnologia química**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1979.

CRINI, G. Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: a review. **Bioresource Technology**, v. 97, p. 1061-1085, jun./2006.

CUNHA, C. **Tecnologia - o que é a 4ª revolução industrial?** 2018. Disponível em: <https://vestibular.uol.com.br/resumo-das-disciplinas/atualidades/tecnologia-o-que-e-a-4-revolucao-industrial.htm>. Acesso em: 14 fev. 2020.

DENIZ, F; KARAMAN, S. Removal of Basic Red 46 dye from aqueous solution by pine tree leaves. **Chemical Engineering Journal**, v. 170, p. 67-74, 2011.

EXATACOR. **Produtos químicos e corantes têxteis**. 2020. Disponível em: <https://www.exatacor.com.br/produtos-quimicos-e-corantes-texteis.php>. Acesso em 14 fev. 2020.

FARAH, J. Y.; EL-GENDY, N. S.; FARAHAHAT, L. A. Biosorption of astrazone blue basic dye from an aqueous solution using dried biomass of Baker's yeast. **Journal of Hazardous Materials**, v. 148, p. 402–408, 2007.

FEBRATEX. **Qual a importância da indústria têxtil no Brasil e o que representa?** 2020. Disponível em: <https://fcm.com.br/noticias/qual-a-importancia-da-industria-textil-no-brasil-e-o-que-representa/>. Acesso em 14 dez. 2019.

FERNÁNDEZ, C.; LARRECHI, M. S.; CALLAO, M. P. An analytical overview of processes for removing organic dyes from wastewater effluents. **Trends in Analytical Chemistry**, v. 29, n. 10, p. 1202-1211, nov. 2010.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. (Org.). **Métodos de Pesquisa**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/cursopgdr/downloadsSerie/derad005.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2020.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. Corantes têxteis. **Química Nova**, v. 23, n. 01, p. 71-78, 2000.

GUO, J; LUA, A. C. Microporous Activated Carbons Prepared from Palm Shell by Thermal Activation and Their Application to Sulfur Dioxide Adsorption. **Journal of Colloid and Interface Science**, v.251, p.242-247, 2002.

GUPTA, V. K; SUHAS, Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review. **Journal of Environmental Management**, v.90, p. 2313-2342, 2009.

HO, Y. S.; MCKAY, G. A comparison of chemisorption kinetic models applied to pollutant removal on various sorbents. **Trans IChemE**, v. 76, p. 332-340, 1998.

_____. Sorption of dye from aqueous solution by peat. **Chemical Engineering Journal**, v. 70, n. 2, p. 115-124, jun. 1998.

_____. Pseudo-second order model for sorption processes. **Process Biochemistry**, v. 34, n. 5, p. 451-465, jul. 1999.

HORVAT, A. J. M.; et al. Analysis, occurrence and fate anthelmintcs and their transformation products in the environment. **Trends in Analytical Chemistry**, v. 31, p. 61-24, 2012.

IMMICH, A. P. S. **Remoção de corantes de efluentes têxteis utilizando folhas de *Azadirachta indica* como adsorvente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2006. 119 p.

KARTHIKEYAN, N.; et al. Visible light degradation of textile effluent by electrodeposited multiphase CuInSe₂ semiconductor photocatalysts. **Journal of Molecular Liquids**, v. 227, p. 194-201, 20017.

KUNZ, A.; et al. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química Nova**, v. 25, n. 1, p. 78-82, 2002.

LAGERGREN, S. About the theory of so-called adsorption of soluble substances. **Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens**, v. 24, p. 1-39, 1898.

LALNUNHLIMI, S.; KRISHNASWAMY, V. Decolorization of azo dyes (Direct Blue 151 and Direct Red 31) by moderately alkaliphilic bacterial consortium. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 47, p. 39-46, 2016.

LANG, A. R. **Dyes and pigments: New research**. New York: New Science Publishers, 2009.

LEECHART, P. et al. Application of “waste” wood-shaving bottom ash for adsorption of azo reactive dye. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 2, p. 912-920, fev./2009.

LIU, Y.; et al. Preparation of activated carbon from willow leaves and evaluation in electric double-layer capacitors. **Materials Letters**, v. 176, p. 60-63, 2016.

LUCAS, M.; et al. Reutilização de efluente de tingimento de fibras acrílicas pós-tratamento fotoeletroquímico. **Química Nova**, v. 31, n. 6, p. 1362-1366, 2008.

LUCLKTENBERG, I. A. B. A indústria têxtil catarinense e o caso da Cia. Hering. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2004.

MAGALHÃES, R. **Corantes naturais são alternativa sustentável na moda: pesquisa da EACH utilizou espécies como açaí, andiroba, jenipapo e urucum para tingimento de tecidos**. 2013. Disponível em: <http://www.usp.br/aun/antigo/exibir?id=5484&ed=972&f=56>. Acesso em 12 fev. 2020.

MARIANO, M. **Um novo olhar do polo têxtil catarinense**. In: Textilia, 2011. Disponível em: http://www.textilia.net/materias/ler/textil/negocios/um_novo_olhar_do_polo_textil_catarinense. Acesso em 12 fev. 2020.

METCALFF, L.; EDDY, P. H. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5. Ed. 2015.

MINAYO, Maria Cecília de Souza (org.). **Pesquisa Social**. Teoria, método e criatividade. 18 ed. Petrópolis: Vozes, 2001.

MULUH, S. N; et al. Adsorption of Phenol from Aqueous Solution by Avocado Seed Activated Carbon: Equilibrium, Kinetic, and Full Factorial Design Analysis. **International Journal of Advanced Engineering Research and Technology**, v. 5, p. 2348-8190, 2017.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C. **Response surface methodology process and product optimization using designed experiments**. New York: John Wiley & Sons, 700p., 1995.

NASCIMENTO, R. F; et al. **Adsorção aspectos teóricos e aplicações ambientais**. 1 ed. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014.

NOR, N. M; LAU, et al. Synthesis of activated carbon from lignocellulosic biomass and its applications in air pollution control—a review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v.1, p.658-666, 2013.

OBSERVATÓRIO FIESC. **Têxtil e confecção**. 2019. Disponível em: <https://www.observatoriofiesc.com.br/textil-confeccao>. Acesso em 14 fev. 2020.

OLIVEIRA, D. P.; et al. Chemical characterization of a dye processing plant effluent-identification of the mutagenic components. **Mutation Research**, v. 626, n. 1-2, p. 135-42, jan. 2007.

OZMIHCI, S. KARGI, F. Utilization of powdered waste sludge (PWS) for removal of textile dyestuffs from wastewater by adsorption. **Journal of Environmental Management**, v. 81, n. 3, p. 307-314, nov./2006.

PALA, A. TOKAT, E. Color removal from cotton textile industry wastewater in an activated sludge system with various additives. **Water Research**, v. 36, n. 11, p. 2920-2925, jun./2005.

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

PODKOSCIELNY, P.; NIESZPOREK, K.; SZABELSKI, P. Adsorption from aqueous solution on heterogeneous surfaces of activated carbons – Comparison of experimental data and simulations. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 277, p. 52-58, jan./2006.

RADECKI, P. P. **Emerging separation and separative reaction technologies for process waste reduction: adsorption and membrane systems**. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1999.

REGTI, A; LAAMARI, M. R; STITIBA, S; HADDAD, M. E. Potential use of activated carbon derived from *Persea* species under alkaline conditions for removing cationic dye from wastewaters. **Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences**, v.24, p.10-18, 2017.

ROCKENBACH, M. **A Machine Learning e a 4ª Revolução Industrial**. In: Altus, 2018. Disponível em: <https://www.altus.com.br/post/196/a-machine-learning-e-a-4a-revolucao-industrial>. Acesso em: 16 jan. 2020.

ROSS, B. Z. L; POSSETI, G. R. C. **Tecnologias potenciais para o saneamento: remoção de metais de águas de abastecimento público**. Curitiba: Sanepar, 2018.

- RUTHVEN, D. M. **Principles of adsorption and adsorption processes**. John Wiley & Sons, 1984.
- SANTOS, E. O. **Caracterização, Biodegradabilidade e Tratabilidade do efluente de uma lavanderia industrial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.
- SANTOS, A. P. L.; FERNANDES, D. S. Análise do impacto ambiental gerados no ciclo de vida de um tecido de malha. Florianópolis. **Iberoamerican Journal of Industrial Engineering**, v. 4, n. 7, p. 1-17, 2012
- SARATALE, R. G.; et al. Bacterial decolorization and degradation of azo dyes: A review. **Journal of the Taiwan institute of Chemical Engineers**, v. 42, p. 138-157, 2011.
- SONAI, G. G. **Ativação de adsorventes carbonos para a remoção de corantes de efluentes têxteis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)–Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2012. 151 p.
- MEYER, V.; CARLSSON, F. H. H.; OELLERMANN, R. A. Decolourization of textile effluent using a low cost natural adsorbent material. **Water Science Technology**, v. 26, n. 5-6, p. 1205-1211, 1992.
- MORILO, K. **O setor têxtil é um dos mais representativos de Santa Catarina**. In: The Blog, 2018. Disponível em: <https://ondm.com.br/2018/06/o-setor-textil-e-um-dos-mais-representativos-de-santa-catarina-declara-glauco-corte/>. Acesso em: 14 fev. 2020.
- TAN, L. et al. Aerobic decolorization, degradation and detoxification of azo dyes by newly isolated salt-tolerant yeast *Scheffersomyces spartinae* TLHS-SF1. **Bioresource Technology**, v. 203, p. 287-294, 2016.
- TERA AMBIENTAL. **A diferença entre o tratamento biológico e físico-químico**. 2013. Disponível em: <https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/bid/339074/a-diferenca-entre-o-tratamento-biologico-e-fisico-quimico>. Acesso em: 9 fev. 2020.
- TOMASSONI, F. **Remoção de cor de efluente têxtil sintético por processos de eletrocoagulação e adsorção com carvões ativados produzidos a partir de folhas de *Persea Americana Mill.* e de *Cassia Fistula L.*** Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental)–Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2019. 177 p.
- TWARDOKUS, R. G. **Reuso de água no processo de tingimento da indústria têxtil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina. 2004.
- VIJAYARANGHAVAN, K. et al. Biosorption of copper, cobalt and nickel by marine green alga *Ulva reticulata* in a packed column. **Chemosphere**, v. 60, p. 416-426, 2005.

WENG, C. H.; LIN, Y. T.; TZENG, T. W. Removal of methylene blue from aqueous solution by adsorption onto pineapple leaf powder. **Journal of Hazardous Materials**, n. 170, v. 1, p. 417-424, 2009.

ZAFRILLA, J. M. G; et al. **Nanofiltration of secondary effluent for wastewater reuse in the textile industry.** **Desalination**, v. 222, p.272–279, 2008.

ZOLLINGER, H. Color chemistry, synthesis, properties and application of organic dyes and pigments. Weinheim, New York, p. 367, 1987.