

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA - UDESC**  
**CENTRO DE EDUCAÇÃO SUPERIOR DO ALTO VALE DO ITAJAÍ - CEAVI**  
**ENGENHARIA SANITÁRIA**

**KARINA LUNELLI**

**UTILIZAÇÃO DE BIOCÁRVÃO COMO MATERIAL ADSORVENTE DE AZO**  
**CORANTE (RBV-5R) PRESENTE EM EFLUENTE TÊXTIL**

**IBIRAMA**  
**2021**

**KARINA LUNELLI**

**UTILIZAÇÃO DE BIOCÁRVÃO COMO MATERIAL ADSORVENTE DE AZO  
CORANTE (RBV-5R) PRESENTE EM EFLUENTE TÊXTIL**

Trabalho de conclusão apresentado ao curso de Engenharia Sanitária do Centro de Educação Superior do Alto Vale do Itajaí (CEAVI), da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Sanitária  
Orientador: Dr. Tiago José Belli

**IBIRAMA  
2021**

Lunelli, Karina, 1999 -  
Utilização de biocarvão como material adsorvente  
de azo corante (RBV-5R) presente em efluente têxtil /  
Karina Lunelli. - 2021.  
66 p.: il.

Orientador: Tiago José Belli

Bibliografia: p. 59-66.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --  
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de  
Educação Superior do Alto Vale do Itajaí, Curso de  
Engenharia Sanitária, Ibirama, 2021.

1. Azo Corante RBV-5R. 2. Biocarvão. Biomassa de  
Resíduo Florestal - Adsorção. 3. Efluente Têxtil. I.  
Belli, Tiago José, orient.. II. Universidade do  
Estado de Santa Catarina - Curso de Engenharia  
Sanitária. III. Título.

CDD 628

20.ed.

**KARINA LUNELLI**

**UTILIZAÇÃO DE BIOCÁRVÃO COMO MATERIAL ADSORVENTE DE AZO  
CORANTE (RBV-5R) PRESENTE EM EFLUENTE TÊXTIL**

Trabalho de conclusão apresentado ao curso de Engenharia Sanitária do Centro de Educação Superior do Alto Vale do Itajaí (CEAVI), da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Sanitária

**BANCA EXAMINADORA**

Orientador: \_\_\_\_\_  
Dr. Tiago José Belli  
CEAVI/UDESC

Membro 1: \_\_\_\_\_  
Dr. Tiago Rogerio Vitor Akaboci  
CEAVI/UDESC

Membro 2: \_\_\_\_\_  
Dra. Caroline Rodrigues  
UFSC

**Ibirama, 08 de abril de 2021**

À minha família, por sempre acreditar em mim  
e pelo apoio durante esta caminhada.

## AGRADECIMENTOS

Em especial, aos meus pais, Lourival e Jeovana, por todo carinho, amor e educação dados a mim e por sempre acreditarem na minha capacidade, quando eu menos acreditei. Às minhas irmãs, Katriane e Kamille, por todo o incentivo a seguir o meu caminho, estando sempre ao meu lado. Vocês foram essenciais nessa caminhada, não tenho palavras para descrever o amor que sinto por vocês.

Ao meu professor e orientador, Tiago, pela confiança e oportunidade de ingressar nessa pesquisa, no qual pude crescer como pessoa e profissional. Nunca esquecerei das suas palavras de carinho e incentivo.

Ao Álvaro, por aceitar junto a mim esse desafio e responsabilidade de cuidar de um laboratório, abdicando fins de semana e feriados, sem contar os horários nada convencionais para coletar amostras. Os experimentos ao teu lado foram muito mais divertidos e leves.

Aos meus queridos amigos/irmãos que encontrei na faculdade, Beatriz, Carolina, Jean e Natânie, por estarem sempre presentes para ouvir meus desabaços e proporcionar conversas maravilhosas. Foi uma honra passar por momentos únicos com vocês, que levarei para sempre em meu coração.

Ao meu melhor amigo, Marcio, por todas as conversas dos mais diversos temas e os infinitos memes compartilhados. Nossa amizade mostra que tudo tem um tempo certo para acontecer, obrigada por ser essa pessoa incrível que tanto soma em minha vida.

Aos meus amigos que conheci durante esses cinco anos de graduação, Brendha, Débora, Djulia, Eduardo, Fernanda, Georgia, Kézia, Letícia, Matheus, Mayara, Rebeca, Renan e Vitor, pelo companheirismo de todos os dias. Serei eternamente grata por ter encontrado pessoas maravilhosas durante essa jornada.

Aos meus amigos de longa data, em especial à minha melhor amiga de infância, Nicole, por sempre torcer e acreditar em mim, no qual eu tive o prazer de compartilhar tantos momentos importantes da minha vida e à Gabriela, por ter me incentivado quando mais precisei, saiba que as nossas manhãs de estudo foram extremamente essenciais para a conclusão deste trabalho.

Às pessoas que tive o prazer de conhecer durante esses últimos anos envolvida no movimento estudantil como membro do DAESC e do DCE, em especial à Joanna, obrigada por me entender e sempre querer o meu bem. Nossa conexão é absurdamente incrível, espero que o destino só diminua a distância que existe entre nós.

Aos professores que contribuíram para a minha formação e pela amizade construída durante esses anos, quando tudo isso normalizar, precisamos fazer mais uma edição do Integra das Engenharias. À UDESC pelo ensino de qualidade, especialmente aos diretores e técnicos do CEAVI. Ao professor Eduardo Bello, que sugeriu a utilização do biocarvão para o andamento da pesquisa e à empresa DyStar, pelo fornecimento do corante utilizado.

Ao Telmo e ao Mateus, por todo o conhecimento repassado no período do estágio obrigatório e pela ótima companhia, podem ter certeza de que minhas tardes foram muito mais divertidas, até mesmo ao coletar água e vistoriar armadilhas de dengue.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram durante a minha graduação e na elaboração deste trabalho.

“Que nada nos defina. Que nada nos sujeite.  
Que a liberdade seja a nossa própria substância.”

(Simone de Beauvoir)



## RESUMO

O setor têxtil é caracterizado pela grande quantidade de água utilizada dentro da indústria, sendo um dos segmentos industriais mais poluidores de águas superficiais. A etapa de beneficiamento têxtil é responsável por 90% da geração de efluentes líquidos, contendo uma elevada quantidade de químicos e aditivos. Na etapa de tingimento, o grupo de corantes sintéticos mais aplicados são do tipo azo, sendo um composto altamente tóxico e que pode causar recalcitrância e salinização dos recursos hídricos. Ainda, cerca de 10 a 20% da parcela de corante utilizada é perdida durante o estágio de lavagem dos tecidos. Por se tratar de um composto tóxico, há a limitação do uso de tratamentos biológicos convencionais, no qual diversas tecnologias que venham a ser empregadas demandam alta capacitação do corpo técnico, alto custo e complexidade do processo. Em contrapartida, a adsorção é uma técnica de fácil aplicação e baixo custo, podendo ser utilizado resíduos de biomassa como material adsorvente, por exemplo, o biocarvão. Contudo, processos adsortivos aliados a outras técnicas de tratamento necessitam da separação entre a solução aquosa e o material adsorvente. Dessa forma, o presente trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho do uso de biocarvão gerado a partir da biomassa de resíduos florestais para a adsorção de azo corante RBV-5R, com a aplicação do biocarvão na forma granular e em pó. Paralelamente, buscou-se também, analisar a utilização do processo de filtração por membranas como alternativa à separação entre o biocarvão e o efluente tratado. Tais investigações foram conduzidas a partir de duas etapas distintas. Em um primeiro momento, foram realizados testes de adsorção na escala de bancada, empregando diferentes concentrações de biocarvão (0, 0,5, 1, 5, 10 e 20 g.L<sup>-1</sup>) tanto na forma granular quanto em pó. Nesses ensaios adsortivos, utilizava-se de um sistema de aeração para garantir a mistura e homogeneização do biocarvão e da solução de efluente têxtil sintético a base do azo corante RBV-5R. Posteriormente, foi efetuado o ensaio de filtração através do processo de separação por membranas de microfiltração, para avaliar a filtrabilidade da solução contendo biocarvão e efluente têxtil. A unidade experimental apresentou uma elevada capacidade de adsorção de azo corante RBV-5R, atingindo a eficiência de até 100% para as maiores concentrações de biocarvão. Comparando a utilização do biocarvão em suas duas formas aplicadas, o material em pó se mostrou mais eficiente frente ao granular, tendo a concentração ótima de 10 g.L<sup>-1</sup> para atingir a eficiência máxima. Entretanto, ressalta-se que para ambas as formas de biocarvão estudadas, as concentrações de 0,5 e 1 g.L<sup>-1</sup> não foram capazes de suprimir o fenômeno da auto-oxidação, resultando, conseqüentemente, no processo de recoloração do efluente. Por fim, observou-se por meio dos ensaios de filtração que o emprego do biocarvão em pó resultou em

melhor filtrabilidade da solução, tendo em vista que a permeabilidade nesse caso foi 2 vezes maior em comparação a permeabilidade obtida no ensaio com biocarvão granular.

**Palavras-chave:** Efluente têxtil. Adsorção. Azo corante RBV-5R. Biocarvão. Biomassa de resíduo florestal.

## ABSTRACT

Textile industries are responsible for generating large amounts of wastewater containing several chemical pollutants for water resources. The dyeing processes are responsible for 90% of the wastewater generated, with substantial amounts of chemicals and additives. The dyeing process involves the use of synthetic dyes, such as azo dyes, known for their potential of toxicity and salinization of water resources. Furthermore, nearly 10 to 20% of the initial dye load is lost during the washing cycles. Due to its toxicity, the use of conventional biological treatments is limited to high-cost analytical techniques and well-trained operators. However, adsorption represents an easy and low-cost way to remove these compounds, using adsorbents and non-inert materials such as biochar. Nonetheless, adsorptive processes combined with other treatment techniques require the separation between the aqueous phase and the adsorbent material. In this sense, this work aimed to evaluate the performance of granular and powder biochar from forest biomass residues as adsorbents of an azo dye RBV-5R. In parallel, the use of the membrane filtration process as an alternative to the separation between the biochar and the treated effluent was also evaluated. The investigations were conducted from two different stages. At first, adsorption tests were carried out at a bench scale, using different concentrations of biochar (0, 0.5, 1, 5, 10 and 20 g.L<sup>-1</sup>) both in granular and powder form. In these adsorptive tests, an aeration system was used to ensure the mixing and homogenization of the biochar and the synthetic textile effluent solution based on the azo dye RVB-5R. Subsequently, the filtration test was carried out through the process of separation by microfiltration membranes, to evaluate the filterability of the solution containing biochar and textile effluent. The experimental unit showed a high adsorption capacity of azo dye RBV-5R, reaching an efficiency of up to 100%. Comparing the use of biochar in its two applied forms, the powdered material proved to be more efficient compared to the granular form, with an optimum concentration of 10 g.L<sup>-1</sup> needed for maximum efficiency. However, it is noteworthy that for both forms of biochar studied, concentrations of 0.5 and 1 g.L<sup>-1</sup> were not able to suppress the phenomenon of auto-oxidation, resulting, consequently, in the effluent recoloring process. Finally, it was observed through the filtration tests that the use of powdered biochar resulted in better filterability of the solution, considering that the permeability, in this case, was 2 times greater compared to the permeability obtained in the test with granular biochar.

**Keywords:** Textile effluent. Adsorption. Azo dye RBV-5R. Biochar. Forest biomass residues.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Estrutura da cadeia produtiva e de distribuição têxtil e de confecção nacional .....   | 23 |
| Figura 2 – Estrutura química do corante RBV-5R .....  | 30 |
| Figura 3 – Esquema do processo de adsorção .....  | 31 |
| Figura 4 – Representação esquemática da formação de camadas de adsorvato pelos processos de quimissorção e fissorção .....  | 32 |
| Figura 5 – Esquema apresentando os diferentes tipos de poros em um sólido quanto à sua forma.....   | 35 |
| Figura 6 – Representação esquemática do PSM.....  | 37 |
| Figura 7 – Representação esquemática do ensaio de adsorção .....  | 42 |
| Figura 8 – Sistema de béqueres contendo o efluente têxtil e diferentes concentrações de biocarvão .....   | 42 |
| Figura 9 – Amostras do BCG e BCP, respectivamente .....   | 43 |
| Figura 10 – Absorção do azo corante RBV-5R.....   | 45 |
| Figura 11 – Representação esquemática do ensaio de filtração .....  | 45 |
| Figura 12 – Comportamento da concentração de azo corante RBV-5R nas duas estratégias operacionais nos béqueres B1 (a), B2 (b), B3 (c), B4 (d), B5 (e) e B6 (f)..... | 48 |
| Figura 13 – Comparação das amostras filtradas após uma hora de operação na E-1 (a) e na E-2 (b) .....   | 53 |
| Figura 14 – Perfil da permeabilidade hidráulica nas três condições testadas.....  | 54 |
| Figura 15 – Sistema após a filtração completa do efluente têxtil, contendo o BCG e BCP, respectivamente .....   | 56 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1 – Compostos comumente utilizados no beneficiamento dos tecidos .....         | 25 |
| Quadro 2 – Caracterização do efluente da indústria têxtil.....                        | 25 |
| Quadro 3 – Padrões de lançamento do efluente industrial em corpo receptor .....       | 26 |
| Quadro 4 – Classificação dos grupos funcionais de corantes sintéticos.....            | 27 |
| Quadro 5 – Classificação dos corantes sintéticos conforme sua estrutura química ..... | 28 |
| Quadro 6 – Classificação de poros quanto à sua dimensão e sua função principal.....   | 36 |
| Quadro 7 – Características dos principais PSMs.....                                   | 38 |
| Quadro 8 – Composição do efluente têxtil sintético.....                               | 39 |
| Quadro 9 – Parâmetros granulométricos do biocarvão granular .....                     | 41 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Os 10 países com as maiores produções de têxteis e de vestuário do mundo .....   | 22 |
| Tabela 2 – Composição elementar química orgânica do biocarvão .....   | 40 |
| Tabela 3 – Composição elementar inorgânica e na forma de óxidos .....   | 40 |
| Tabela 4 – Estratégias operacionais e nomenclatura dos béqueres do sistema com a<br>concentração de biocarvão aplicada .....            | 43 |
| Tabela 5 – Quantidade adsorvida por grama de biocarvão e a eficiência de adsorção do RBV-<br>5R nas duas estratégias operacionais ..... | 50 |
| Tabela 6 – Eficiência de adsorção de cor verdadeira com BCG e BCP .....   | 52 |
| Tabela 7 – Valores médios e desvio padrão da permeabilidade estabilizada .....  | 55 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                   |   |
|-------------------|---|
| <b>ABIT</b>       | Associação Brasileira de Indústria Têxtil e de Confecção            |
| <b>APHA</b>       | <i>American Public Health Association</i>                           |
| <b>BCG</b>        | Biocarvão Granular  |
| <b>BCP</b>        | Biocarvão em Pó   |
| <b>CAV</b>        | Centro de Ciências Agroveterinárias                                 |
| <b>CONAMA</b>     | Conselho Nacional do Meio Ambiente                                  |
| <b>DBO</b>        | Demanda Bioquímica de Oxigênio                                      |
| <b>DQO</b>        | Demanda Química de Oxigênio   |
| <b>IUPAC</b>      | <i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>            |
| <b>LABIOTRATE</b> | Laboratório de Biorreatores a Membrana para Tratamento de Efluentes |
| <b>MMA</b>        | Ministério do Meio Ambiente   |
| <b>NBR</b>        | Norma Brasileira  |
| <b>OD</b>         | Oxigênio Dissolvido   |
| <b>pH</b>         | Potencial Hidrogeniônico  |
| <b>PSM</b>        | Processo de Separação por Membranas                                 |
| <b>RBV-5R</b>     | Remazol Violeta Brilhante – 5R                                      |
| <b>UDESC</b>      | Universidade do Estado de Santa Catarina                            |
| <b>VMP</b>        | Valor Máximo Permitido  |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                      |                |
|----------------------|----------------|
| <b>m<sup>3</sup></b> | Metro cúbico   |
| <b>%</b>             | Percentual     |
| <b>R\$</b>           | Reais          |
| <b>°C</b>            | Grau Celsius   |
| <b>mg</b>            | Miligrama      |
| <b>O<sub>2</sub></b> | Oxigênio       |
| <b>L</b>             | Litro          |
| <b>Pt</b>            | Platina        |
| <b>mL</b>            | Mililitro      |
| <b>h</b>             | Hora           |
| <b>kJ</b>            | Quilojoules    |
| <b>mol</b>           | Mol            |
| <b>φ<sub>m</sub></b> | Diâmetro médio |
| <b>nm</b>            | Nanômetro      |
| <b>MW</b>            | Megawatt       |
| <b>mm</b>            | Milímetro      |
| <b>g</b>             | Gramma         |
| <b>μm</b>            | Micrômetro     |
| <b>m<sup>2</sup></b> | Metro quadrado |
| <b>bar</b>           | Bar            |
| <b>min</b>           | Minuto         |
| <b>Pa</b>            | Pascal         |



## SUMÁRIO

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | 18 |
| 1.1          | PROBLEMA .....  | 19 |
| 1.2          | JUSTIFICATIVA .....   | 20 |
| 1.3          | OBJETIVOS .....   | 20 |
| <b>1.3.1</b> | <b>Objetivo geral</b> .....   | 20 |
| <b>1.3.2</b> | <b>Objetivos específicos</b> .....  | 20 |
| 1.4          | ESTRUTURA DO TRABALHO .....   | 21 |
| <b>2</b>     | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....  | 22 |
| 2.1          | SETOR TÊXTIL BRASILEIRO .....   | 22 |
| <b>2.1.1</b> | <b>Cadeia produtiva têxtil e de confecção</b> .....                       | 23 |
| <b>2.1.2</b> | <b>Caracterização dos efluentes têxteis e padrões de lançamento</b> ..... | 24 |
| <b>2.1.3</b> | <b>Corantes têxteis</b> .....   | 27 |
| 2.1.3.1      | <i>Remazol Violeta Brilhante – 5R</i> .....                               | 29 |
| 2.2          | ADSORÇÃO .....  | 30 |
| <b>2.2.1</b> | <b>Tipos de interações da adsorção</b> .....                              | 32 |
| <b>2.2.2</b> | <b>Materiais adsorventes</b> .....  | 32 |
| 2.2.2.1      | <i>Biocarvão</i> .....  | 33 |
| <b>2.2.3</b> | <b>Fatores que influenciam na adsorção</b> .....                          | 34 |
| 2.2.3.1      | <i>Temperatura</i> .....  | 34 |
| 2.2.3.2      | <i>Potencial Hidrogeniônico (pH)</i> .....                                | 34 |
| 2.2.3.3      | <i>Área Superficial e Porosidade</i> .....                                | 35 |
| 2.2.3.4      | <i>Concentração de adsorvato</i> .....                                    | 36 |
| 2.3          | PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS .....                                 | 36 |
| <b>3</b>     | <b>METODOLOGIA</b> .....  | 39 |
| 3.1          | EFLUENTE TÊXTIL SINTÉTICO .....   | 39 |
| 3.2          | BIOCARVÃO .....   | 39 |
| 3.3          | ENSAIOS DE ADSORÇÃO .....   | 41 |
| <b>3.3.1</b> | <b>Métodos analíticos</b> .....   | 44 |
| 3.4          | ENSAIOS DE FILTRAÇÃO .....  | 45 |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....                                       | 47 |
| 4.1          | ENSAIOS DE ADSORÇÃO .....   | 47 |
| <b>4.1.1</b> | <b>Adsorção do azo corante RBV-5R</b> .....                               | 47 |

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>4.1.2</b> | <b>Adsorção de cor verdadeira.....</b>                           | <b>51</b> |
| <b>4.2</b>   | <b>ENSAIOS DE FILTRAÇÃO .....</b>                                | <b>54</b> |
| <b>4.3</b>   | <b>CONSIDERAÇÕES SOBRE A DISPOSIÇÃO FINAL DO BIOCARVÃO .....</b> | <b>56</b> |
| <b>5</b>     | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                                 | <b>57</b> |
| <b>6</b>     | <b>RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>                | <b>58</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>59</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O setor têxtil é caracterizado, entre outros aspectos, pela grande quantidade de água utilizada dentro da indústria, principalmente na etapa de beneficiamento, responsável por diversos processos, como: alvejamento, tinturaria e estamparia das fibras. O alto consumo de água se dá pela sua utilização como meio de transporte de produtos químicos adicionados durante o processo, bem como para remoção de impurezas ou produtos indesejáveis em excesso (ERKAN *et al.*, 2020; REGO, 2008). Zhang *et al.* (2020) estimam que, para cada tonelada de tecido fabricado, o consumo de água fica na faixa de 21 a 377 m<sup>3</sup>.

Devido à quantidade de químicos e aditivos utilizados, os efluentes têxteis são identificados pelo alto teor de compostos orgânicos e diversos poluentes de difícil biodegradabilidade, resultando em altas concentrações de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO). Além disso, apresentam uma forte coloração, ocasionada pela presença de corantes que não se fixam adequadamente às fibras, visto que 10 a 20% da parcela de corante aplicada é perdida durante a etapa de lavagem (KIANI *et al.*, 2020; QUEIROZ *et al.*, 2016).

Conseqüentemente, se lançado indevidamente no corpo hídrico, os efluentes podem causar alterações nas propriedades físicas, químicas e/ou biológicas da água, ocasionando problemas de saúde pública e perda da biodiversidade (YUKSELER *et al.*, 2017).

A presença de corantes em efluentes têxteis tornou-se uma preocupação ecológica, por tratar-se de um composto tóxico. Sendo assim, há a limitação do uso de tratamentos biológicos, uma vez que culturas de microrganismos podem ser perturbadas devido à toxicidade do corante, além da baixa eficiência de remoção quando tratado em processos convencionais (GILPAVAS; DOBROSZ-GÓMEZ; GÓMEZ-GARCÍA, 2019).

Dessa forma, é necessária a aplicação de tecnologias de tratamento que garantam segurança ao meio ambiente no despejo desse efluente no corpo hídrico e que tenham bons índices de remoção de corante e outros poluentes. Muitas vezes, atrelado a isso, surgem tratamentos que demandam alta capacitação do corpo técnico, alto custo e complexidade do processo, inviabilizando-os (YUKSELER *et al.*, 2017).

Uma das tecnologias para tratamento de efluentes é a adsorção, uma técnica relativamente fácil de ser aplicada e razoavelmente barata, que vem mostrando bons resultados na remoção de contaminantes, podendo alcançar altas eficiências de até 95% (LUNARDI, 2014; MARÍN, 2015). A adsorção consiste em um processo de transferência de massa, no qual o adsorvente, caracterizado pela massa sólida, remove constituintes dissolvidos de uma solução

aquosa (adsorvato), atraindo o soluto na superfície do material adsorativo, podendo ser classificada como uma técnica física ou química. Entretanto, a adsorção de poluentes depende da natureza do material adsorvente, como estrutura e porosidade, área superficial e tamanho da partícula, entre outros fatores (KAUSAR *et al.*, 2018).

Um material que vem sendo utilizado como adsorvente em soluções aquosas é o biocarvão, ou *biochar*, um produto criado a partir da pirólise controlada de uma biomassa. Inicialmente, o biocarvão era utilizado para remediação do solo, uma vez que sua composição é rica em carbono. Porém, sua utilização vem sendo cada vez mais recorrente na área de tratamento de efluentes, em virtude de diversas pesquisas com resultados promissores de remoção de poluentes com difícil biodegradabilidade (KUMAR *et al.*, 2016).

Contudo, processos adsorativos aliados a outras técnicas de tratamento de águas residuárias requerem a separação entre a solução aquosa e o material adsorvente (SANTOS, 2013). Dentre as técnicas recentemente estudadas, o processo de separação por membranas vem recebendo crescente atenção (DEMBOGURSKI, 2019). Nesse processo, a solução aquosa é forçada contra a superfície da membrana, na qual as partículas do biocarvão ficam retidas, enquanto o efluente permeia por seus poros.

## 1.1 PROBLEMA

Sabe-se que a utilização de processos convencionais para o tratamento de efluentes têxteis é ineficaz, dada pela toxicidade do corante, limitando o uso de tratamentos biológicos. Logo, é necessário que sejam oferecidos mecanismos de baixo custo que garantam a eficiência de remoção de poluentes, assegurando que o despejo de efluentes líquidos não prejudicará na qualidade do corpo hídrico receptor (GILPAVAS; DOBROSZ-GÓMEZ; GÓMEZ-GARCÍA, 2019).

A adsorção é um processo que vem recebendo atenção no tratamento de águas residuárias, pelo fato de promover a remoção de poluentes orgânicos e inorgânicos, com a utilização de carvão ativado como material adsorvente. Entretanto, um dos principais desafios na fabricação de carvão ativado é identificar materiais que sejam de baixo custo, acessíveis e disponíveis em grandes quantidades, além de conter potencial técnico necessário para a eficácia da adsorção (PESSÔA, 2019).

Um material que vem sendo analisado nos últimos anos é o biocarvão, a fim de baratear o processo de produção do material adsorvente, podendo ser de origem vegetal, animal ou mineral. (DI BERNARDO; DANTAS, 1993). Desse modo, este estudo avaliou a utilização de

um biocarvão, proveniente da biomassa de resíduos florestais, como adsorvente alternativo para o processo de adsorção do corante têxtil Remazol Violeta Brilhante – 5R (RBV-5R) em meio aquoso sintético.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A presente pesquisa promove a utilização de um produto residual originado em uma usina geradora de energia elétrica, que utiliza como combustível resíduos da madeira produzidos na região. Estudos apontam que materiais celulósicos possuem um alto teor de carbono, determinando o bom rendimento e a alta porosidade do biocarvão produzido, elementos essenciais para o alto desempenho como material adsorvente (MARRAKCHI *et al.*, 2017).

A partir disso, é possível realizar o tratamento de um composto tóxico e recalcitrante, utilizando um material residual, comumente disponível a baixo custo ou até nenhum, como é o caso. Assim, tem-se o reaproveitamento de um resíduo, garantindo dupla sustentabilidade ao processo, o que torna uma alternativa atrativa às indústrias.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo geral

Avaliar a utilização de biocarvão como material adsorvente de azo corante presente em efluente têxtil sintético.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar o desempenho do biocarvão quanto à remoção de cor verdadeira e corante;
- b) Otimizar a eficiência de adsorção considerando o uso de biocarvão na forma granular e em pó;
- c) Analisar o processo de microfiltração como alternativa à retenção do biocarvão.

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em seis seções, sendo introdução, fundamentação teórica, metodologia, resultados e discussão, as considerações finais e recomendações para trabalhos futuros, como forma de atender aos objetivos propostos.

A seção 1, de acordo com o que foi apresentado, tem a finalidade de abrir a discussão referente ao tema, iniciando com uma breve apresentação, seguindo com o problema de pesquisa, justificativa e os objetivos que serão alcançados.

Na seção 2, são discutidos todos os conceitos utilizados no trabalho, como o setor brasileiro da indústria têxtil, desde a cadeia de produção e distribuição até a caracterização do efluente industrial gerado e as legislações que o cercam. Além disso, serão abordados os dois mecanismos utilizados na parte prática do estudo, detalhando a técnica de adsorção e o processo de separação de membranas.

A seção 3 compreende na explicação da metodologia utilizada nos dois ensaios gerais, destacando a representação esquemática de cada experimento, as equações utilizadas e alguns critérios definidos.

Os resultados obtidos na metodologia serão apresentados e discutidos na seção 4, contendo a presença de gráficos, tabelas e ilustrações, para auxiliar no melhor entendimento do leitor.

A seção 5 está reservado às considerações finais do estudo, concluindo os resultados obtidos e, por fim, a indicação recomendações para trabalhos futuros, atribuídas na seção 6.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste item serão apresentados conceitos teóricos literários para o desenvolvimento desta pesquisa, discutindo o setor têxtil brasileiro e a caracterização de seu efluente; as diversas classificações dos corantes têxteis presentes no mercado; a adsorção; e o processo de separação por membranas.

### 2.1 SETOR TÊXTIL BRASILEIRO

No início do século XIX, surgiram as primeiras fábricas têxteis no Brasil, caracterizadas por estabelecimentos de pequeno porte e pouco explorados. O desenvolvimento do setor aconteceu apenas no final do mesmo século, devido ao reinvestimento de excedentes do ramo cafeeiro e a suspensão de tarifas alfandegárias, possibilitando a expansão de indústrias têxteis e o aumento da manufatura algodoeira (CLEMENTINO, 2012; FUJITA; JORENTE, 2015).

Atualmente, o Brasil ganha destaque no cenário mundial da indústria têxtil e de confecções, sendo o quinto maior produtor têxtil e o quarto maior em vestuário (Tabela 1). Ainda, segundo dados da Associação Brasileira de Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT), o país desempenha um importante papel socioeconômico empregando diretamente cerca de 1,5 milhão de trabalhadores, representando 16,7% dos empregos ofertados no país, nas mais de 32 mil empresas instaladas no território nacional, majoritariamente de pequeno e médio porte (ABIT, 2017).

Tabela 1 – Os 10 países com as maiores produções de têxteis e de vestuário do mundo

| Produções de têxteis |             | Produções de vestuário |             |
|----------------------|-------------|------------------------|-------------|
| País                 | %           | País                   | %           |
| China                | 50,20       | China                  | 47,20       |
| Índia                | 6,90        | Índia                  | 7,10        |
| Estados Unidos       | 5,30        | Paquistão              | 3,10        |
| Paquistão            | 3,60        | <b>Brasil</b>          | <b>2,60</b> |
| <b>Brasil</b>        | <b>2,40</b> | Turquia                | 2,50        |
| Indonésia            | 2,40        | Coréia do Sul          | 2,10        |
| Taiwan               | 2,30        | México                 | 2,10        |
| Turquia              | 1,90        | Itália                 | 1,90        |
| Coréia do Sul        | 1,80        | Malásia                | 1,40        |
| Tailândia            | 1,10        | Taiwan                 | 1,40        |

Fonte: Adaptado de ABIT (2017).

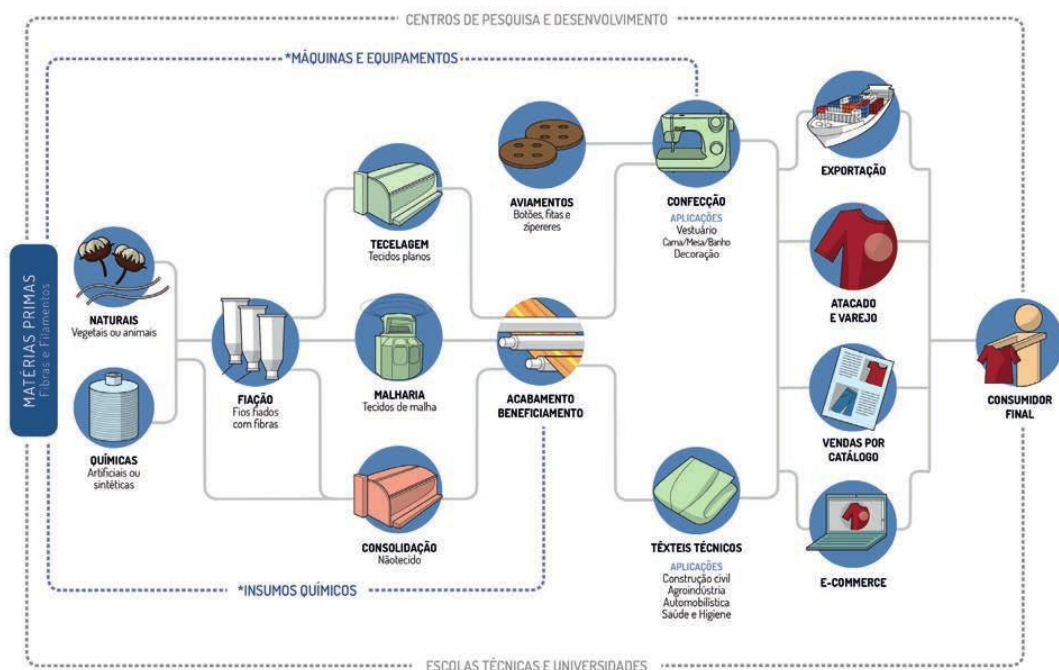
Esse setor é de extrema importância para a economia nacional. Em 2018, conforme a ABIT (2017), o faturamento da cadeia têxtil e de confecção chegou a US\$ 48,3 bilhões, produzindo em média 1,2 milhão de toneladas da manufatura de algodão e confeccionando 5,5 bilhões de peças. Além disso, o setor representou 5,7% do faturamento da indústria de transformação nacional.

Na Região Sul, o principal produtor é o estado de Santa Catarina, participando ativamente dos números nacionais. O setor têxtil catarinense emprega cerca de 160 mil trabalhadores, concentrando-se na região do Vale do Itajaí (considerado o polo têxtil estadual), como Blumenau (13,6%), Brusque (10,1%) e Jaraguá do Sul (8,4%). Em 2017, o valor bruto da produção industrial têxtil e de confecção chegou a R\$ 22,9 bilhões, obtendo uma alta de 5,7% em relação ao ano anterior (FIESC, 2018).

### 2.1.1 Cadeia produtiva têxtil e de confecção

O Brasil possui a última cadeia têxtil completa do Ocidente, produzindo desde as fibras, como a plantação de algodão, até os desfiles de moda, passando por todos os segmentos do complexo têxtil. A Figura 1 ilustra a estrutura da cadeia produtiva e de distribuição têxtil e de confecção nacional, além de incluir a interação de outros setores, como a área acadêmica e fornecedores de químicos, máquinas, equipamentos e softwares (ABIT, 2017).

Figura 1 – Estrutura da cadeia produtiva e de distribuição têxtil e de confecção nacional



Fonte: ABIT (2017).



Conforme verifica-se na Figura 1, a primeira etapa da cadeia produtiva é adquirir a matéria-prima, natural (algodão, seda, linho, lã) ou química (náilon, poliéster, lycra, viscose), para que seja encaminhada ao processo de fiação, transformando as fibras em fios. Em seguida, os fios são direcionados às fábricas de tecelagem e malharia, virando tecidos, ou ainda para a consolidação, no caso dos não-tecidos (ABIT, 2017).

Posteriormente, é realizado o beneficiamento dos tecidos e não-tecidos, responsável pelo enobrecimento e garantia de qualidade do produto. Esta fase é a causadora do alto consumo de água no setor têxtil, pela sua utilização como meio de transporte de produtos químicos adicionados durante o processo, bem como para remoção de impurezas ou produtos indesejáveis em excesso, através da lavagem (ERKAN *et al.*, 2020; REGO, 2008).

Ainda analisando a figura acima, nota-se os dois grandes grupos de têxteis existentes: têxteis técnicos, que podem ser aplicados na construção civil, agroindústria, automobilística e na área da saúde e higiene; e os têxteis gerais, sendo estes utilizados para vestuário, decoração, cama, mesa e banho. A etapa final da cadeia produtiva é o contato desses produtos com o consumidor final, seja por exportação, atacado/varejo, vendas por catálogo ou *e-commerce* (ABIT, 2017).

### **2.1.2 Caracterização dos efluentes têxteis e padrões de lançamento**

Devido à quantidade de químicos e aditivos utilizados, os efluentes têxteis são caracterizados pelo alto teor de compostos orgânicos e diversos poluentes de difícil biodegradabilidade, resultando em altas concentrações de DBO e DQO; e baixa concentração de Oxigênio Dissolvido (OD), indicando o alto grau poluidor desse tipo de efluente (KIANI *et al.*, 2020).

Além disso, apresentam uma forte coloração, ocasionada pela presença de corantes que não se fixam adequadamente às fibras, visto que 10 a 20% da parcela de corante aplicada é perdida durante a etapa de lavagem (QUEIROZ *et al.*, 2016). Segundo Baêta (2012), a maior parcela dos corantes utilizados para o tingimento possui uma estrutura química altamente estável, o que dificulta sua remoção por processos biológicos convencionais.

Dentre as fases da cadeia produtiva, o beneficiamento é o maior gerador de efluente líquido, resultando em cerca de 90% do consumo geral utilizado por tonelada de tecido, contemplando as etapas de tratamento prévio, tingimento, lavagem, estamparia e acabamento

(HASSEMER, 2006; VON SPERLING, 2011). No Quadro 1 estão os principais compostos utilizados em cada etapa do beneficiamento.

Quadro 1 – Compostos comumente utilizados no beneficiamento dos tecidos

| <b>Etapa</b>      | <b>Compostos</b>  |
|-------------------|---|
| Tratamento Prévio | Hidróxido de Sódio<br>Enzima<br>Cloro de Sódio Umectante<br>Estabilizante de Peróxido<br>Peróxido de Hidrogênio |
| Tingimento        | Corantes<br>Sulfato de Sódio<br>Hidróxido de Sódio<br>Cloro de Sódio  |
| Lavagem           | Ácido acético<br>Detergente<br>Sequestrante   |

Fonte: Adaptado de CPRH (2001).

Em virtude das diversas diferenças que podem ser aplicadas no processo de fabricação e/ou os tipos de insumos e produtos químicos utilizados no parque industrial, a caracterização do efluente têxtil pode ser um grande desafio, principalmente para a escolha do tipo de tratamento.

A partir do Quadro 1, nota-se que os principais compostos utilizados são sais, detergentes e corantes, sendo, em sua maioria, substâncias recalcitrantes e tóxicas (JUSTINO, 2016). Visto isso, o Quadro 2 sumariza os valores médios dos principais parâmetros do efluente proveniente da indústria têxtil.

Quadro 2 – Caracterização do efluente da indústria têxtil

| <b>Parâmetro</b>                        | <b>Valor médio</b>                      |
|---|---|
| Temperatura                             | 35 °C                                   |
| DBO <sub>5</sub>                        | 300 mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup>  |
| DQO                                     | 1000 mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> |
| Sólidos em suspensão                    | 200 mg.L <sup>-1</sup>                  |
| Nitrogênio total (NTK)                  | 30 – 40 mg.L <sup>-1</sup>              |
| Nitrogênio amoniacal (NH <sub>3</sub> ) | 20 – 30 mg.L <sup>-1</sup>              |
| Fenóis                                  | 5 – 10 mg.L <sup>-1</sup>               |
| pH                                      | 7 – 10                                  |
| Fósforo                                 | 5 – 10 mg.L <sup>-1</sup>               |
| Tensoativos                             | 30 – 40 mg.L <sup>-1</sup>              |
| Cloretos                                | 1000 – 1500 mg.L <sup>-1</sup>          |
| Sulfatos                                | 1000 – 1500 mg.L <sup>-1</sup>          |

|                       |                                  |
|-----------------------|----------------------------------|
| Corante               | 10 – 1000 mg.L <sup>-1</sup>     |
| Cor verdadeira        | 700 – 2000 mg Pt.L <sup>-1</sup> |
| Óleos e graxas        | 30 – 40 mg.L <sup>-1</sup>       |
| DBO <sub>5</sub> /DQO | 0,3                              |

Fonte: Adaptado de Storti (2001 *apud* FREITAS, 2002); Tunussi; Alem Sobrinho (2003).

Analisando o Quadro 2, é importante destacar alguns parâmetros que impossibilitam o tratamento biológico desse efluente, como sua alta temperatura, pH alcalino (que necessita de correção), forte coloração e a alta presença de hidrocarbonetos e compostos halogenados (JUSTINO, 2016; MÓDENES *et al.*, 2012)

O Valor Máximo Permitido (VMP) do despejo de efluentes industriais é dado através de resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA). No Art. 16 da Resolução CONAMA nº 430/2011, estão descritas as condições do padrão de lançamento do efluente industrial, sendo seu despejo permitido no corpo hídrico após atender os critérios expostos na Quadro 3.

Quadro 3 – Padrões de lançamento do efluente industrial em corpo receptor

| Parâmetro                         | Padrões de lançamento                 |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| pH                                | 5 – 9                                 |
| Temperatura                       | < 40 °C                               |
| Materiais sedimentáveis           | 1 mL.L <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> |
| Óleos minerais                    | 20 mg.L <sup>-1</sup>                 |
| Óleos vegetais e gorduras animais | 50 mg.L <sup>-1</sup>                 |
| Materiais flutuantes              | Ausência                              |
| DBO <sub>5</sub>                  | Remoção mínima de 60%                 |
| Nitrogênio amoniacal total        | 20 mg.L <sup>-1</sup>                 |
| Sulfetos                          | 1 mg.L <sup>-1</sup>                  |

Fonte: Adaptado de Conama (2011).

A Resolução Conama nº 430/2011 não define padrões de lançamento aos parâmetros que envolvem a coloração do efluente, sendo necessária a busca em outras resoluções para satisfazer esta condição. Logo, a Resolução Conama nº 357/2005 estabelece que, para corpos hídricos de classe 1, a cor verdadeira do efluente deve ser do nível de cor natural do corpo de água; e para os de classe 2 e 3, seu VMP é de 75 mg Pt.L<sup>-1</sup>. Vale ressaltar que a cor verdadeira se refere a determinação em amostras filtradas, diferente de cor aparente, no qual a determinação da cor é realizada em materiais que apresentam turbidez (TUNUSSI, ALEM SOBRINHO, 2003).

Quanto à presença de corantes, os de classe 1 devem ser virtualmente ausentes e os de classe 2 e 3 não são permitidos corantes provenientes de fontes antrópicas que não possam ser

removidos por processos de coagulação, sedimentação e filtração convencionais (CONAMA, 2005).

### 2.1.3 Corantes têxteis

Um dos métodos para realizar a classificação dos corantes é conforme a sua origem de fabricação, podendo ser natural ou sintetizada. Corantes naturais são derivados de recursos naturais, como plantas, animais, minerais, ou ainda, de origem microbianas e fúngicas. A maioria dos corantes naturais utilizados nas indústrias são extraídos das plantas, em que são utilizados os galhos, folhas, flores, cascas, raízes, frutos e caules (NARIMATSU *et al.*, 2020).

O primeiro corante sintético foi descoberto em 1856, pelo químico britânico William Henry Perkin, revolucionando a indústria têxtil e química e dando início à sua produção em escala mundial (PEREIRA; ALVES, 2011).

Atualmente, são classificados como substâncias onipresentes devido à sua alta produção e diversas áreas de aplicação, além de serem relativamente menos caros e terem melhor solidez da cor em comparação aos corantes naturais. Entretanto, diversas substâncias químicas que afetam diretamente a saúde humana são encontradas na composição dos corantes sintéticos, como chumbo, cobre, benzeno, mercúrio e tolueno (YEOW; WONG; HADIBARATA, 2021).

Os corantes sintéticos são os mais utilizados na indústria têxtil, sendo compostos orgânicos formados por duas partes principais em sua molécula: o grupo funcional e o grupo cromóforo (HASSEMER, 2006).

Analisando o Quadro 4, é possível verificar as classificações dos grupos funcionais dos corantes sintéticos, estruturas responsáveis pela fixação das fibras e os principais usos aplicados para cada classe.

Quadro 4 – Classificação dos grupos funcionais de corantes sintéticos

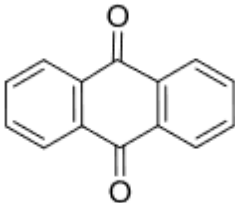
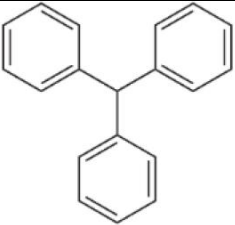
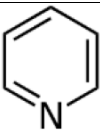
| <b>Classificação</b> | <b>Principais usos</b>   |
|----------------------|--|
| Ácidos               | Seda, lã, couro, náilon, fibras acrílicas modificadas, tinta, papel                              |
| Básicos/Catiônicos   | Couro, papel, lã, palha, acrílico, seda, linho, cânhamo, algodão, rayon, juta, fibra modacrílica |
| Diretos              | Algodão, papel, couro, lã, seda, náilon, linho, rayon, viscose                                   |

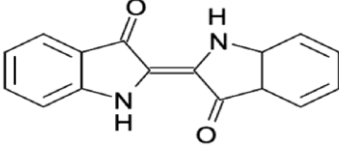

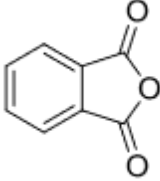
|             |  |
|-------------|--|
| Dispersivos | Nylon, orlon, poliéster, acetato de celulose, fibras de triacetato, fibras de diacetato, acrílico, plásticos |
| Reativos    | Algodão, lã, seda, viscose, náilon, fibra de poliamida   |
| À cuba      | Algodão, fibras, linho, rayon, lã, seda, náilon, poliéster   |
| Sulfúricos  | Algodão, viscose, rayon  |
| Azoicos     | Algodão, fibras sintéticas de poliéster  |
| Mordentes   | Lã, náilon, fibra, algodão, seda, couro, alumínio anodizado  |

Fonte: Adaptado de Yeow, Wong e Hadibarata (2021).

Os corantes também são categorizados com base em suas estruturas químicas, que consistem em um grupo de átomos conhecidos como cromóforos, sendo moléculas orgânicas que absorvem luz em comprimentos de ondas específicos formadas por átomos ou moléculas, que garantem cor aos corantes (TKACZYK; MITROWSKA; POSYNIK, 2020). O Quadro 5 agrupa os principais grupos de cromóforos existentes: azo, antraquinona, triarilmetano, heterocíclico, índigoide, nitroso, nitro e ftaleína.

Quadro 5 – Classificação dos corantes sintéticos conforme sua estrutura química

| Classificação | Estrutura/cromóforo  |
|---------------|--|
| Azo           | $\text{—N=N—}$   |
| Antraquinona  |  |
| Triarilmetano |  |
| Heterocíclico |  |

|           |  |
|-----------|--|
| Índigoide |  |
| Nitroso   | $\text{—N=O}$  |
| Nitro     |  |
| Ftaleína  |  |

Fonte: Adaptado de Tkaczyk, Mitrowska e Posyniak (2020).

É relatado que os corantes azo são a maior classe de corantes sintéticos, sendo aplicados nas indústrias devido à simplicidade da reação de emparelhamento e às extensas possibilidades de variações estruturais para se adaptar às necessidades de aplicações complexas, conforme mostrado no Quadro 5. Os corantes azos são tóxicos e podem causar recalcitrância e salinização dos recursos hídricos, portanto, é crucial que seja realizado o tratamento das águas residuárias antes de descartá-las no corpo d'água (TKACZYK; MITROWSKA; POSYNIK, 2020).

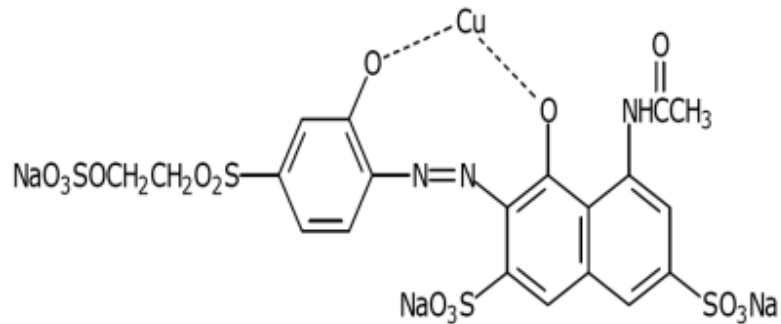
Por se tratar de um composto altamente tóxico, há a limitação do uso de tratamentos biológicos convencionais, uma vez que culturas de microrganismos podem ser perturbadas, resultando em uma baixa eficiência de remoção da coloração do efluente. Logo, alguns processos físicos vêm sendo utilizados a fim de contornar esses empecilhos, como a adsorção, técnica de baixo custo que está ganhando cada vez mais destaque para o tratamento de efluentes com certo grau de toxicidade (GILPAVAS; DOBROSZ-GÓMEZ; GÓMEZ-GARCÍA, 2019; KAUSAR *et al.*, 2018).

#### 2.1.3.1 Remazol Violeta Brilhante – 5R

O corante RBV-5R é composto pelo grupo cromóforo do tipo azo, contendo um ou mais grupamentos ( $\text{—N=N—}$ ) ligados a aminas aromáticas; e reativo, de acordo com o modo de fixação da molécula, por apresentar alta solubilidade em água e pela capacidade de formar ligações covalentes entre a fibra têxtil e sua molécula. Por ser do grupo reativo, o RBV-5R é classificado

como um corante de caráter aniônico. Na Figura 2, pode-se visualizar a estrutura química completa do corante (RIBEIRO, 2012).

Figura 2 – Estrutura química do corante RBV-5R



Fonte: Ribeiro (2012).

Os corantes do tipo azo representam mais de 50% do total comercializado em todo o mundo, sendo uma das principais razões a intensidade inerente do seu cromóforo, propiciando uma alta capacidade tintorial. Além disso, destacam-se pela sua simplicidade estrutural, o que facilita sua síntese, conferindo baixo custo frente a outros tipos de corantes do mercado, como a antraquinona (FERNANDES, 2016; YURTSEVER; CALIMLIOGLU; SAHINKAYA, 2017).

Como já mencionado, a utilização do corante se torna onerosa tanto para o meio ambiente quanto à saúde da população, pois são bioacumuláveis, tóxicos e podem causar doenças de pele, câncer e mutações. Outra preocupação se dá por serem compostos caracterizados como resíduos recalcitrantes, por apresentarem um tempo de vida médio de 50 anos (ALMAGUER, 2018).

## 2.2 ADSORÇÃO

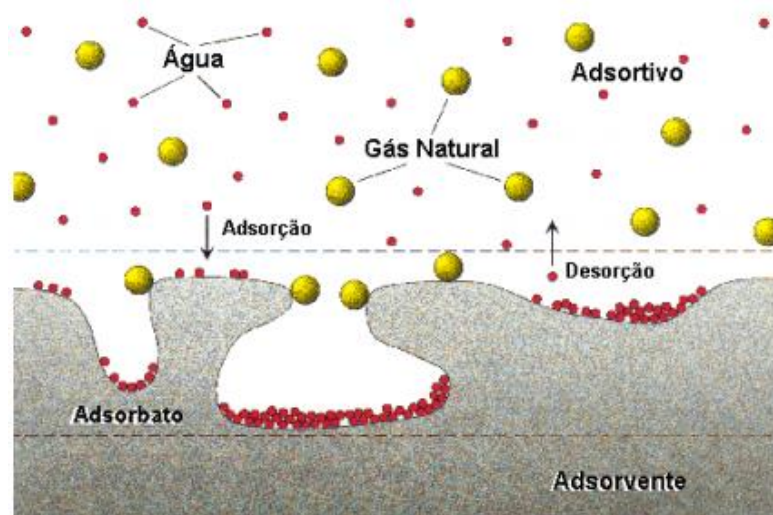
A adsorção vem sendo um dos processos mais eficientes para o tratamento de águas e efluentes industriais, visando reduzir os níveis dos compostos tóxicos e outros poluentes, garantindo que o despejo dessas águas residuárias no corpo hídrico não cause alterações físicas, químicas e/ou biológicas, além de problemas de saúde pública e perda da biodiversidade (YUKSELER *et al.*, 2017).

De acordo com Nascimento *et al.* (2020), o processo adsorptivo é uma operação de transferência de massa, dependente da habilidade de uma massa sólida concentrar constituintes

dissolvidos de uma solução (líquida ou gasosa) em sua superfície, possibilitando a separação dos componentes desse fluido. Quando adsorvidos, tais constituintes mantêm-se na superfície externa ou nos poros da massa sólida.

A substância adsorvida é comumente denominada de adsorvato ou adsorbato; a superfície sólida em que o adsorvato se acumula é chamada de adsorvente ou adsorbente; e adsorativo o fluido que está em contato com o adsorvente. O processo inverso é chamado de dessorção, que se refere ao desprendimento das partículas da massa sólida. (NASCIMENTO *et al.*, 2020). A partir da Figura 3, pode-se observar como acontece o processo de adsorção.

Figura 3 – Esquema do processo de adsorção



Fonte: Nóbrega (2001).

Como pode-se perceber na imagem acima, a adsorção é um processo de superfície, no qual um dos fatores que implicam é o tamanho da área superficial do adsorvente. Existem, no entanto, diversas condições que podem causar ou não o sucesso da adsorção, como será comentado adiante (COSTA, 2018).

O interesse da indústria no uso da adsorção para tratamento de águas residuárias se dá pelo fato de associar baixo custo e altas eficiências. Além disso, alguns tipos de adsorção não são um método destrutivo, ou seja, é possível realizar a dessorção sem perder a identidade química do adsorvente (DALLAGO; SMANIOTTO; OLIVEIRA, 2005).



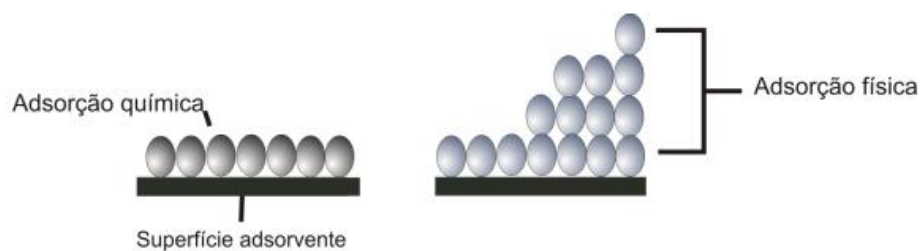
### 2.2.1 Tipos de interações da adsorção

Conforme Nóbrega (2001), as interações presentes na adsorção são consequências de forças atrativas não compensadas na superfície do adsorvente. A natureza das forças envolvidas distingue dois tipos de adsorção, a adsorção física (fissorção); e a adsorção química (quimissorção).

Na adsorção física ocorrem interações de forças de Van der Waals entre o adsorvato e o adsorvente, resultando em uma ligação de longo alcance, fraca, não-específica e com baixos calores de adsorção. Seu valor entálpico é menor que  $40 \text{ kJ.mol}^{-1}$ , não sendo suficiente para romper as ligações químicas presentes na molécula adsorvente, tornando o processo reversível. Além disso, seu equilíbrio é atingido rapidamente, por não depender de energia de ativação; e a adsorção ocorre em multicamadas, como será possível visualizar na Figura 4 (NÓBREGA, 2001; PESSÔA, 2019; RUTZ, 2007).

Já a adsorção química é um processo adsorvente-adsorvato mais intenso e específico, pois ocorre a transferência de elétrons, possibilitando a formação de uma ligação química entre ambos, mas limita-se à cobertura monocamada (Figura 4). Por ser uma interação de natureza iônica e/ou covalente, a entalpia envolvida no processo pode variar de 250 a  $500 \text{ kJ.mol}^{-1}$ . Em muitos casos, a quimissorção é um processo irreversível, pois o adsorvato sofre uma mudança química, lesionando sua integridade (NÓBREGA, 2001; PESSÔA, 2019; RUTZ, 2007).

Figura 4 – Representação esquemática da formação de camadas de adsorvato pelos processos de quimissorção e fissorção



Fonte: Guimarães (2015).

### 2.2.2 Materiais adsorventes

Os materiais adsorventes são substâncias naturais ou sintéticas responsáveis por reter as partículas dos poluentes em sua superfície durante a adsorção. Na maioria das vezes, esse material encontra-se no estado sólido, havendo diversas características associadas ao seu grau de adsorção e à sua estrutura porosa (MARÍN, 2015).

O carvão ativado é o adsorvente comumente mais conhecido, principalmente por atributos como grande área superficial e alta capacidade de adsorção. Entretanto, devido ao custo elevado, seu uso pode ser economicamente inviável, limitando sua aplicação no processo. Com isso, se estimulou a busca de adsorventes alternativos de baixo custo que possam substituir o carvão ativado. Dessa forma, destacam-se materiais ambientalmente sustentáveis, como o biocarvão (XAVIER *et al.*, 2021).

#### 2.2.2.1 Biocarvão

O biocarvão (ou *biochar*) é um carvão vegetal, animal ou mineral ativado proveniente da decomposição térmica (ou pirólise de biomassa ou resíduos de biomassa). As principais matérias-primas da preparação do biocarvão têm sido resíduos florestais, resíduos agrícolas e a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FAN *et al.*, 2017).

Como esses materiais residuais estão comumente disponíveis a um baixo custo ou mesmo nenhum, eles podem ser devidamente reciclados para a preparação de biocarvão, posteriormente utilizado na remoção de poluentes orgânicos em águas residuais. É importante notar que a biomassa utilizada nesse processo é um produto residual e seu descarte envolve um custo, ao passo que o seu reaproveitamento pode ser caracterizado com a abordagem moderna de gestão de recursos e da economia circular, proporcionando dupla sustentabilidade (DEL BUBBA *et al.*, 2020).

A produção do biocarvão acontece a partir da pirólise. Esse processo ocorre na ausência parcial ou total de oxigênio e o calor aplicado tem a finalidade de quebrar as ligações químicas da biomassa em três tipos de produtos: líquidos (bio-óleos), sólidos (biocarvão) e gasosos. As temperaturas mais baixas e os tempos de residência de vapor mais longos favorecem a produção do biocarvão, resultando em uma economia energética significativa (BRIDGWATER, 2012).

Além disso, o biocarvão é um material rico em carbono, com alta estrutura porosa, grande área superficial, grupos funcionais, fácil separação e baixo custo. Logo, esse material se torna uma alternativa de adsorvente viável para as indústrias realizarem o tratamento de seus efluentes (FAZAL *et al.*, 2020).

### 2.2.3 Fatores que influenciam na adsorção

Há diversos fatores que podem influenciar no desempenho da adsorção, para que a mesma seja eficiente. Entre esses, as condições operacionais, as características do adsorvente e a natureza do adsorvato. Nesta seção, serão descritos alguns deles.

#### 2.2.3.1 Temperatura

A temperatura é um indicador que dirá se a adsorção está ocorrendo por um processo exotérmico ou endotérmico. Se a capacidade de adsorção diminui com o aumento da temperatura, indica que o processo é exotérmico. Tal aumento faz com que as moléculas ganhem energia vibracional, aumentando a agitação e a força de repulsão entre o adsorvato e o adsorvente, resultando no processo inverso, a dessorção. Em contrapartida, se a capacidade de adsorção aumenta com o aumento da temperatura, o processo é endotérmico. Isso pode ocorrer devido à provável expansão dos sítios ativos que proporcionam a adsorção (CARDOSO, 2017; SALLEH *et al.*, 2011).

A influência da temperatura na adsorção vai depender do tipo de adsorvato presente na solução. Estudos de Salleh *et al.* (2011) indicam que a adsorção de corantes aniônicos é exotérmica, enquanto a adsorção de corantes catiônicos é endotérmica. Outrossim, Câmara (2010) relata que a adsorção física tende a ser um processo exotérmico. Rápó *et al.* (2019) verificaram que o aumento da temperatura da solução na faixa de 20, 30 e 40 °C diminuiu a eficiência do processo adsorptivo do corante RBV-5R, caindo até 7,5%.

#### 2.2.3.2 Potencial Hidrogeniônico (pH)

O pH de uma solução é responsável pelo controle da magnitude das cargas eletrostáticas que são transmitidas pelas moléculas do corante ionizado. Na maioria dos casos, em soluções de baixo pH, a porcentagem de remoção de corantes de caráter aniônico aumentará, enquanto para os corantes catiônicos diminuirá. Isso ocorre em função do aumento da carga positiva na interface de uma solução, em que a superfície do adsorvente parecerá carregada positivamente. Já para soluções de pH alto, a adsorção de corantes de caráter catiônicos aumenta, ao passo que diminui para os corantes aniônicos. Isso se dá pela diminuição da carga positiva na interface da solução, na qual a superfície do adsorvente parece carregada negativamente (SALLEH *et al.* 2011).

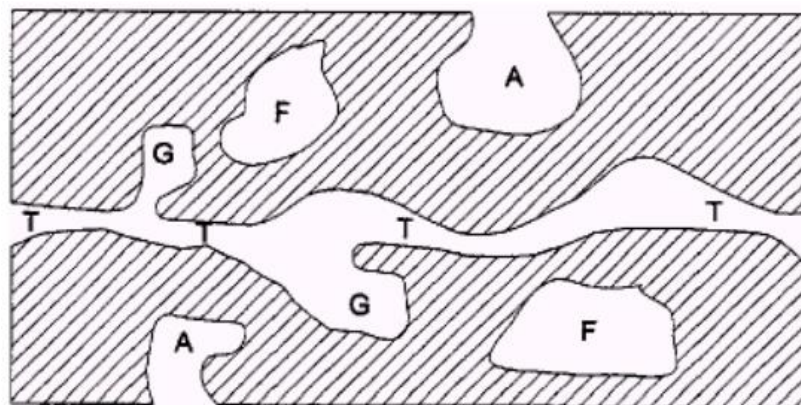
### 2.2.3.3 Área Superficial e Porosidade

Como a adsorção é um processo de superfície, visto que o adsorvato fica aderido na superfície do adsorvente, o aumento da área superficial irá beneficiar o processo de adsorção. Entretanto, há dois tipos de área superficial em um sólido: externa, representada pela superfície entorno da partícula; e interna, formada pelos sulcos, poros e cavidades longitudinais, sendo esta a maioria total da área total dos sólidos (ANDRADE, 2014).

Contudo, a porosidade é outro importante aspecto para avaliar o desempenho do processo adsorativo. Sendo assim, a *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC) estabelece uma classificação porosa dividida em dois tipos: quanto à sua forma e quanto à sua dimensão (IUPAC, 1982 *apud* CLAUDINO, 2003; COSTA, 2018).

Quanto à sua forma, é possível identificar os diferentes tipos de poros através da Figura 5. Os poros abertos (A), são os que possuem abertura com a superfície externa da partícula; os poros fechados (F), são os que ficam isolados, não havendo comunicação com a superfície externa; os poros de transporte (T), são poros abertos que permitem a passagem de um fluido; e os poros de gaiola (G), são poros limitados, que se formam a partir dos poros de transporte que não contribuem para o fenômeno. Já quanto à dimensão dos poros, suas características e funções são sumarizados no Quadro 6 (IUPAC, 1982 *apud* CLAUDINO, 2003).

Figura 5 – Esquema apresentando os diferentes tipos de poros em um sólido quanto à sua forma



Fonte: Claudino (2003).

Quadro 6 – Classificação de poros quanto à sua dimensão e sua função principal

| <b>Tipo de Poro</b> | <b>Diâmetro Médio</b>                   | <b>Função Principal</b>  |
|---------------------|---|--|
| Microporos          | $\Phi_m < 2 \text{ nm}$                 | Contribuem para a maioria da área superficial que proporciona alta capacidade de adsorção para moléculas de dimensões pequenas, tais como gases e solventes comuns.  |
| Mesoporos           | $2 \text{ nm} < \Phi_m < 50 \text{ nm}$ | São importantes para a adsorção de moléculas grandes tais como corantes e proporcionam a maioria da área superficial para carvões impregnados com produtos químicos. |
| Macroporos          | $\Phi_m > 50 \text{ nm}$                | São normalmente considerados sem importância para a adsorção e sua função é servir como meio de transporte para moléculas gasosas.                                   |

Fonte: Adaptado de IUPAC (1982 *apud* CLAUDINO, 2003).

Observa-se que o tipo ideal de poros para adsorver corante são os mesoporos, compreendidos entre 2 nm e 50 nm.

#### 2.2.3.4 Concentração de adsorvato

Quanto maior a concentração inicial de adsorvato, maior é a competição da adsorção dessas moléculas na superfície do adsorvente, propiciando a formação de multicamadas em sua superfície, no caso da fissorção, sendo que o número de camada é variado conforme as propriedades da superfície em questão. Já na quimissorção, o processo comumente é irreversível, ocorrendo a saturação do adsorvente quando todos os locais ativos são ocupados (CARDOSO, 2017).

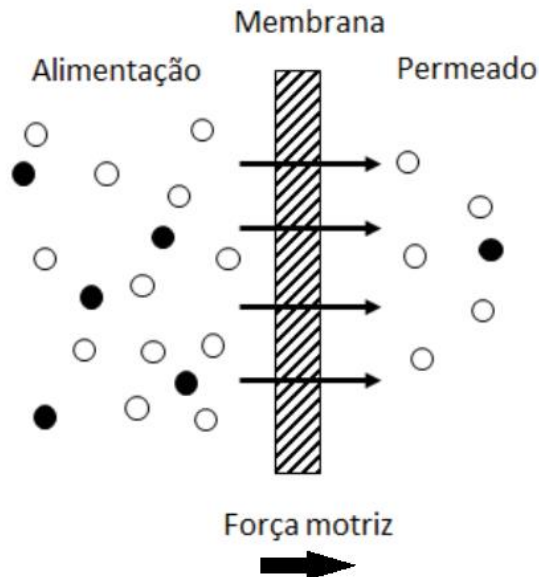
### 2.3 PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

Associando a adsorção com técnicas distintas para o tratamento de águas residuárias, faz-se necessário realizar a separação entre a solução aquosa e o material adsorvente. Com isso, o Processo de Separação por Membranas (PSM) vem recebendo crescente atenção por se tratar de uma técnica simples, eficaz e de baixo custo (SANTOS, 2013).

Os PSMs são processos de filtração que permitem a separação dos sólidos dissolvidos ou no estado coloidal em amostras líquidas, utilizando membranas sintéticas. Tais membranas agem como uma barreira seletiva que separa as duas fases e limita o transporte de uma ou mais espécies químicas (HABERT; BORGES; NÓBREGA, 2006).

Nesse processo, a solução aquosa é forçada contra a superfície da membrana por meio de uma força motriz, que reterá as partículas de determinados sólidos concentrados e permitirá a passagem do permeado (LI *et al.*, 2021), conforme representado na Figura 6.

Figura 6 – Representação esquemática do PSM



Fonte: Adaptado de Mulder (1996 *apud* MELO, 2020).

O fluxo de permeado que passará pela membrana é proporcional à força motriz aplicada, existindo uma relação linear entre esses dois fatores. A força motriz é uma diferença de potencial químico ou elétrico que atua nos componentes do sistema. Como exemplos de força motriz temos o gradiente de pressão, concentração, elétrico ou temperatura. No entanto, os PSMs mais utilizados empregam o uso do gradiente de pressão para realizar a filtração (MULDER, 2003 *apud* BELLI, 2015; MELO, 2020). O Quadro 7 sintetiza as principais características presentes nos quatro processos comumente mais utilizados no PSM.

Quadro 7 – Características dos principais PSMs

| <b>Processo</b> | <b>Força motriz</b>                  | <b>Diâmetro de poros (nm)</b> | <b>Material que permeia</b>                 | <b>Aplicações</b>   |
|-----------------|--------------------------------------|-------------------------------|---|---|
| Microfiltração  | Diferença de pressão (0,01 – 0,2 Pa) | 10.000 – 100                  | Água e sólidos dissolvidos                  | Esterilização bacteriana; clarificação (vinhos e cervejas); concentração de células; oxigenação do sangue |
| Ultrafiltração  | Diferença de pressão (0,1 – 0,5 Pa)  | 100 – 10                      | Água e sais solúveis de baixa massa molar   | Fracionamento/concentração de proteínas; recuperação de pigmentos/óleos                                   |
| Nanofiltração   | Diferença de pressão (0,5 – 1,5 Pa)  | 10 – 1                        | Água, sais e moléculas de baixa massa molar | Purificação de enzimas; Biorreatores a membrana   |
| Osmose inversa  | Diferença de pressão (1 – 10 Pa)     | < 1                           | Água  | Dessalinização e/ou desmineralização de águas; concentração de suco de frutas                             |

Fonte: Adaptado de Habert, Borges e Nóbrega (2006); Li *et al.*, (2021); Lovatel (2011).

Como visto acima, os PSMs podem ter diversas aplicações industriais, como têxteis, metalúrgicos, alimentícios e de bebida, papel e celulose, biotecnológicos e farmacêuticos. Além disso, a microfiltração e ultrafiltração são comumente aplicadas para o tratamento de águas residuárias, enquanto a nanofiltração e osmose inversa para o tratamento de água, por demandarem um afluente de melhor qualidade (BELLI, 2015; MELO, 2020).

### 3 METODOLOGIA

Esta pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Biorreatores a Membrana para Tratamento de Efluentes (LABIOTRATE), pertencente ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), *Campus Alto Vale*. Os ensaios foram divididos em duas finalidades de verificação: quanto à adsorção e quanto à filtração.

#### 3.1 EFLUENTE TÊXTIL SINTÉTICO

O efluente têxtil sintético utilizado nos ensaios da pesquisa foi produzido no próprio laboratório, composto basicamente por fonte de carbono orgânico, macro e micronutrientes e o azo corante RBV-5R. As concentrações dos compostos utilizados na produção do efluente estão dispostas no Quadro 8, as quais foram adaptadas de Çinar *et al.* (2008).

Quadro 8 – Composição do efluente têxtil sintético

| Composto               | Fórmula Química   | Concentração mg.L <sup>-1</sup> |
|------------------------|---|---------------------------------|
| Cloreto de Amônio      | NH <sub>4</sub> Cl  | 230                             |
| Bicarbonato de Sódio   | NaHCO <sub>3</sub>  | 668                             |
| Fosfato Monopotássico  | KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>   | 47                              |
| Sacarose               | C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>   | 1.339                           |
| Cloreto de Sódio       | NaCl  | 126                             |
| Azo Corante RBV-5R     | C <sub>20</sub> H <sub>16</sub> N <sub>3</sub> Na <sub>3</sub> O <sub>15</sub> S <sub>4</sub> | 50                              |
| Cloreto de Ferro (III) | FeCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O  | 1,25                            |
| Cloreto de Manganês    | MnCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O  | 0,12                            |
| Cloreto de Zinco       | ZnCl <sub>2</sub>   | 0,01258                         |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para a produção do efluente, todos os compostos foram pesados em uma balança de precisão e posteriormente dissolvidos em água até completar o volume necessário para realizar os ensaios desta pesquisa. O corante utilizado no estudo foi disponibilizado pela empresa DyStar Indústria e Comércio de Produtos Químicos LTDA, localizada na cidade de Apiúna/SC.

#### 3.2 BIOCARVÃO

O material adsorvente utilizado nos ensaios desta pesquisa é o biocarvão, proveniente da usina Engie Brasil, produtora privada de energia elétrica, na Unidade de Cogeração de Lages, que possui uma unidade geradora com capacidade de 28 MW, a partir da biomassa residual da madeira utilizada na região (ENGIE BRASIL, 2021).



O biocarvão é obtido a partir da pirólise da biomassa de resíduo florestal; as cinzas resultantes passam por um lavador de gases e são conduzidas ao pátio da usina, sendo armazenadas e, posteriormente, descartadas. As temperaturas do processo podem variar de 900 a 1.000 °C, produzindo um material com alto potencial de adsorção. O biocarvão em questão não é mais aproveitado durante o processo industrial, podendo ser classificado como um material residual de baixo custo passível de reutilização.

A caracterização da formação e composição físico-química deste material foi realizada através de alguns estudos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias – CAV da UDESC. A Tabela 2 e a Tabela 3 mostram os valores médios de alguns parâmetros da composição elementar química orgânica e inorgânica, respectivamente, avaliados por Henne (2018).

Tabela 2 – Composição elementar química orgânica do biocarvão

| Parâmetro  | Valor médio (%) |
|------------|-----------------|
| Carbono    | 76,45           |
| Hidrogênio | 2,38            |
| Enxofre    | 0,22            |
| Nitrogênio | 0,16            |

Fonte: Adaptado de Henne (2018).

Tabela 3 – Composição elementar inorgânica e na forma de óxidos

| Composição elementar inorgânica |                 | Composição elementar inorgânica na forma de óxidos |                 |
|---------------------------------|-----------------|--|-----------------|
| Parâmetro                       | Valor médio (%) | Parâmetro  | Valor médio (%) |
| Al                              | 0,19            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                     | 0,39            |
| Ca                              | 0,42            | CaO  | 0,59            |
| Cr                              | 0,00            | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                     | 0,00            |
| Cu                              | 0,002           | CuO  | 0,003           |
| Fe                              | 0,129           | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                     | 0,16            |
| K                               | 0,22            | K <sub>2</sub> O                                   | 0,28            |
| Mg                              | 0,15            | MgO  | 0,26            |
| Mn                              | 0,04            | MnO  | 0,05            |
| Na                              | 0,0003          | NaO <sub>2</sub>                                   | 0,0004          |
| P                               | 0,03            | P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                      | 0,06            |
| Pb                              | 0,0001          | PbO  | 0,0001          |
| Si                              | 3,32            | SiO <sub>2</sub>                                   | 7,09            |
| Zn                              | 0,007           | ZnO  | 0,004           |

Fonte: Adaptado de Henne (2018).

Além dos parâmetros citados acima, Henne (2018) discorre quanto aos valores médios da composição imediata do biocarvão, tendo 63,46% de teor de carbono fixo, 24,64% de

materiais voláteis e 3,78% de cinzas. Ainda, o autor analisa o teor de umidade médio do material, sendo de 88,40%.

A granulometria foi caracterizada no Laboratório de Solos do 1º Batalhão Ferroviário de Lages/SC por ensaios de peneiramento, com o biocarvão na forma granular, respeitando a Norma Brasileira (NBR) 7211/1987, conforme citado por Bocasanta (2019), obtendo os valores expressos no Quadro 9.

Quadro 9 – Parâmetros granulométricos do biocarvão granular

| Parâmetro                    | Conceito   | Valor  |
|------------------------------|--|--------|
| $d_{10}$                     | É definido como o diâmetro de abertura que permite a passagem de 10% da amostra do material granular, caracterizando o menor diâmetro de partícula | 1,3 mm |
| $d_{60}$                     | Diâmetro de abertura que permite a passagem a passagem de 60% do material granular   | 2,6 mm |
| Coefficiente de uniformidade | Relação presente entre o $d_{60}$ e $d_{10}$ . Quanto mais próximo de 1, mais uniforme será o material   | 2      |

Fonte: Adaptado de Deus *et al.* (2020); Henne (2018).

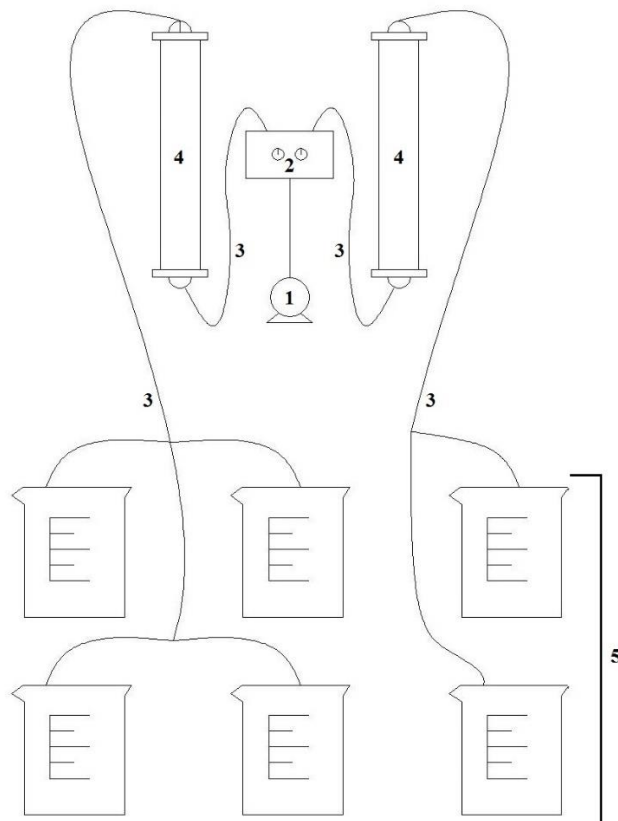
Vale ressaltar que o Quadro 9 refere-se a granulometria do biocarvão granular. A granulometria do biocarvão em pó não foi realizada devido à falta de equipamentos necessários, entretanto, os parâmetros  $d_{10}$  e  $d_{60}$  são menores que os apresentados.

### 3.3 ENSAIOS DE ADSORÇÃO

Para avaliar a eficiência da adsorção no biocarvão e assim estimar a remoção de cor verdadeira e corante, foram realizados testes em escala de bancada, empregando um sistema de 6 béqueres de 600 mL. Em cada béquer, foi transferido 500 mL do efluente têxtil sintético e adicionadas as concentrações de 0,5, 1, 5, 10 e 20 g.L<sup>-1</sup> de biocarvão, respectivamente, deixando um béquer sem a adição do adsorvente (controle).

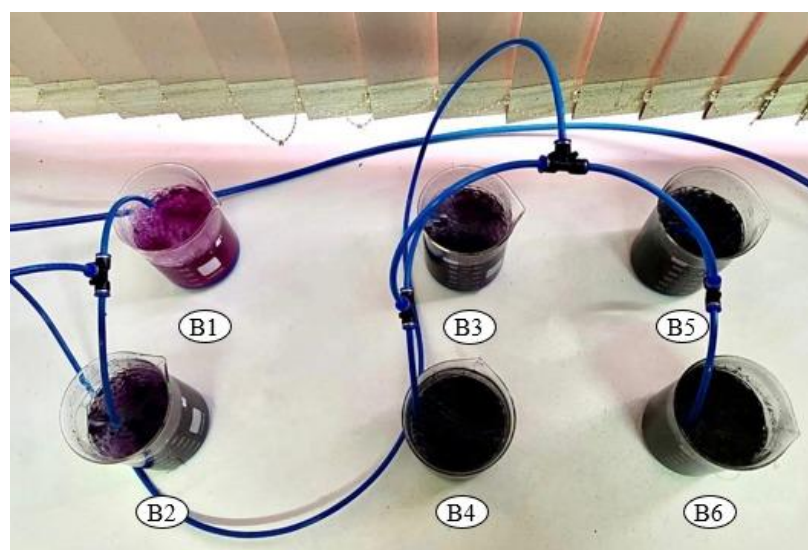
A mistura do efluente com o biocarvão foi promovida por meio de um dispositivo de aeração, dada a falta de equipamentos como o misturador, fornecendo assim um ambiente aeróbio no interior dos béqueres. A Figura 7 representa esquematicamente o ensaio, a Figura 8 o sistema de béqueres, simulando os reatores aeróbios, e a Tabela 4 indica a concentração de biocarvão de cada béquer, bem como a sua forma de aplicação em cada estratégia operacional.

Figura 7 – Representação esquemática do ensaio de adsorção



\*1: Aerador; 2: Botões de controle da vazão de ar; 3: Mangueiras de ar; 4: Rotômetros; 5: Sistema de béqueres.  
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 8 – Sistema de béqueres contendo o efluente têxtil e diferentes concentrações de biocarvão



\*B1: sem biocarvão; B2: 0,5 g.L<sup>-1</sup>; B3: 1 g.L<sup>-1</sup>; B4: 5 g.L<sup>-1</sup>; B5: 10 g.L<sup>-1</sup>; B6: 20 g.L<sup>-1</sup>.  
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 4 – Estratégias operacionais e nomenclatura dos béqueres do sistema com a concentração de biocarvão aplicada

| Estratégia Operacional   |     |     | Forma do biocarvão |      |      |
|--|-----|-----|--------------------|------|------|
| E-1  |     |     | Granular           |      |      |
| E-2  |     |     | Em pó              |      |      |
| Concentração de biocarvão aplicada em cada béquer (g.L <sup>-1</sup> ) |     |     |                    |      |      |
| B1   | B2  | B3  | B4                 | B5   | B6   |
| 0,0  | 0,5 | 1,0 | 5,0                | 10,0 | 20,0 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Como mencionado no item 3.2, o biocarvão contém um alto teor de umidade, sendo necessária a secagem do material para que não ocorra a interferência nos resultados futuros. Com isso, foi realizada a retirada da umidade em uma Estufa de Laboratório Fanen Retilínea, com a temperatura entre 70 e 80 °C em um período de 24 horas.

Após a secagem do biocarvão, foram separadas as amostras do biocarvão granular (BCG) utilizadas na E-1. Para obter o biocarvão em pó (BCP), adicionado na E-2, foi necessária realizar sua trituração com o auxílio de grau e pistilo. Em seguida, a fim de se ter uma homogeneidade na dimensão das partículas, o material triturado passou por um peneiramento simples, resultando no BCP final. Por fim, foi realizada a pesagem da massa de biocarvão utilizada nas duas estratégias em uma balança de precisão. Na Figura 9 é possível visualizar a diferença no aspecto do BCG e BCP.

Figura 9 – Amostras do BCG e BCP, respectivamente



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Cada estratégia foi analisada durante 24 horas de operação, em que alíquotas de cada béquer foram retiradas para caracterizar em termos de cor verdadeira e concentração de corante, nos tempos fixos de 0, 1, 2, 3, 7, 12 e 24 horas. A temperatura dos experimentos esteve sujeita

a temperatura ambiente, medida por um termômetro digital, próxima a  $22 \pm 1$  °C, enquanto o pH da mistura “biocarvão e efluente” foi de 6,6.

A quantidade de corante adsorvida no biocarvão foi estimada por meio da Equação 1 e o percentual de remoção dessa substância foi obtido por meio da Equação 2 (HADDAD *et al.*, 2014).

$$q = \frac{C_0 - C}{C_a} \quad (1)$$

$$\%_{Remoção} = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

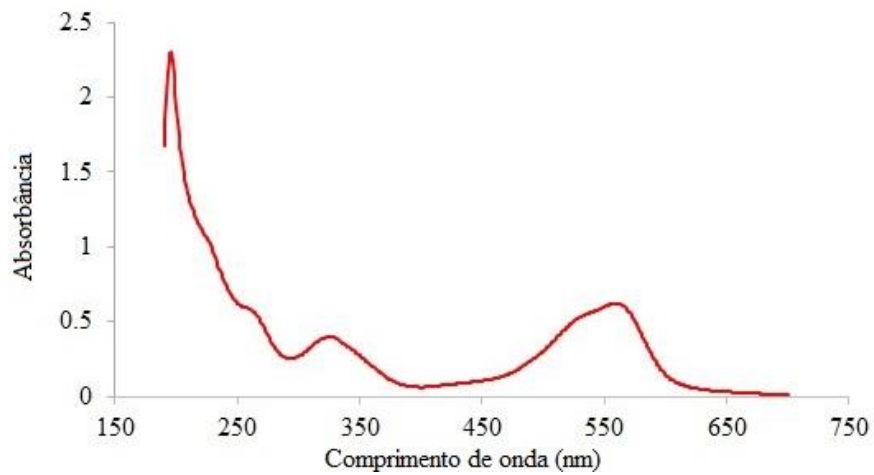
onde q é a quantidade adsorvida ( $\text{mg.g}^{-1}$ ),  $C_0$  corresponde a concentração inicial do adsorvato ( $\text{mg.L}^{-1}$ ), C a concentração final do adsorvato ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) e  $C_a$  é a concentração de adsorvente ( $\text{g.L}^{-1}$ ).

### 3.3.1 Métodos analíticos

Para a determinação da concentração dos parâmetros de cor verdadeira e corante, foram retiradas amostras de cada reator e submetidas à filtração em membrana de acetato de celulose com porosidade de 0,45  $\mu\text{m}$ . Em seguida, o permeado obtido foi submetido à leitura de absorbância em Espectrofotômetro Hach modelo DR/3900.

Para avaliar a remoção do corante, utilizou-se o comprimento de onda de 560 nm, no qual o corante RBV-5R apresentou maior absorção na faixa visível do espectro, como pode ser observado na Figura 10. A cor verdadeira, por sua vez, foi analisada sob comprimento de onda de 455 nm, seguindo os procedimentos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* da American Public Health Association (APHA, 2012).

Figura 10 – Absorção do azo corante RBV-5R

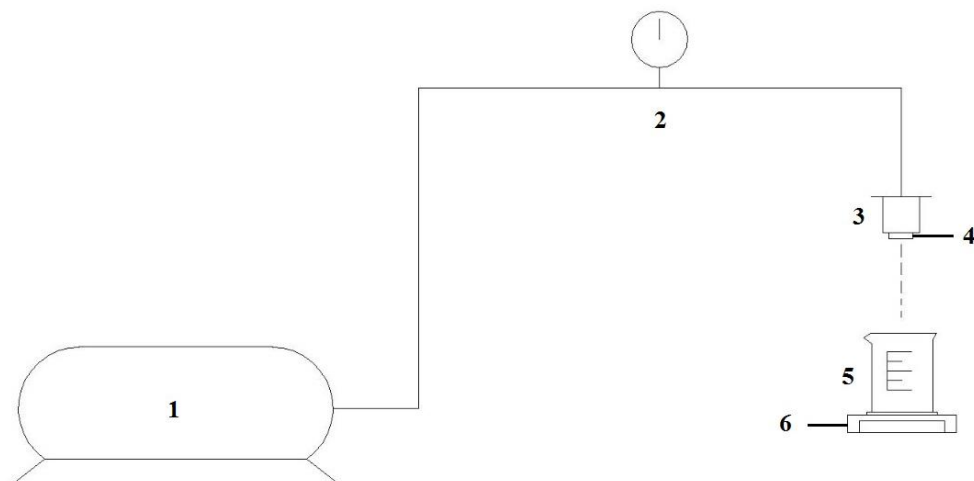


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

### 3.4 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO

O ensaio de filtração é crucial para a separação entre a solução aquosa e o material adsorvente aplicado, quando há a associação da adsorção com outras técnicas para o tratamento de águas residuárias. Deste modo, foram realizados ensaios de bancada de filtração frontal em membrana, para avaliar a filtrabilidade da solução contendo o biocarvão e o efluente têxtil. Tais ensaios foram conduzidos em unidade experimental representada na Figura 11.

Figura 11 – Representação esquemática do ensaio de filtração



\*1: Aerador; 2: Manômetro; 3: Sistema de filtração; 4: Membrana de acetato de celulose; 5: Béquer; 6: Balança analítica.

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Uma unidade de filtração de acrílico com volume de 250 mL foi utilizada na execução dos ensaios. Para uma melhor interpretação dos resultados, os experimentos foram conduzidos em duas modalidades de filtração: 1) sem aplicação de biocarvão (apenas efluente têxtil) e; 2) com aplicação do biocarvão. Para essa última, foram testados tanto a utilização do BCG quanto o BCP.

Após o preenchimento da unidade de filtração, a solução era filtrada por uma membrana de acetato de celulose plana com porosidade de 0,20  $\mu\text{m}$  e área superficial de 0,001  $\text{m}^2$ , sob vácuo de 0,1 bar. Para definir o tempo de ensaio, optou-se por iniciar o experimento com a filtração de 750 mL do efluente sem a aplicação de biocarvão, sendo que a cada 30 segundos registrava-se o volume filtrado e coletado por um béquer posicionado em uma balança analítica. O tempo resultante foi definido para o restante do ensaio.

Caso o efluente fosse todo filtrado, o ensaio era pausado e adicionava-se mais 250 mL do conteúdo, até completar o tempo necessário. O conteúdo era rapidamente misturado com o biocarvão resultante do processo anterior, a fim de garantir o contato mais homogêneo possível. A permeabilidade de cada estratégia foi calculada a partir da Equação 3 (PRONER, 2018).

$$Perm = \frac{V}{t \times A \times P} \quad (3)$$

onde Perm é a permeabilidade ( $\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ ), V corresponde ao volume filtrado (L), t é o tempo de filtração (h), A a área da membrana ( $\text{m}^2$ ) e P a pressão aplicada (bar).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação e discussão dos resultados obtidos nesta pesquisa foi dividida em três itens. O item 4.1 discorre sobre o ensaio de adsorção do RBV-5R, a partir da análise dos parâmetros de cor verdadeira e corante, e compara a eficiência das duas estratégias aplicadas no estudo (4.1.3). O item 4.2 disserta sobre o ensaio de separação da mistura “biocarvão e efluente”, com base na verificação da permeabilidade de cada estratégia empregada. E, por fim, o item 4.3 faz algumas considerações sobre a disposição final do biocarvão.

### 4.1 ENSAIOS DE ADSORÇÃO

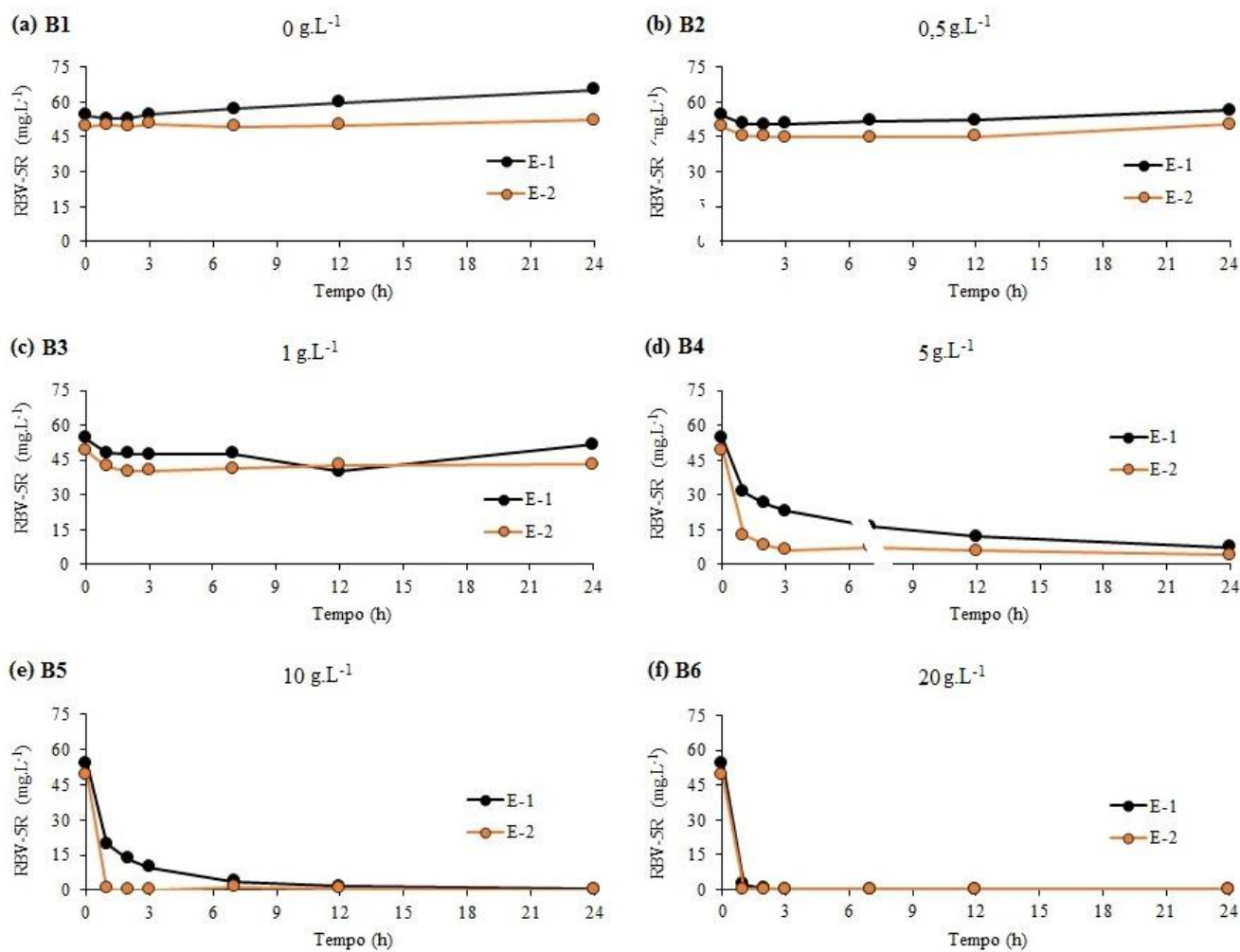
Este ensaio foi realizado em duas estratégias operacionais, com o intuito de analisar a maior eficiência quanto à forma de aplicação do biocarvão (granular ou em pó), em que a apresentação dos resultados e discussão foram subdivididas em duas seções, observando cada parâmetro separadamente e a eficiência global de adsorção das estratégias operacionais.

#### 4.1.1 Adsorção do azo corante RBV-5R

A Figura 12 apresenta os valores da concentração do azo corante RBV-5R nos béqueres B1, B2, B3, B4, B5 e B6 (sem adição de biocarvão, com adição de 0,5, 1, 5, 10 e 20 g.L<sup>-1</sup> de biocarvão, respectivamente), nas estratégias operacionais E-1 (BCG) e E-2 (BCP), durante a operação do ensaio.



Figura 12 – Comportamento da concentração de azo corante RBV-5R nas duas estratégias operacionais nos béqueres B1 (a), B2 (b), B3 (c), B4 (d), B5 (e) e B6 (f)



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Como é possível observar na Figura 12-a, do béquer controle, houve um aumento da concentração do azo corante, sendo inicialmente de 54,35 passando para 65,13 mg.L<sup>-1</sup> na E-1 e, na E-2, de 49,33 para 52,11 mg.L<sup>-1</sup>. Outros pesquisadores avaliaram o aumento da concentração de azo corantes quando expostos ao tratamento em ambiente aeróbio. Uma explicação seria a recoloração, que é definida pela tendência de azo corantes realizarem o processo de auto-oxidação, gerando compostos altamente recalcitrantes (JONSTRUP *et al.*, 2011; KORENAK *et al.*, 2017; SIVA, 2018).

Analisando os resultados obtidos nos experimentos B2 e B3 (Figura 12b-c), as concentrações do azo corante seguem o mesmo comportamento do béquer de controle (B1), diferenciando-se nas primeiras horas do ensaio, em que há uma pequena parcela adsorvida e, após isso, observa-se a saturação do biocarvão, possibilitando exclusivamente o processo de auto-oxidação do corante restante do efluente.

Em relação ao tipo de uso do biocarvão, sua forma em pó obteve a maior quantidade de corante adsorvida em sua superfície. Este motivo é explicado pelo aumento da área superficial externa da partícula em pó quando comparado ao granular, potencializando sua capacidade adsorptiva (DELGADO *et al.*, 2019). Dembogurski (2019) encontrou um aumento de até 40% da área superficial do carvão ativado em pó em relação ao granular, utilizado em seu estudo.

Nota-se que a partir da concentração de 5 g.L<sup>-1</sup> de biocarvão adicionado (Figura 12-d), não houve o aumento da concentração do RBV-5R. Supõe-se que isso ocorra em virtude da quantidade de biocarvão presente nesse béquer ser suficiente tanto para adsorver o corante inicialmente existente, quanto aquele gerado a partir do processo de recoloração, descrito anteriormente.

Na Figura 12-e, é possível analisar maior eficiência de adsorção na E-2, visto que logo na primeira hora de ensaio a concentração de corante foi de 49,33 para 0,73 mg.L<sup>-1</sup>, enquanto na E-1, a concentração inicial era de 54,35 passando para 19,62 mg.L<sup>-1</sup> após o mesmo tempo de ensaio. Com a utilização do BCG, só foi possível chegar a uma concentração tão baixa do azo corante após 24h de ensaio (0,43 mg.L<sup>-1</sup>).

Já na Figura 12-f, com 20 g.L<sup>-1</sup> de biocarvão adicionado, foi constatada a adsorção completa do azo corante nas duas estratégias operacionais, sendo na E-1 após 7h de operação e, na E-2, após 1h de operação. Entretanto, logo na primeira hora da primeira estratégia, foi verificada uma concentração de 2,24 mg.L<sup>-1</sup> de corante, resultando em um alto índice de adsorção.

Logo, observando o comportamento dos dois últimos béqueres (Figura 12e-f), conclui-se que a utilização do biocarvão em forma de pó é a mais indicada, devido ao aumento de sua

área superficial (DEMBOGURSKI, 2019). Com esse aumento, a disponibilidade de sítios ativos para adsorver os poluentes presentes no efluente também é maior, no que faz com que o BCP necessite de uma menor concentração aplicada em relação ao BCG e obtenha percentuais de eficiência superiores.

A quantidade adsorvida do azo corante por grama de biocarvão (Equação 1), bem como a eficiência de adsorção do RBV-5R (Equação 2) estão expostas na Tabela 5, abrangendo as duas estratégias operacionais. Os valores da concentração do corante aplicados na equação foram obtidos no fim da realização do ensaio, no tempo de 24 horas; as concentrações iniciais do corante na E-1 e E-2 foram de 54,35 e 49,33 mg.L<sup>-1</sup>, respectivamente; e a concentração de adsorvente foi utilizada a adotada aos béqueres B2 ao B6.

Tabela 5 – Quantidade adsorvida por grama de biocarvão e a eficiência de adsorção do RBV-5R nas duas estratégias operacionais

| Quantidade adsorvida de RBV-5R por grama de biocarvão (mg.g <sup>-1</sup> ) |  |       |       |        |        |
|---|--|-------|-------|--------|--------|
| Estratégia  | Concentração de biocarvão (g.L <sup>-1</sup> ) |       |       |        |        |
|   | B2   | B3    | B4    | B5     | B6     |
|   | 0,5  | 1,0   | 5,0   | 10,0   | 20,0   |
| E-1   | -4,14  | 2,81  | 9,38  | 5,39   | 2,72   |
| E-2   | -1,70  | 6,20  | 9,02  | 4,93   | 2,47   |
| Eficiência de adsorção do azo corante RBV-5R (%)                            |  |       |       |        |        |
| Estratégia  | Concentração de biocarvão (g.L <sup>-1</sup> ) |       |       |        |        |
|   | B2   | B3    | B4    | B5     | B6     |
|   | 0,5  | 1,0   | 5,0   | 10,0   | 20,0   |
| E-1   | -3,81  | 5,17  | 86,27 | 99,21  | 100,00 |
| E-2   | -1,72  | 12,57 | 91,43 | 100,00 | 100,00 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Observa-se que a utilização do BCP resultou em uma maior eficiência em todas as condições experimentais avaliadas. Vale salientar que apenas no B2, com concentração de 0,5 g.L<sup>-1</sup> de biocarvão, a eficiência foi negativa, ou seja, a concentração final do corante RBV-5R foi maior que a inicial, devido ao processo de recoloração. Ademais, a eficiência no B3 não foi satisfatória, sendo que o maior percentual foi alcançado na E-2, com 12,57%.

Analisando a quantidade adsorvida de corante, nota-se que a maior relação foi com a concentração de biocarvão aplicada em 5 g.L<sup>-1</sup>, tanto granular (E-1) como em pó (E-2). A partir disso, infere-se que essa seja a concentração ótima de biocarvão que resulte em uma maior massa de corante adsorvido por massa de biocarvão utilizado. Contudo, ressalta-se que sob a concentração de 5 g.L<sup>-1</sup>, não foi possível assegurar a adsorção total do corante analisado (Figura 12-d), tanto para o BCG quanto para o BCP.

Por outro lado, o experimento com as concentrações de 10 e 20 g.L<sup>-1</sup> foram aqueles capazes de garantir total adsorção do corante presente no efluente. Sendo assim, a utilização ideal do biocarvão aplicado na unidade experimental é de 10 g.L<sup>-1</sup>, com as características empregadas na E-2, utilizando o BCP, no qual apresentou uma cinética de adsorção altamente eficiente, com uma menor concentração de biocarvão adicionada.

Gokulan *et al.* (2020) analisaram a adsorção do RBV-5R a partir do BCG derivado de algas, obtendo maior eficiência de adsorção (85%) também sob concentração de 10 g.L<sup>-1</sup>. No estudo, os autores analisaram apenas a capacidade adsorvente do carvão granular.

Rápó *et al.* (2019) também estudaram o comportamento da adsorção do RBV-5R, mas utilizando biocarvão a partir da calcinação da casca do ovo, no qual obtiveram uma eficiência de adsorção de 96,86% para a concentração de 1,5 g.L<sup>-1</sup>. Pessoa (2019), por sua vez, verificou a eficiência de adsorção utilizando biocarvão a partir do endocarpo do açaí, para adsorção do corante azul de metileno, obtendo eficiência de 92% com a concentração de BCG de 4 g.L<sup>-1</sup>.

É importante salientar que esses estudos obtiveram uma eficiência maior de adsorção do corante, utilizando menor concentração de material adsorvente, por se tratar de soluções aquosas contendo apenas o mesmo.

Na pesquisa em questão, a solução aquosa é o próprio efluente têxtil, contendo outros compostos, como matéria orgânica, nitrogênio amoniacal e fosfato. Com isso, há a adsorção de todos os poluentes presentes no efluente, diminuindo a disponibilidade dos sítios ativos para a adsorção do corante, fazendo com que o processo de adsorção necessite de uma maior concentração de biocarvão para atingir altas eficiências.

#### **4.1.2 Adsorção de cor verdadeira**

Os valores de eficiência de adsorção de cor verdadeira das amostras filtradas para cada béquer com a aplicação biocarvão, nas duas estratégias operacionais, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Eficiência de adsorção de cor verdadeira com BCG e BCP

| Eficiência de adsorção de cor verdadeira (%) |  |           |           |            |            |
|--|--|-----------|-----------|------------|------------|
| Tempo (h)                                    | Concentração de BCG (g.L <sup>-1</sup> ) |           |           |            |            |
|  | B2<br>0,5                                | B3<br>1,0 | B4<br>5,0 | B5<br>10,0 | B6<br>20,0 |
| 1  | 0,00                                     | 7,18      | 40,10     | 60,40      | 92,33      |
| 2  | 4,70                                     | 9,65      | 49,75     | 73,27      | 96,29      |
| 3  | 2,72                                     | 9,41      | 54,21     | 74,75      | 96,53      |
| 7  | 0,99                                     | 8,42      | 65,59     | 88,12      | 96,78      |
| 12   | 1,73                                     | 11,39     | 74,75     | 92,33      | 96,53      |
| 24   | -3,22                                    | 5,45      | 83,42     | 93,56      | 96,78      |

| Eficiência de adsorção de cor verdadeira (%) |  |           |           |            |            |
|--|--|-----------|-----------|------------|------------|
| Tempo (h)                                    | Concentração de BCP (g.L <sup>-1</sup> ) |           |           |            |            |
|  | B2<br>0,5                                | B3<br>1,0 | B4<br>5,0 | B5<br>10,0 | B6<br>20,0 |
| 1  | 8,82                                     | 17,38     | 75,13     | 100,00     | 100,00     |
| 2  | 9,89                                     | 19,79     | 82,62     | 100,00     | 100,00     |
| 3  | 13,37                                    | 21,12     | 90,91     | 100,00     | 100,00     |
| 7  | 16,58                                    | 24,33     | 91,44     | 100,00     | 100,00     |
| 12   | 5,08                                     | 6,42      | 81,28     | 94,65      | 97,06      |
| 24   | -6,95                                    | 4,28      | 79,68     | 97,86      | 98,40      |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

É possível notar que o comportamento da cor verdadeira está diretamente relacionado com a adsorção do corante, logo, há pouca diferença quando a eficiência de cada parâmetro é comparada.

Analisando os resultados obtidos no experimento B2, na estratégia E-1, observa-se a constante variação da eficiência, tendo um comportamento não esperado. Tal oscilação pode estar vinculada com a rápida saturação do biocarvão, indicando uma quantidade insuficiente desse adsorvente, ou ainda, com algum possível erro experimental.

Já na E-2, é notória a capacidade adsorvente do biocarvão até o tempo de operação de 7h, no qual após isso, há a saturação do material, diminuindo bruscamente a eficiência. Nesse caso, hipotetiza-se que o processo de recoloração pode ter sido responsável pelo aumento da cor na parte final do experimento sob concentração de 1 g.L<sup>-1</sup>.

Nos outros béqueres, percebe-se um comportamento semelhante em cada estratégia. Para a E-1, a saturação é mais lenta, no B4 ao B6 ela nem é detectada no tempo útil de operação. Entretanto, a eficiência de adsorção também é menor, sendo altamente efetivo (>90%) apenas no béquer contendo 20 g.L<sup>-1</sup> do biocarvão, em todas as coletas.

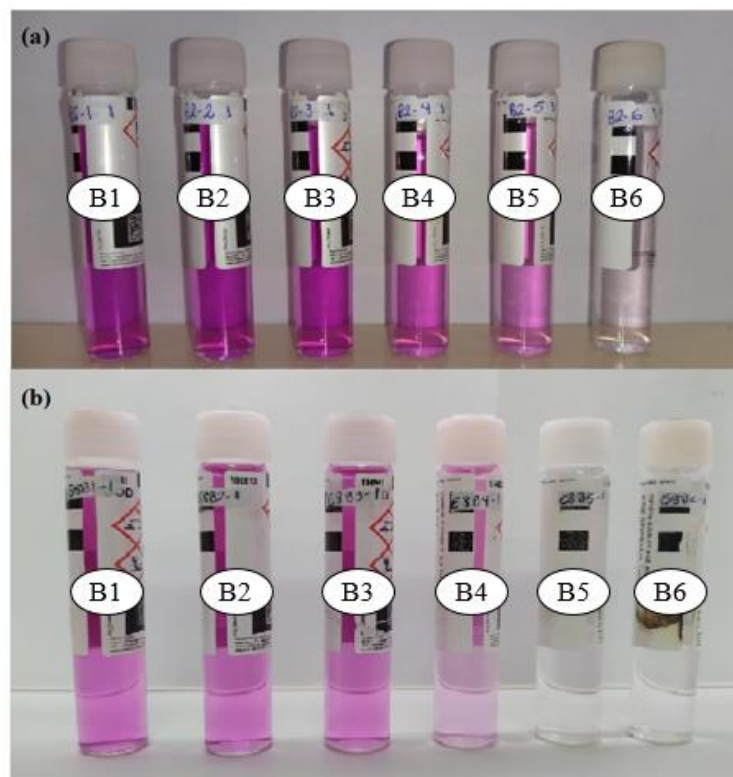
Para a E-2, nos experimentos B3 e B4, é perceptível a brusca diminuição da eficiência após 7h de experimento, indicando a saturação do material adsorvente, constatando que após o

limite máximo de adsorção, tem-se a presença de pontos de ruptura. Esses pontos acontecem quando a concentração inicial é maior que a concentração final do corante, determinando o momento que começa a aparecer cor na solução aquosa (MONTANHER; FARIAS; DALPASQUALE, 2019).

Ainda analisando a segunda estratégia, nos béqueres com a concentração de 10 e 20 g.L<sup>-1</sup>, verifica-se a adsorção total da cor verdadeira (e corante) presente no efluente têxtil nas primeiras horas de ensaio, sendo perceptível uma pequena variação apenas nos tempos de 12 e 24 horas, mas, ainda assim, com alta eficiência de adsorção, acima de 94%.

A partir da Figura 13, é possível confirmar a eficiência, de maneira visual, do uso do BCP (principalmente com 10 e 20 g.L<sup>-1</sup>), já na primeira hora de experimento. Nota-se que as amostras referentes aos béqueres B5 e B6 da estratégia E-2 é praticamente incolor, enquanto a amostra do béquer B6 da estratégia E-1 continua levemente rosado.

Figura 13 – Comparação das amostras filtradas após uma hora de operação na E-1 (a) e na E-2 (b)



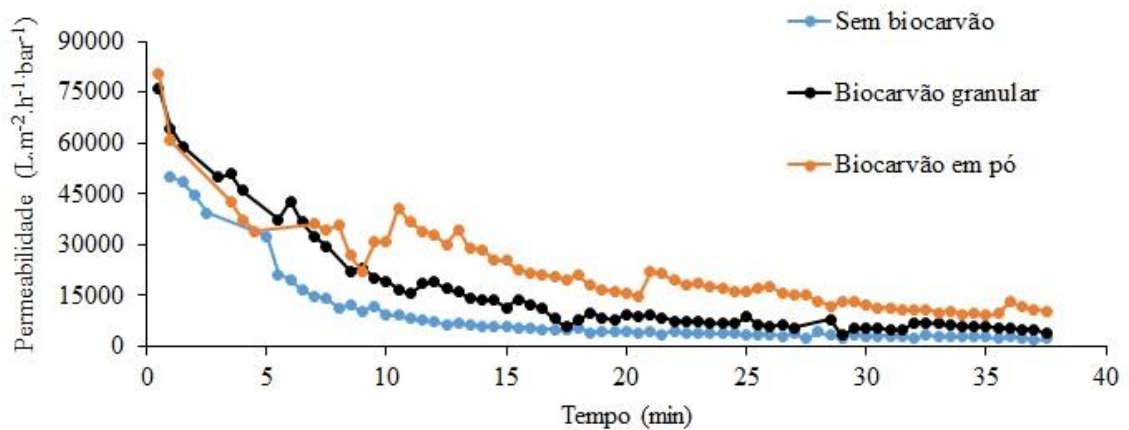
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Após avaliar os parâmetros de cor verdadeira e corante, certifica-se que a melhor concentração de aplicação do biocarvão é de  $10 \text{ g.L}^{-1}$ . Com isso, para a realização do ensaio de filtração foi utilizada essa concentração tanto para a aplicação do BCG quanto do BCP.

#### 4.2 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO

Na Figura 14 é apresentado o perfil da permeabilidade nas três condições testadas: 1) sem biocarvão; 2) com biocarvão granular; e 3) com biocarvão em pó.

Figura 14 – Perfil da permeabilidade hidráulica nas três condições testadas



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Verifica-se que todas as estratégias tendem a seguir uma distribuição exponencial, ou seja, a permeabilidade diminui até encontrar a sua estabilidade, no decorrer do tempo. De acordo com Cianci *et al.* (2005), essa queda inicial é esperada em processos de separação por membranas, sendo um perfil clássico em virtude da polarização da concentração. Além disso, ocorre o acúmulo da retenção de materiais na superfície da membrana, dificultando a passagem por seus poros.

Nota-se um comportamento singular na aplicação do BCP, principalmente nos primeiros 10 minutos de análise. Isso se dá pela necessidade de pausar o experimento para acrescentar mais efluente no sistema de filtração, visto que o sistema comporta apenas o volume de 250 mL. Há outros pontos representados pelo aumento da permeabilidade, como em 25 e 36 min, tempos esses que ocorreu a pausa no experimento.

Percebe-se que a partir do tempo de 29 minutos de ensaio, a permeabilidade se manteve estável, podendo ser analisada de uma forma melhor. Deste modo, a Tabela 7 apresenta os

valores médios de permeabilidade entre o tempo de 29 e 37,5 minutos, para facilitar a compreensão dos resultados.

Tabela 7 – Valores médios e desvio padrão da permeabilidade estabilizada

| Condições testadas | Permeabilidade (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> .bar <sup>-1</sup> ) |
|--------------------|---|
| Sem biocarvão      | 2.759,98 ± 461,63   |
| Biocarvão granular | 5.444,17 ± 940,1  |
| Biocarvão em pó    | 10.965,32 ± 1.238,49  |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

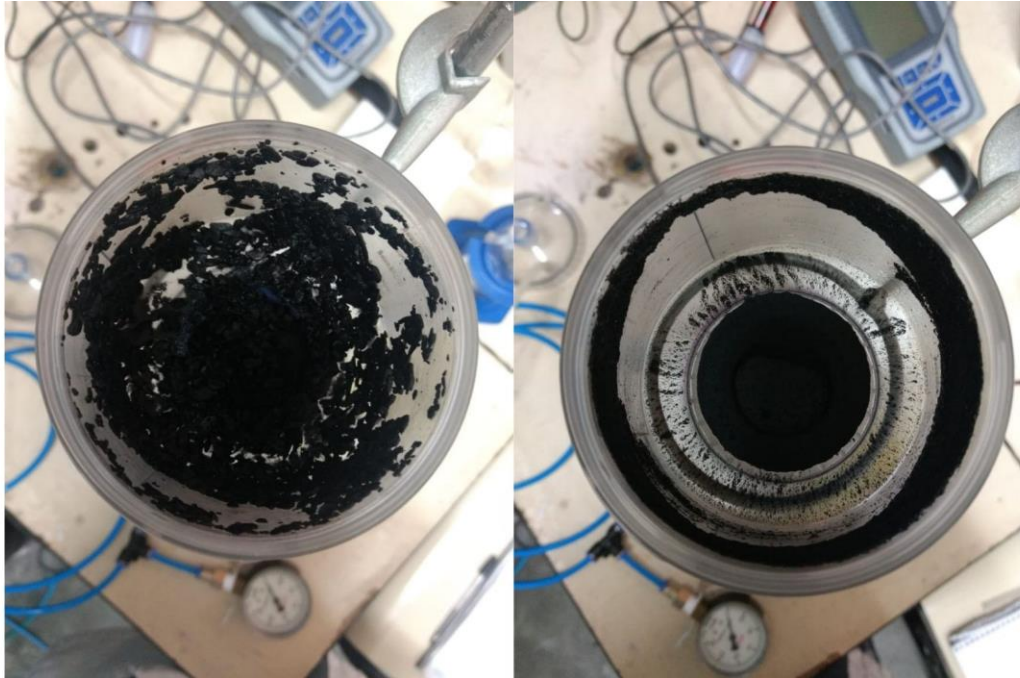
Observa-se que o uso do BCP resultou em um valor mais alto de permeabilidade, sendo cerca de 4 vezes maior em relação filtração sem biocarvão e 2 vezes maior comparado ao experimento com BCG. Isso ocorre pelo fato do BCP aderir a maior quantidade de poluentes em sua superfície, facilitando a filtração da solução aquosa (DEMBOGURSKI, 2019).

Alguns autores analisaram a permeabilidade do solvente contendo carvão ativado. Nunes Neto (2019) avaliou o efluente tratado no processo de pintura *e-coat*, obtendo a permeabilidade de 39,42 L.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>.bar<sup>-1</sup> com filtro de papel. Já Carmo (2019) analisou o PSM após a adsorção de fármacos, obtendo a permeabilidade de 102 L.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>.bar<sup>-1</sup>, com uma pressão aplicada de 5 bar.

Vale ressaltar, que nos momentos em que o efluente foi adicionado, não houve nova aplicação do biocarvão, mantendo a concentração do material desde o início do ensaio. A Figura 15 ilustra o sistema de filtração após a solução aquosa ser completamente filtrada, restando apenas o soluto.



Figura 15 – Sistema após a filtração completa do efluente têxtil, contendo o BCG e BCP, respectivamente



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

#### 4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A DISPOSIÇÃO FINAL DO BIOCARVÃO

Com a utilização do processo de adsorção para o tratamento de efluente têxtil, poluentes tóxicos são aderidos nas partículas do biocarvão, configurando a geração de resíduos perigosos. Para minimizar os danos ambientais, duas alternativas para a destinação do material adsorvente podem ser consideradas.

Após o biocarvão ser separado da fase aquosa através do PSM, o mesmo pode ser encaminhado para empresas especializadas no tratamento de resíduos químicos ou ao aterro industrial. Outra opção, é aplicar o processo de dessorção a partir de solventes, para a regeneração do biocarvão. Entretanto, Dembogurski (2019) relata que sua regeneração não é facilmente encontrada na literatura científica, dada a dificuldade de regenerar partículas pequenas. Além disso, Lima *et al.* (2017) mencionam que após a lavagem e tratamento térmico, a eficiência do material chega a 60%.

Logo, visto a perda da eficiência do material, entende-se que a dessorção pode não ser a melhor alternativa, pois há o custo de aplicação dos solventes utilizados durante o processo e a geração de efluentes líquidos. Ainda, como o biocarvão é encontrado em quantidade abundante e de baixo custo, opta-se por não reutilizar o material.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos dados obtidos através dos ensaios realizados no decorrer do trabalho, conclui-se que:

- a aplicação do biocarvão formado a partir da biomassa de resíduos florestais se mostrou uma ótima alternativa para adsorver o azo corante RBV-5R, comprovando que é possível realizar a adsorção de poluentes tóxicos através do uso de um subproduto industrial;
- concentrações de biocarvão abaixo de  $5 \text{ g.L}^{-1}$  saturaram rapidamente, permitindo o surgimento do processo de recoloração;
- a maior adsorção por grama de biocarvão ocorreu com a concentração de  $5 \text{ g.L}^{-1}$ , tanto para o biocarvão granular quanto para o em pó. Contudo, o tempo de operação não foi suficiente para a remoção completa do azo corante;
- comparando os resultados obtidos nas duas estratégias, a aplicação do BCP se mostrou mais efetiva, alcançando percentuais de adsorção mais altos em todos os experimentos analisados;
- as concentrações de 10 e  $20 \text{ g.L}^{-1}$  dos experimentos com biocarvão em pó atingiram 100% de eficiência de remoção do corante logo nas primeiras horas de ensaio. Com isso, constatou-se que a aplicação ideal da concentração do biocarvão em pó é de  $10 \text{ g.L}^{-1}$ ;
- a partir dos ensaios de filtração, concluiu-se que não houve dificuldade em separar o biocarvão da solução aquosa, no qual a maior permeabilidade encontrada foi no experimento com a utilização do biocarvão em pó.

## 6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após analisar os resultados obtidos na elaboração do trabalho, seguem algumas recomendações para o aprimoramento no alcance de dados, visando o melhor desempenho da pesquisa científica:

- realizar o controle do pH na adsorção, pois corantes aniônicos são adsorvidos com maior eficiência em pH ácido, sendo assim, a quantidade de massa de biocarvão aplicada é menor;
- monitorar outros parâmetros para acompanhar a adsorção dos poluentes, como DQO, fósforo e nitrogênio;
- realizar um estudo com efluentes de indústria têxtil, em escala piloto;
- aplicar o ensaio de adsorção como pós-tratamento;
- estudar a cinética de adsorção, uma vez que as concentrações variam ao longo do tempo;
- utilizar um sistema de filtração com volume útil maior, para que não ocorra a oscilação nos resultados;
- avaliar diferentes pressões no PSM, para avaliar o comportamento da permeabilidade.

## REFERÊNCIAS

- ABIT. **O setor têxtil e de confecção brasileira e os desafios da sustentabilidade**. Brasília: ABIT, 2017. 108 p.
- ALMAGUER, Mairely Alfonso. **Degradação de corantes azo por processo enzimático (peroxidase de brassica rapa) e biofiltro anaeróbio-aeróbio**. 2018. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.
- ANDRADE, Robson Carlos de. **Preparação e Caracterização de Carvão Ativado a partir de Material Alternativo Lignocelulósico**. 2014. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2014.
- APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**, 22<sup>a</sup>. ed., Washington: American Public Health Association, 2012.
- BAÊTA, Bruno Eduardo Lobo. **Tratamento de efluentes de indústria têxtil utilizando Reatores Anaeróbios de Membranas Submersas (SAMBR) com e sem Carvão Ativado em Pó (CAP)**. 2012. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Tecnologia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.
- BELLI, Tiago José. **Biorreator à membrana em batelada sequencial para a remoção de nutrientes de esgoto sanitário: desempenho do tratamento, colmatção das membranas e estratégias de otimização**. 2015. 275 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- BOCASANTA, Renan. **Potencialidades de um sistema wetland vertical francês utilizando biocarvão como material filtrante**. 2019. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2019.
- BRIDGWATER, Anthony V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass And Bioenergy**, [s.l.], v. 38, p. 68-94, mar. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>.
- CÂMARA, Josemar Guerra de Andrade. **Avaliação cinética e de equilíbrio de um processo de remoção por adsorção de benzeno e tolueno de águas residuárias de refinarias de petróleo**. 2010. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.
- CARDOSO, Joana Filipa. **Adsorção de Detergentes em Efluentes Aquosos usando Aerogéis de Sílica**. 2017. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2017.
- CARMO, Juliana do. **Membranas compósitas de poliácrlonitrila e carvão ativado em pó superfino: preparação, caracterização e avaliação da eficiência de rejeição do diclofenaco**. 2019. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

CIANCI, Fernando C. *et al.* Clarificação e concentração de suco de caju por processos com membranas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, [s.l.], v. 25, n. 3, p. 579-583, set. 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0101-20612005000300030>.

ÇINAR, Özer *et al.* Effect of cycle time on biodegradation of azo dye in sequencing batch reactor. **Process Safety And Environmental Protection**, [s.l.], v. 86, n. 6, p. 455-460, nov. 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2008.03.001>.

CLAUDINO, Andréia. **Preparação de carvão ativado a partir de turfa e sua utilização na remoção de poluentes**. 2003. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

CLEMENTINO, Maria do Livramento Miranda. A evolução da indústria têxtil no contexto da afirmação do imperialismo americano. *In*: COLOQUIO INTERNACIONAL DE GEOCRÍTICA, 7., 2012, Bogotá. **Anais...** Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2012. p. 1-13.

CONAMA. **Resolução nº 357, 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. Brasília: DOU, 2005.

CONAMA. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Brasília: DOU, 2011.

COSTA, Larissa Fernandes. **Síntese de adsorventes magnéticos utilizando casca de soja e sua aplicação na adsorção de ácido cafeico**. 2018. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

CPRH. **Roteiro complementar de licenciamento e fiscalização para tipologia têxtil**. Recife: CPRH/GTZ, 2001. 125 p.

DALLAGO, Rogério Marcos; SMANIOTTO, Alessandra; OLIVEIRA, Luiz Carlos Alves de. Resíduos sólidos de curtumes como adsorventes para a remoção de corantes em meio aquoso. **Química Nova**, [s.l.], v. 28, n. 3, p. 433-437, jun. 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422005000300013>.

DEL BUBBA, Massimo *et al.* Physicochemical properties and sorption capacities of sawdust-based biochars and commercial activated carbons towards ethoxylated alkylphenols and their phenolic metabolites in effluent wastewater from a textile district. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 708, p. 135217-135231, mar. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135217>.

DELGADO, Nasly *et al.* Pharmaceutical emerging pollutants removal from water using powdered activated carbon: study of kinetics and adsorption equilibrium. **Journal Of Environmental Management**, [s.l.], v. 236, p. 301-308, abr. 2019. <Http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.116>.

DEMOGURSKI, Laura da Silva. **Remoção dos poluentes emergentes paracetamol e diclofenaco sódico por adsorção em carvão ativado em pó**. 2019. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

DEUS, Fábio Ponciano de *et al.* Hydraulic characterisation of the backwash process in sand filters used in micro irrigation. **Biosystems Engineering**, [s.l.], v. 192, p. 188-198, abr. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.01.019>.

DI BERNARDO, Luiz; DANTAS, Ângela Di Bernardo. **Métodos e técnicas de tratamento de águas**. 1.ed. Rio de Janeiro: ABES, 1993. 2 v.

HADDAD, Mohammadine el *et al.* Calcined mussel shells as a new and eco-friendly biosorbent to remove textile dyes from aqueous solutions. **Journal Of The Taiwan Institute Of Chemical Engineers**, [s.l.], v. 45, n. 2, p. 533-540, mar. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtice.2013.05.002>.

ENGIE BRASIL. **Unidade de Cogeração Lages**. 2021. Disponível em: <https://www.engie.com.br/complexo-gerador/usinas/unidade-de-cogerao-lages/>. Acesso em: 12 mar. 2020.

ERKAN, Hanife Sari *et al.* Performance evaluation of conventional membrane bioreactor and moving bed membrane bioreactor for synthetic textile wastewater treatment. **Journal Of Water Process Engineering**, [s.l.], v. 38, p. 101631-101638, dez. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101631>.

FAN, Shisuo *et al.* Removal of methylene blue from aqueous solution by sewage sludge-derived biochar: adsorption kinetics, equilibrium, thermodynamics and mechanism. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [s.l.], v. 5, n. 1, p. 601-611, fev. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.019>.

FAZAL, Tahir *et al.* Integrating adsorption and photocatalysis: a cost effective strategy for textile wastewater treatment using hybrid biochar-tio2 composite. **Journal Of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 390, p. 121623-121637, mai. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121623>.

FERNANDES, Fábio Henrique. **Potencial toxicogenômico e carcinogênico de efluentes da indústria têxtil e dos corantes Disperse Red 1 e Disperse Blue 291 em roedores**. 2016. 95 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Biológicas, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2016.

FIESC. **Têxtil e Confecção**. 2018. Disponível em: <https://www.observatoriofiesc.com.br/textil-confeccao>. Acesso em: 15 dez. 2020.

FREITAS, Kátya Regina de. **Caracterização e reuso de efluentes do processo de beneficiamento da indústria têxtil**. 2002. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

FUJITA, Renata Mayumi Lopes; JORENTE, Maria José. A Indústria Têxtil no Brasil: uma perspectiva histórica e cultural. **Moda Palavra**, Santa Catarina, v. 8, n. 1, p.153-174, jan. 2015.

GILPAVAS, Edison; DOBROSZ-GÓMEZ, Izabela; GÓMEZ-GARCÍA, Miguel-Ángel. Optimization and toxicity assessment of a combined electrocoagulation, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>2+</sup>/UV and activated carbon adsorption for textile wastewater treatment. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 651, p. 551-560, fev. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.125>.

GOKULAN, Ravi *et al.* Experimental and chemometric analysis of bioremediation of remazol dyes using biochar derived from green seaweeds. **Desalination and Water Treatment**, [s.l.], v. 184, p. 340-353, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2020.25339>.

GUIMARÃES, Veridiana Garcia. **Adsorção-dessorção de partículas neutras em sistemas com superfícies não-idênticas**. 2015. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2015.

HABERT, Alberto Cláudio; BORGES, Cristiano Piacsek; NÓBREGA, Ronaldo. **Processos de separação por membranas**. Rio de Janeiro: E-papers, 2006. 180p.

HASSEMER, Maria Eliza Nagel. **Oxidação fotoquímica - UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> - para degradação de poluentes em efluentes da indústria têxtil**. 2006. 175 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

HENNE, Reny Aldo. **Caracterização da formação e da composição das cinzas e dos problemas associados à combustão da biomassa florestal em caldeira**. 2018. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2018.

JONSTRUP, Maria *et al.* Sequential anaerobic–aerobic treatment of azo dyes: decolourisation and amine degradability. **Desalination**, [s.l.], v. 280, n. 1-3, p. 339-346, out. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2011.07.022>.

JUSTINO, Naiara Mottim. **Processo foto-fenton solar mediado por ferrioxalato (FeOx/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV) aplicado ao tratamento de efluente têxtil**. 2016. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

KAUSAR, Abida *et al.* Dyes adsorption using clay and modified clay: a review. **Journal Of Molecular Liquids**, [s.l.], v. 256, p. 395-407, abr. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2018.02.034>.

KIANI, Rahil *et al.* Real textile wastewater treatment by a sulfate radicals-Advanced Oxidation Process: peroxydisulfate decomposition using copper oxide (CuO) supported onto activated carbon. **Journal Of Water Process Engineering**, [s.l.], v. 38, p. 101623-101630, dez. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101623>.

KORENAK, Jasmina *et al.* Decolourisations and biodegradations of model azo dye solutions using a sequence batch reactor, followed by ultrafiltration. **International Journal Of Environmental Science And Technology**, [s.l.], v. 15, n. 3, p. 483-492, 18 jul. 2017. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s13762-017-1406-z>.

KUMAR, Abhay *et al.* Production and Utilization of Biochar From Organic Wastes for Pollutant Control on Contaminated Sites. In: PRASAD, Majeti Narasimha Vara; SHIH, Kaimin (ed.). **Environmental Materials And Waste: Resource Recovery and Pollution Prevention**. [s.l.]: Academic Press, 2016. p. 91-116. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-803837-6.00005-6>. Acesso em: 14 dez. 2020.

LI, Xiang *et al.* Application of membrane separation processes in phosphorus recovery: a review. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 767, p. 144346-144362, maio 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144346>.

LIMA, Liliane Schier de *et al.* Recuperação e reaproveitamento da mistura de carvão ativado e terras diatomáceas usada em processos de purificação de xaropes. **Revista Virtual de Química**, [s.l.], v. 9, p. 1853-1867, 2017.

LOVATEL, André Alberto. **Geração de EPS no tratamento de água residuária de refinaria de petróleo em MBR e sua influência em micro e ultrafiltração**. 2011. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2011.

LUNARDI, Layane Martins. **Remoção de corantes têxteis por adsorção com pó de serragem de pinus sp.** 2014. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2014.

MARÍN, Sandra Liliana Albornoz. **Remoção dos corantes têxteis C.I Reactive Blue 203 e C.I Reactive Red 195 mediante o uso de bagaço de maçã como adsorvente**. 2015. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2015.

MARRAKCHI, Fatma *et al.* Mesoporous-activated carbon prepared from chitosan flakes via single-step sodium hydroxide activation for the adsorption of methylene blue. **International Journal Of Biological Macromolecules**, [s.l.], v. 98, p. 233-239, maio 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.119>.

MELO, Wiliam de. **Estudo do uso de membranas cerâmicas no tratamento de emulsões petróleo/água tratamento**. 2020. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

MÓDENES, Aparecido Nivaldo *et al.* Performance evaluation of a photo-Fenton process applied to pollutant removal from textile effluents in a batch system. **Journal Of Environmental Management**, [s.l.], v. 104, p. 1-8, ago. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.03.032>.



MONTANHER, Silvana Fernandes; FARIAS, Larissa Bello Neves de; DALPASQUALE, Mariane. Adsorção de corantes têxteis em serragem de MDF (Medium-Density Fiberboard). **Brazilian Journal Of Development**, [s.l.], v. 5, n. 9, p. 14776-14789, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv5n9-078>.

NARIMATSU, Bárbara Mayume Galeti *et al.* Corantes naturais como alternativa sustentável na indústria têxtil. **Revista Valore**, Volta Redonda, v. 5, p. 5030-5044, 2020.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do *et al.* **ADSORÇÃO**: aspectos teóricos e aplicações ambientais. 2 ed. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2020. 309 p.

NÓBREGA, Geraldine Angélica Silva da. **Determinação do teor de umidade do gás natural usando um dispositivo com adsorção**. 2001. 85 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2001.

NUNES NETO, Pâmela. **Estudo do reuso de efluente tratado no processo de pintura e-coat com o uso de carvão ativado e membrana de osmose inversa**. 2019. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2019.

PEREIRA, Luciana; ALVES, Madalena. Dyes — Environmental Impact and Remediation. **Environmental Protection Strategies For Sustainable Development**, [s.l.], p. 111-162, 17 set. 2011. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-1591-2\\_4](http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-1591-2_4).

PESSÔA, Thiago Sabino. **Caracterização e aplicação de biocarvão obtido a partir do endocarpo do açaí para adsorção de corantes têxteis**. 2019. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

PRONER, Mariane Carolina. **Caracterização de membranas de ultrafiltração modificadas pelo método *mussel-inspired***. 2018. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Alimentos, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

QUEIROZ, Marluce Teixeira Andrade *et al.* Gestão de resíduos na indústria têxtil e sua relação com a qualidade da água: Estudo de caso. **Iberoamerican Journal Of Industrial Engineering**, Florianópolis, v. 8, n. 15, p. 114-135, 2016.

RÁPÓ, Eszter *et al.* Adsorptive Removal of Remazol Brilliant Violet-5R Dye from Aqueous Solutions using Calcined Eggshell as Biosorbent. **Acta Chimica Slovenica**, [s.l.], v. 66, n. 3, p. 648-658, 18 set. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.17344/acsi.2019.5079>.

REGO, Elisabete Bárbara Maia. **Fotodegradação de soluções de laranja II e efluentes da indústria têxtil por camadas de TiO<sub>2</sub> e ZnO, serigrafadas em peças cerâmicas**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008.

RIBEIRO, Geysa Adriana Corrêa. **Remoção dos corantes têxteis violeta brilhante remazol e turquesa remazol por adsorção em casca de arroz**. 2012. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2012.

RUTZ, Elizabeth Gonçalves. **Estudo da adsorção de corantes da indústria têxtil usando carvão ativado e o pó retido no filtro eletrostático da fabricação da alumina como adsorventes**. 2007. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

SALLEH, Mohamad Amran Mohd *et al.* Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: a comprehensive review. **Desalination**, [s.l.], v. 280, n. 1-3, p. 1-13, out. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2011.07.019>.

SANTOS, Leidiane Santana. **Avaliação do desempenho de um biorreator com membranas aeróbio com adição de carvão ativado em pó no tratamento de vinhoto**. 2013. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SILVA, Rhayssa de Brito. **Comportamento cinético da degradação de corantes azo e aminas aromáticas sob diferentes condições redox**. 2018. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

TKACZYK, Angelika; MITROWSKA, Kamila; POSYNIAK, Andrzej. Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: a review. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 717, p. 137222-137241, maio 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137222>.

TUNUSSI, José Leandro; ALEM SOBRINHO, Pedro. Remoção de cor e nitrificação de efluentes de tinturaria têxtil através de processos biológicos anaeróbio-aeróbio. *In*: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 28., 2002, Cancún. **Anais [...]**. Cancún: Agua Latinoamerica, 2003. p. 1-7.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos – Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**, v.1. 4.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade de Minas Gerais, 2011. p. 317.

XAVIER, Cinthia Sany França *et al.* Secagem e avaliação do bagaço de cana de açúcar como adsorvente de corantes têxteis presentes em soluções aquosas. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 1, p. 1-13, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-707620210001.1237>.

YEOW, Peck Kah; WONG, Sie Wei; HADIBARATA, Tony. Removal of Azo and Anthraquinone Dye by Plant Biomass as Adsorbent – A Review. **Biointerface Research In Applied Chemistry**, [s.l.], v. 11, n. 1, p. 8218-8232, 22 jul. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.33263/briac111.82188232>.

YUKSELER, Hande *et al.* Analysis of the best available techniques for wastewaters from a denim manufacturing textile mill. **Journal Of Environmental Management**, [s.l.], v. 203, p. 1118-1125, dez. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.041>.

YURTSEVER, Adem; CALIMLIOGLU, Beste; SAHINKAYA, Erkan. Impact of SRT on the efficiency and microbial community of sequential anaerobic and aerobic membrane bioreactors for the treatment of textile industry wastewater. **Chemical Engineering Journal**, [s.l.], v. 314, p. 378-387, abr. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2016.11.156>.

ZHANG, Jianhua *et al.* Evaluation of direct contact membrane distillation coupled with fractionation and ozonation for the treatment of textile effluent. **Journal Of Water Process Engineering**, [s.l.], p. 101789-101799, nov. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101789>.