

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**RAFAELA JULIA DE LIRA GOUVEIA RAMOS**

**REUTILIZAÇÃO DE CORANTES TÊXTIS PROVENIENTE DO LODO**  
**DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DAS**  
**LAVANDERIAS NO AGRESTE DE PERNAMBUCO**

**RECIFE- PERNAMBUCO**

**2024**

**RAFAELA JULIA DE LIRA GOUVEIA RAMOS**

**REUTILIZAÇÃO DE CORANTES TÊXTEIS PROVENIENTES DO  
LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DAS  
LAVANDERIAS NO AGRESTE DE PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Alex Souza Moraes

Coorientador(a): Thais Jeruzza M. Povoas Souto

**RECIFE- PERNAMBUCO**

**2024**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Bibliotecário(a): Suely Manzi – CRB-4 809

R175r Ramos, Rafaela Julia de Lira Gouveia.  
Reutilização de corantes têxteis provenientes do lodo de estações de tratamento de efluentes das lavanderias no Agreste de Pernambuco. / Rafaela Julia de Lira Gouveia Ramos. - Recife, 2024.  
58 f.; il.

Orientador(a): Alex Souza Moraes.

Co-orientador(a): Thais Jeruzza Maciel Povoas Souto.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Recife, BR-PE, 2024.

Inclui referências.

1. Corantes. 2. Águas residuais. 3. Água - Reuso - Pernambuco. 4. Impacto ambiental 5. Energia solar. I. Moraes, Alex Souza, orient. II. Souto, Thais Jeruzza Maciel Povoas, coorient. III. Título

CDD 620.8

**RAFAELA JULIA DE LIRA GOUVEIA RAMOS**

**REUTILIZAÇÃO DE CORANTES TÊXTIS PROVENIENTES DO LODO DE  
ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DAS LAVANDERIAS NO  
AGRESTE DE PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, para obtenção do título de *Mestre em Engenharia Ambiental*.

APROVADA: 24 de Julho de 2024.

---

Prof. Dr. Alex Souza Moraes- UFRPE

Presidente da Banca e Orientador/Coorientador

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Alberto Antônio da Silva

Membro Externo – IFPE

---

Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda

Membro Interno - UFRPE

## **AGRADECIMENTO**

A Deus pertence meu primeiro agradecimento, pois me deu boa saúde e criatividade para conduzir a dissertação de forma sábia, toda Honra e Glória a Ele. Aos meus pais Hélio e Adriana por todo apoio emocional e carinho que recebo. Ao meu marido Guilherme por me apoiar com amor em minha escolha da dedicação aos estudos e a pesquisa acadêmica.

Ao professor orientador Alex, o meu agradecimento mais sincero, pois além de excelente orientador encontrei um amigo que apoia e direciona da melhor forma. Agradeço de coração ao Arthur do departamento de química que auxiliou e apoiou minha pesquisa, juntamente com Larissa, Beatriz, a coorientadora Thaís, aos professores do programa, a coordenação da pós-graduação e aos amigos que fiz durante o mestrado que deixaram os dias mais leves e felizes durante a pesquisa.

Agradeço ao Laboratório de Medicamentos, Tecnologias, Energia e Soluções Ambientais (LaMTESA) da UFRPE onde foram feitas grande parte da pesquisa e aos colegas de laboratório que me acolheram com alegria. Ao órgão de fomento Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela bolsa de mestrado que possibilitou o bom funcionamento da pesquisa científica do início ao fim e a Universidade Federal Rural de Pernambuco, mais conhecida como “Ruralinda”.

*Na Natureza, nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.  
(Antoine Lavoisier)*

GOUVEIA-RAMOS, Rafaela J. L., M.Sc, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Julho de 2024. Reutilização de corantes têxteis provenientes do lodo de estações de tratamento de efluentes das lavanderias no agreste de Pernambuco. Orientador: Alex Souza Moraes. Coorientadora: Thais Jeruzza M. Povoas Souto

## RESUMO

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais dos setores têxtil, o estado de Pernambuco é considerado um dos maiores polos industriais têxteis com grande importância para economia do país. Em consequência disso, a cadeia produtiva gera impactos consideráveis ao meio ambiente, e esse acúmulo de resíduos é de grande problema para saúde ambiental da população e para agências governamentais e particulares que gerenciam o lixo urbano. Ficando clara a necessidade e importância de que existam medidas de conservação do meio ambiente e elaboração de estratégias que potencializem uma trajetória de crescimento sustentável, diferenciada, com responsabilidade social e ambiental. Com o objetivo de mitigar os impactos ambientais da produção de corantes e pigmentos a partir de processos químicos existentes na indústria têxtil, esta pesquisa buscou investigar o potencial de remoção de uma membrana de Celulose Bacteriana (CB) utilizando glicerol como fonte de carbono e a posterior proposta de um forno no tratamento de efluentes têxtil por adsorção utilizando uma fonte de energia solar para auxiliar na recuperação de corantes nas indústrias têxteis. A CB foi produzida em condições controladas e, em seguida, as propriedades físico-químicas, estruturais e morfológicas do bioadsorvente foram caracterizadas utilizando a espectroscopia de infravermelhos com transformada de Fourier (FTIR) e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Dez diferentes corantes foram coletados de lavanderias têxteis de Pernambuco para a realização dos estudos de adsorção. A composição química dos corantes foi avaliada por Espectroscopia de Absorção Eletrônica (UV-Vis), Espectroscopia de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) e Termogravimetria (TGA). Os dados obtidos foram também analisados estatisticamente utilizando a Análise de Componentes Principais (PCA). Os testes de tratamento foram efetuados num sistema de adsorção de 24 horas, utilizando 100 mg de BC e 20,0 mg L<sup>-1</sup> de corantes. Portanto, a pesquisa teve como objetivo realizar o tratamento de efluentes têxteis, a partir da CB absorvendo os corantes que ficariam estocados no lodo têxtil. A resposta mais satisfatória foi para os corantes ftalocianina, com taxas de remoção de até 43% sob as condições otimizadas.

**Palavras-chave:** reúso, efluente de lavanderia, impacto ambiental, energia solar

GOUVEIA-RAMOS, Rafaela J. L., M.Sc, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Julho de 2024. Reutilização de corantes têxteis provenientes do lodo de estações de tratamento de efluentes das lavanderias no agreste de Pernambuco. Orientador: Alex Souza Moraes. Coorientadora: Thais Jeruzza M. Povoas Souto

## **ABSTRACT**

Brazil is one of the world's largest producers of textiles, and the state of Pernambuco is considered one of the largest textile industrial centers with great importance for the country's economy. As a result, the production chain generates considerable impacts on the environment, and this accumulation of waste is a major problem for the environmental health of the population and for government and private agencies that manage urban waste. This makes clear the need and importance of environmental conservation measures and the development of strategies to promote sustainable, differentiated growth, with social and environmental responsibility. In order to mitigate the environmental impacts of the production of dyes and pigments from chemical processes in the textile industry, this research sought to investigate the removal potential of a Bacterial Cellulose (BC) membrane using glycerol as a carbon source and the subsequent proposal of a furnace in the treatment of textile effluents by adsorption using a solar energy source to aid in the recovery of dyes in textile industries. BC was produced under controlled conditions and then the physicochemical, structural and morphological properties of the bioadsorbent were characterized using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Scanning Electron Microscopy (SEM). Ten different dyes were collected from textile laundries in Pernambuco for adsorption studies. The chemical composition of the dyes was evaluated by Electronic Absorption Spectroscopy (UV-Vis), Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES) and Thermogravimetry (TGA). The data obtained was also statistically analyzed using Principal Component Analysis (PCA). The treatment tests were carried out in a 24-hour adsorption system, using 100 mg of BC and 20.0 mg L<sup>-1</sup> of dyes. The aim of the research was therefore to treat textile effluents using BC by absorbing the dyes that would be stored in the textile sludge. The most satisfactory response was for phthalocyanine dyes, with removal rates of up to 43% under the optimized conditions.

**Keywords:** reuse, laundry effluent, environmental impact, solar energy

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1-** (a) Soluções estoque dos corantes têxteis

(b) Procedimento para solução estoque

**Figura 2-** Obtenção da CB

**Figura 3-** (a) Aspectos visual dos testes de adsorção do C1, C7, C8 e C10 na CB.

(b) Aspecto visual da CB após 24h

**Figura 4-** Esquematisação para obtenção do corante ecológico

**Figura 5-** (a) Espectro FTIR da CB.

(b) MEV da CB.

**Figura 6-** (a) Espectros de absorção dos corantes C1-C10.

(b) Monitoramento da absorção dos corantes C1-C10 em função do pH

**Figura 7-** (a) PCA baseado no teor de metal na amostra de corante.

(b) Agrupamento com base no tipo de corante avaliado.

(c) PCA baseado na região de absorção das amostras de corantes.

(d) Agrupamento com base na faixa de absorção de cada corante

**Figura 8-** (a) Remoção de C1,

(b) C7,

(c) C8

(d) C10 por CB em um processo de adsorção de 24 h

**Figura 9-** (a) Termograma de CB.

(b) Termograma de C10

**Figura 10-** Esquema proposto para recuperação de corantes têxteis utilizando CB e forno acoplado à energia solar

**Figura 11-** Planta ilustrativa de uma indústria têxtil, no processo de reutilização do corante

## **LISTA DE TABELAS**

**Tabela 1-** Identificação e classificação dos corantes têxteis analisados

**Tabela 2-** Resultados de ICP-EOS para o teor de metais nas amostras de corantes C1-C10

**Tabela 3-** Resultados de absorção eletrônica para os corantes têxteis com variação de pH

**Tabela 4-** Cinética de adsorção de corantes na membrana de CB

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APL	Arranjo Produtivo Local
CB	Celulosa Bacteriana
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
ET	Eventos Térmicos
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
HS	Hestrin e Schramm
ICP	Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Acoplado
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
pH	Potencial Hidrogeniônico
rpm	Rotação por minuto
TGA	Análise Termogravimétrica
UV-Vis	Espectrofotômetro Ultravioleta-Visível

## SUMÁRIO

1-INTRODUÇÃO_	14-15
2-OBJETIVOS	15
2.1-Objetivos geral	15
2.2-Objetivos específicos	15-16
3-REVISÃO DA LITERATURA	16
3.1- Indústria têxtil	16-17
3.2- Arranjo produtivo local de Pernambuco	17
3.3- Geração de resíduos têxtil	17-18
3.4- Corantes têxteis	18-19
3.5- Processos de tratamento	19
3.5.1- Coagulação e floculação	19
3.5.2- Adsorção por celulose bacteriana	20-21
3.6 Produção mais limpa (P+L)	21
3.7 Legislação ambiental	21-22
3.8- Espectrometria (ICP)	22-23
3.9- Espectroscopia (FTIR)	23-24
3.10- Análise de Termogravimetria (TGA)	24-25
3.11 Uv-VIS	25
4-METODOLOGIA	25
4.1- Corantes analisados	25-26
4.2- Reagentes	26-27
4.3- Coleta de amostras e soluções de trabalho	26-27
4.4- Metodologia de digestão das amostras	27
4.5- Produção de celulose bacteriana (CB)	27-28
4.6- Instrumentação	28
4.7- Análise multivariada	28
4.8- Estudos de estabilidade de pH e cinética de adsorção	29-30
4.9- Obtenção do corante ecológico através de CB	30-31
5-RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1 Caracterização da CB	31-33

5.2 Caracterização dos corantes _____	33-34
5.2.1 Análise da absorvância Uv-Vis e estabilidade do pH _____	34-36
5.3 Análise de Componentes Principais (PCA) _____	36-38
5.4 Cinética de adsorção _____	38-40
5.5 Caracterização térmica da CB e corantes _____	41-42
5.6 Proposta para processo térmico de recuperação de corantes têxteis utilizando a CB _____	42-44
5.7 Perspectiva para forno acoplado a energia solar _____	44-45
6- CONCLUSÕES _____	46
REFERÊNCIAS _____	47-58

## 1-INTRODUÇÃO

O estado de Pernambuco é considerado um dos maiores polos industriais têxteis do país, e como consequência natural deste desenvolvimento, os processos industriais das lavanderias possuem grande potencial poluidor devido à qualidade do seu resíduo sólido. Dentre as cidades que integram esse Arranjo Produtivo Local destacam-se Caruaru, Toritama e Santa Cruz do Capibaribe, que despontam como grande repositório de demandas socioambientais ocasionadas pela exploração de recursos naturais desde a sua criação. Muitos estudos reportam a presença de substâncias perigosas, incluindo metais pesados, presentes no lodo têxtil gerado, e que, muitas das políticas públicas adotadas na redução desse potencial poluidor se mostram incapazes de medidas definitivas para conter o avanço do impacto ambiental (Souto, 2017).

Muitos dos insumos utilizados nas lavanderias são adquiridos de forma aleatória através de importação ou compra local, ocasionando falta de padronização e coleta de informações adequadas sobre o tipo de produto, dificultando o correto dimensionamento e elevados custos das estações de tratamento de efluentes (Silva, 2016). Essa dificuldade de controle da matéria prima utilizada nas lavanderias resulta no lodo com grande diversidade em sua composição, pois além de rico em fibras de tecidos, também possui resíduos de corantes, diversos compostos orgânicos e inorgânicos, enzimas, agentes oxidantes e abrasivos, oriundos dos diversos processos presentes nas lavanderias (Lira, 2019). Uma questão importante a ser considerada está na origem dos corantes e também nesses insumos utilizados no processo das lavanderias, uma vez que essa matéria-prima é adquirida de forma aleatória, ora através de importação direta, ora por compra no comércio local.

Essa prática resulta na falta de padronização e controle do tipo de produto que é adquirido e utilizado na produção nas lavandeiras e posteriormente descartado nos corpos hídricos. Há uma dificuldade na remoção de cor de soluções de corantes metalizados frequentemente encontrados em águas residuárias. Por exemplo, o cobre pode ser liberado durante o processo, e esse metal é controlado por regulamentações ambientais. Estudos têm sido geralmente relacionados à descoloração de corantes azo, que atualmente são de ampla utilização na indústria têxtil, com a exclusão de outras classes de corantes têxteis comercialmente importantes, como as metaloftalocianinas. (Oliveira, 2006)

Diante dessa premissa, é de se esperar que a composição química dos corantes, dos efluentes líquidos e do lodo gerado no polo têxtil, podem colaborar para a baixa eficiência dos

processos nas estações de tratamento, e conseqüentemente aumentar a carga poluidora que é lançada nos corpos aquáticos. Do ponto de vista ambiental, trata-se de um grave problema, uma vez que o despejo desordenado de efluentes em ambientes aquáticos como rios, córregos e lagos, sem tratamento prévio, diminui a transparência da água e a penetração da radiação solar. (Oliveira et al., 2006). Alguns estudos em fase de publicação apontam que, uma vez o lodo sendo processado em etapas simples de bancada de laboratório, é possível recuperar grande parte dos corantes já utilizados.

A presente pesquisa teve como objetivo a investigação do potencial de remoção de corantes através do tratamento das águas residuais por adsorção com membrana bacteriana, como projeto piloto para a recuperação parcial dos corantes estocados tanto nos lodos, como nos efluentes das estações de tratamento das lavadeiras têxteis, com a perspectiva de serem reintroduzidos em sua cadeia produtiva. Essa perspectiva aponta para uma proposta de redução de descarte de poluentes em corpos hídricos e aterros, além da redução do custo de aquisição de matéria prima, promovendo em um futuro breve o desenvolvimento de possíveis patentes de novos produtos oriundos dos corantes recuperados ou produtos ecologicamente corretos.

## **2-OBJETIVOS**

### **2.1-OBJETIVO GERAL**

Realizar o tratamento de efluentes têxteis a partir de filtros de membrana de origem bacteriana, a fim de minimizar o estoque de corantes em lodos têxteis contaminados, recuperação parcial desses corantes e perspectiva de confecção de novos produtos ecológicos.

### **2.2-OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Promover aos órgãos ambientais municipal e estadual e às empresas interessadas, a possibilidade de inserção de novos produtos que tenham caráter sustentável e ecologicamente corretos.
2. Elaboração de propostas de melhoramento da produção e promoção da Ecoeficiência através da seleção exclusivas de fluxos de concentrados de corantes utilizados.

3. Desenvolver o monitoramento da qualidade do efluente têxtil através da coleta e análises químicas em lavadeiras de Caruaru.
4. Desenvolver competências para os alunos e demais profissionais envolvidos na pesquisa a rotina de interpretação de dados ambientais através de programas de quimiometria (estatística multivariada), geração de mapas digitais e de confecção de gráficos interativos.
5. Aproximar o setor privado e demais integrantes da sociedade das reais demandas e problemas enfrentados pelo nosso Estado e como a academia e os órgãos de fomento estão atuando na melhoria da qualidade de vida da população, realizando divulgação de resultados em eventos científicos aberto ao público em geral.

### **3-REVISÃO DA LITERATURA**

#### **3.1- Indústria Têxtil**

O setor têxtil e de confecção está entre os quatro maiores produtores de malhas e o quinto maior produtor de *jeans* do mundo, representando um faturamento de R\$ 193,2 bilhões em 2022 contra R\$ 190 bilhões em 2021 e crescimento em relação aos R\$ 161 bilhões de 2020, durante a pandemia *COVID-2019*. O setor se mantém forte com uma produção de aproximadamente 2,1 milhões de toneladas em 2022 contra 2,16 milhões de toneladas em 2021, apresentando crescimento em relação aos números de 2020 com a produção de 1,91 milhões de toneladas (ABIT, 2024). No entanto, apesar dos dados favoráveis em relação ao faturamento no Brasil, o meio ambiente recebe uma alta quantidade de descarte da indústria têxtil. A estimativa de 2022 informou que são despejados um total de 4,58 milhões de toneladas de resíduos têxteis, couro e borracha por ano, segundo a Associação das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022). O setor industrial têxtil destaca-se pela alta demanda de água em seus processos (tingimento, alvejamento, estamparia e acabamento) que impactam fortemente o meio ambiente devido ao grande número de efluentes nocivos gerados.

O consumo diário de água em uma indústria têxtil de médio porte com uma produção de cerca de 8 toneladas de tecido por dia é de aproximadamente 400.000 litros de água. Para o tingimento, o consumo específico de água varia de 30 a 50 L kg<sup>-1</sup> de tecido, dependendo do tipo de corante utilizado (Kant, 2012). Assim, a necessidade de ações preventivas e corretivas na

gestão da água torna-se um processo importante a ser avaliado. A recirculação da água no processamento têxtil é recomendada como a abordagem mais promissora, para a construção de uma economia circular sustentável (Bilińska ; Gmurek, 2021).

### **3.2-Arranjo Produtivo Local de Pernambuco**

Em Pernambuco, o Arranjo Produtivo Local (APL) localiza-se na região Agreste de Pernambuco, sendo um dos maiores polos têxteis do Brasil, empregando cerca de 100.000 pessoas, com uma produção de aproximadamente 900 milhões de peças por ano. (Filho et al., 2019). O conceito de cadeia/arranjo produtivo ou cadeia de valor está centrado nas atividades necessárias para converter uma matéria-prima em produtos acabados para a venda e o valor agregado em cada etapa (elo) da cadeia (Antero, 2006). Assim conceituada, a cadeia produtiva têxtil e de confecções inicia-se, de maneira simplificada, na agropecuária (fibras naturais) ou na indústria química (fibras manufaturadas), passando pelo fio, tecido, beneficiamento e confecção. Dada à característica de grande heterogeneidade em relação às matérias-primas utilizadas e processos produtivos, é necessário a APL desempenhar medidas para garantir a sustentabilidade ambiental. Muitas dessas lavanderias estão interessadas em obter o selo verde que atesta que estão adequadas à regularização ambiental, para manter sua importância, e conquistar novos mercados (Santos *et al.*, 2018).

### **3.3-Geração do resíduo têxtil**

De acordo com Kunz et al. (2002) o setor têxtil e de confecção é responsável por grande parte da poluição ambiental, uma vez que emite gases, resíduos sólidos, ruídos, odores e grandes quantidades de efluentes líquidos que estão diretamente ligados ao tipo de substrato têxtil que está sendo processado dos corantes utilizados e do tipo de equipamento.

Dentre as etapas com potencial para a geração de resíduos em toda a cadeia da indústria têxtil e de confecção, está a fase do processo de beneficiamento. Isto porque esta fase envolve processos de alvejamento, tingimento, acabamento e estamparia do algodão já fiado e tecido, onde se emprega o maior número de substâncias químicas em processos de risco ambiental acentuado e potencialmente poluidores. Além do mais, esse processo utiliza-se de grandes quantidades de água. Este fato, associado ao elevado aproveitamento dos insumos (engomantes,

corantes, amaciantes, detergentes, etc.), faz com que esta tipologia seja responsável pela geração de grandes volumes de resíduos, com elevada carga orgânica e forte coloração (Kunz *et al.*, 2002).

Sendo assim, na maioria dos casos, nem todas as lavanderias sabem reduzir a geração de seus resíduos, tão pouco gerenciam ou investem em algum processo de destinação correta destes resíduos, de modo que contribua positivamente para a empresa, geralmente os resíduos sólidos, como o lodo têxtil são incinerados contribuindo para emissão de gases de efeito estufa ou destinados a aterros sanitários, porém os metais pesados estocados no lodo são facilmente lixiviados para a solução do solo, contaminando assim o solo e os rios (Milan *et al.*, 2010).

### **3.4-Corantes têxteis**

Os tipos de corantes mais utilizados no processo de tingimento de tecidos podem ser classificados como reativos, básicos, ácidos, diretos, azo, sulfurizados e pré-metálicos (Benkhaya *et al.*, 2020). Os corantes azo são considerados a maior classe de corantes sintéticos utilizados na fabricação têxtil, com uma taxa de perda de 10-15% durante o processo de tingimento (Sarkar, 2017). Os corantes são compostos químicos que se ligam à superfície dos materiais para dar cor ou modificá-la. A maioria consiste em moléculas orgânicas complexas resistentes à degradação que são usadas em processos tecnológicos nas indústrias para tingimento de tecido, processamento de alimentos e bebidas, plásticos e indústria farmacêutica (Yagub *et al.*, 2014). Esse tipo de molécula, quando descartada em corpos hídricos afeta a atividade fotossintética da vida aquática devido à diminuição da luz que penetra na água, além de serem considerados tóxicos (Ahmad *et al.*, 2019). São considerados carcinogênicos, mutagênicos e teratogênicos frente às espécies microbiológicas e de peixes. Adicionalmente, podem causar sérios danos à saúde humana provocando disfunções no sistema reprodutivo, sistema nervoso central, sistema respiratório, rins, fígado e cérebro (Marques *et al.*, 2019).

Em relação à aplicação de cores em tecidos, o consumidor costuma estabelecer algumas características básicas do produto e para garantir essas propriedades, as substâncias que dão coloração à fibra devem apresentar alta afinidade, uniformidade na coloração, resistência aos agentes que desencadeiam o desbotamento e ainda serem economicamente viáveis (Guaratini, 2000). Este procedimento impõe às lavanderias a utilização de uma grande variedade de

corantes e o lançamento incorreto desses resíduos podem resultar em alterações nas características do solo, da água e do ar (Araujo; Fontana, 2015).

### **3.5 Processos de tratamento**

O método de tratamento pode ser classificado como físico, químico ou biológico, sendo escolhido com base nas características do efluente. Entretanto, para o setor têxtil não é suficiente a escolha de apenas um tipo de tratamento para que seja atingido todos os requisitos legais do (CONAMA 357/2005), haja vista que este tipo de efluente possui uma alta variação de características devido ao seu processo produtivo que se modifica diversas vezes, segundo a moda e estações do ano. (Queiroga et al., 2019).

O tratamento mais convencional utilizado para efluentes têxteis consiste em técnicas como coagulação, flotação ou sedimentação, estas técnicas removem com eficiência o material particulado, porém alguns autores citam a utilização do tratamento por adsorção, pois as técnicas mencionadas não têm eficiência para a remoção de cor e compostos dissolvidos. (Kunz *et al.*, 2002).

#### **3.5.1 Coagulação e Floculação**

Quando se trata de efluente industrial, o tratamento químico se torna indispensável já que alguns metais e bactérias são resistentes aos tratamentos biológicos (Schroeder, 2016). A coagulação e floculação são processos físico-químicos amplamente utilizados em indústrias e para o tratamento de efluente têxtil pois são eficientes na remoção de sólidos suspensos, fósforo, redução da demanda química de oxigênio (DQO) e da cor (Kim, 2016). O processo de coagulação ocorre com a adição de um coagulante químico que retira as cargas eletrostáticas negativas dos colóides, diminuindo o seu potencial repulsivo e os aglutinando.

A floculação ocorre em sequência, com uso ou não de um floculante fazendo com que as partículas se organizem em flóculos de maior dimensão e densidade, podendo ser retirados posteriormente por filtração e/ou decantação (Zhang, 2018). Para que haja um bom funcionamento do processo de coagulação devem ser levados em consideração alguns fatores como pH, concentração do coagulante, agitação e o tempo de sedimentação.

### 3.5.2-Adsorção por Celulose Bacteriana

No processo de tingimento das roupas, é utilizado um grande número de moléculas de corante, sais e aditivos, esses sais nos efluentes têxteis aumentam a carga de poluentes e aumentam o tempo de descoloração, o que traz mais problemas para o tratamento dos efluentes (Muthukumar ; Selvakumar, 2004). Além disso, as águas residuais geradas podem estar em condições ácidas ou alcalinas, o que traz ainda mais desafios para o tratamento de águas residuais têxteis (Leaper *et al.*, 2019).

Segundo Furlan *et al.* (2018), a adsorção é um método de tratamento de águas residuais que tem se destacado, por apresentar uma remoção efetiva de compostos orgânicos e inorgânicos. Por sua vez, é uma técnica que se refere a um processo onde algumas das espécies químicas da fase fluida (adsorvato) aderem à superfície da fase sólida de um material (adsorvente), e dois níveis de interação para que ocorra a remoção do contaminante do meio (Rahman *et al.*, 2017).

Dessa forma, acredita-se que a CB se enquadra como um biopolímero bastante promissor, tornando-se um dos biomateriais mais próspero da atualidade, obtido através de rotas biosintéticas por meio de bactérias de alguns gêneros como: *Gluconacetobacter*, *rhizobium*, *Sarcina*, *Agrobacterium*, *Alcaligenes*, que produzem um polímero linear de celulose fortemente associada pelas ligações de hidrogênio que são responsáveis pela formação de fibras de celulose (Donini *et al.*, 2010). As bactérias do gênero *Gluconacetobacter* são as que vêm sendo destacadas por pesquisadores, devido a sua capacidade de sintetizar celulose em quantidades comerciais (Kuo *et al.*, 2016).

Para o crescimento da *G. xylinus* a faixa e temperatura ideal para a cultura é de 28 – 30 °C (Klemm *et al.*, 2011). Sua produção se dá em meio de cultura composto por hidratos de carbono, que são as fontes necessárias para a síntese da CB, extrato de levedura, fonte de nitrogênio e ainda peptona. Os períodos de incubação para a produção de CB dependem do sistema de cultivo, onde o aparecimento da película de celulose pode surgir com 24h (Iguchi *et al.*, 2000). Segundo Campano (2016) a produção da CB ocorre em meio estático, onde surge o crescimento de uma membrana na superfície do meio de cultura, sendo o processo mais utilizado, devido ao baixo custo e aumento do rendimento de produção. A CB pode ser sintetizada por condições estáticas e agitadas (Donini *et al.*, 2010). O pH ótimo para a produção

da CB é dependente do microrganismo que será utilizado, variando o pH de 4 a 7 (Andrade *et al.*, 2010).

Tradicionalmente a cultura é cultivada em frascos rasos por um período de 5 a 20 dias, até o surgimento de uma película na superfície do frasco. A película é então removida, lavada, geralmente com hidróxido de sódio (NaOH) em banho maria a 80°C para a remoção das bactérias, conhecida como processo de purificação da CB (Recouvreux, 2008). A CB tem um enorme potencial para ser utilizada como um novo adsorvente para a separação eficaz de metais potencialmente tóxicos, devido às suas propriedades de elevada capacidade de retenção de água, rede de fibras finas, elevada resistência à tração mecânica, elevada pureza, flexibilidade, elasticidade, ausência de toxicidade e biocompatibilidade (Lins *et al.*, 2019).

### **3.6 Produção mais limpa (P +L)**

As indústrias têxteis têm uma contribuição fundamental para o desenvolvimento econômico sustentável. Entretanto, para expandir e continuar a melhoria das indústrias têxtil, a atenção deve ser dada à sustentabilidade dos recursos que a indústria consome, portanto é necessária a importância de incorporar sistemas de energia sustentável, água e conservação ambiental para a sustentabilidade industrial (LATIF *et al.*, 2017). A reciclagem da água é uma técnica eficaz para reduzir a pegada hídrica e economizar custos, além de beneficiar o meio ambiente a longo prazo, então o tratamento sustentável de efluentes que é gerado ao longo dos diferentes processos de manufatura, é essencial para reduzir a carga de poluentes da água (OPHER *et al.*, 2018). Assim, as indústrias estão adotando novas estratégias e conceitos para gerenciar suas operações diárias, de modo a adotar práticas sustentáveis em cada processo de produção, desde o consumo de recursos até o reaproveitamento de resíduos.

Diferentes ferramentas e modelos de apoio à decisão de gestão verde estão sendo discutidos por diversos pesquisadores (PAN *et al.*, 2019). Uma das abordagens dinâmicas é a prevenção da poluição, geralmente chamada de produção mais limpa que permite a integração do consumo de recursos naturais e práticas de produção e enfatiza a otimização do processo de produção com considerações ambientais, também denominada como uma estratégia proativa de proteção ambiental.

### **3.7 Legislação ambiental**

As atividades da indústria devem ser regidas pela implementação de legislação específica para o controle e monitoramento de determinada atividade. Com relação ao tratamento de efluentes, existem normatizações nas esferas municipais, estaduais e nacionais (MARQUES, 2017). Segundo a Constituição Federal, o Art. 170 objetiva-se na necessidade de defesa do meio ambiente e para isso, deve-se apresentar tratamento diferenciado, considerando os impactos ambientais negativos na prestação de serviços e na confecção de produtos (BRASIL, 1988).

No Art. 22, inciso IV, da Constituição Federal de 1988 referente aos recursos hídricos, se estabelece que compete privativamente à União legislar sobre a água. Assim foi criada a Lei nº 9.433/1997 que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), criando através desta lei o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, que define critérios de outorga e direitos do uso da água. Ainda não há uma legislação específica com relação aos corantes dissolvidos no efluente têxtil, que estabeleça padrões de cor, no entanto, a resolução CONAMA 357/2005 classifica como classes 2 e 3, para corpos hídricos de água doce, o valor tolerável de cor real ou verdadeira de até 75 mg Pt/L (CONAMA, 2005).

Em 2012, as lavanderias de beneficiamento de jeans firmaram o Termo de Ajustamento de Conduta (TACs) perante o Ministério Público de Pernambuco (MPPE), onde as empresas se comprometem a não lançar efluentes líquidos industriais sem o devido tratamento em corpos hídricos, no solo ou em qualquer meio natural, além de manter o sistema de tratamento físico químico dos resíduos em correta operação (MPPE, 2015).

Com relação ao município de Caruaru, área de estudo da presente pesquisa, a lei municipal nº 5.058/2010 dispõe sobre o licenciamento ambiental e as infrações municipais, estabelecendo que o licenciamento ambiental e a fiscalização ambiental devem ser de competência da Secretaria Municipal de Infraestrutura e Políticas Ambientais Municipais (CARUARU, 2010).

### **3.8-Espectrometria (ICP)**

A espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado, ICP OES, é uma técnica analítica que pode ser utilizada para determinação de elementos maiores, menores e em níveis de traço baseada nos espectros de emissão óptica dos elementos. Resultados analíticos são obtidos, na prática, para aproximadamente 70 elementos, com limites de detecção geralmente alcançando níveis de  $\mu\text{g L}^{-1}$ , sendo a maioria das amostras introduzidas na forma líquida, como soluções aquosas (Oliveira, 1996).

A ICP possibilita a determinação dos metais por meio dos métodos espectrofotométricos, ou seja, determina os elementos e os traços em diversos tipos de amostras. Assim, a amostra deve passar por um processo de digestão ácida que almeja remover os componentes orgânicos, para logo após, utilizar a técnica, que seria basicamente a excitação dos átomos através de uma tocha de plasma acima de 600k induzido por argônio, tais átomos se excitariam até emitirem o comprimento de onda específico e característico de um determinado elemento (Oliveira *et al.*, 2000).

Apesar de existirem cerca de 70 elementos que podem ser determinados por ICP OES, alguns elementos não o podem, como os que entram naturalmente no plasma, como argônio. Elementos muito abundantes na atmosfera ou nas amostras podem apresentar limitações severas para quantificação, como C, H, N, O. Outra categoria com resultados insatisfatórios no ICP são elementos que tem energia de excitação muito altas, como os halogênios F, Cl, Br, I, que podem ser determinados, mas com limite de detecção elevado, insuficiente para a maior parte das aplicações. Limitações ocorrem, também, em elementos sintéticos que são tipicamente radioativos ou com curto tempo de vida. (Colzato, 2023).

Após a excitação é possível medir a radiação eletromagnética tanto das regiões visíveis quanto das ultravioletas emitidas por átomos e íons. Além disso, por meio da excitação é possível identificar diversos elementos, como por exemplo, os metais e semimetais, já que a radiação é medida por meio da detecção óptica dentro das características dos comprimentos de ondas. No tocante a comparação dos resultados, a identificação pode ser qualitativa, quando se identifica pelo menos três linhas de emissão no resultado, e quantitativa quando é possível comparar os sinais dos íons e os padrões de referência (Santos, 2007).

A técnica ICP OES é fundamentada na determinação multielementar da composição da amostra pela emissão de átomos e íons excitados. Grades de difração são os componentes responsáveis pela radiação monocromática emitida. Trata-se de uma técnica analítica versátil e atraente para cada vez mais aplicações. (Colzato, 2023).

### **3.9-Espectroscopia (FTIR)**

A Espectroscopia FTIR é o método que oferta diversos recursos analíticos aos laboratórios acadêmicos, principalmente nos de controle de qualidade, já que tal método pode se relacionar a diversas áreas, desde simples compostos até o controle de processos. Esse método é aplicado quando há uma ampla variedade de aplicações químicas, como por exemplo, polímeros e compostos orgânicos. Significando infravermelho por transformada de Fourier, este se torna o método mais utilizado para realizar a espectroscopia de infravermelho, pois quando a radiação infravermelha atinge a amostra, parte da radiação é absorvida e parte é transmitida, o sinal que resultar no detector é o espectro. (Souza; Poppi, 2012).

A técnica FTIR é rápida e requer um mínimo de preparo das amostras, com instrumentação de fácil acesso em laboratório, permitindo analisar qualitativamente os compostos orgânicos identificando características de cada vibração provocando o surgimento de bandas dentro do espectro infravermelho em frequências específicas. Desta forma, o espectro infravermelho tem mais informações que os valores de posição ou absorção de alguns picos (Souza; Poppi, 2012).

### **3.10- Análise de Termogravimetria (TGA)**

O ensaio de TGA é um dos principais ensaios térmicos utilizados na caracterização de materiais. Esse ensaio mede a variação de massa da amostra (perda e/ou ganho) em função da variação de temperatura imposta ao material analisado. O equipamento é composto por uma balança que mede a massa da amostra do início ao fim do ensaio. O TGA é utilizado na caracterização das propriedades físicas e químicas dos materiais por meio da função da temperatura em uma atmosfera controlada, como o instrumento é versátil, o mesmo pode ser integrado a um sistema online, como por exemplo, a um espectrômetro de massa ou FTIR, ela pode ter sua utilização dentro dos estudos nas indústrias, pois analisa a decomposição térmica das substâncias e materiais, controlando a velocidade das transformações químicas ocorridas. (Rambo *et al.*, 2015).

O equipamento utilizado para analisar a TGA é composto pela balança, este equipamento permite a pesagem contínua da amostra em função da temperatura. A partir deste equipamento é possível identificar e mapear quando ocorre a decomposição, a mudança

estrutural, a oxidação, a combustão, a desidratação e as demais reações advindas das faixas de temperaturas. Neste sentido, é possível por meio da TGA determinar a maior aplicabilidade dos corantes em situações diversas após sua utilização primária, ou seja, é possível estabelecer em qual faixa de temperatura os materiais podem ser utilizados e reutilizados sem comprometer suas propriedades (Rambo *et al.*, 2015).

### 3.11 Espectroscopia UV-VIS

A espectroscopia UV-VIS é considerada uma das análises espectrofotométrica mais importante e mais utilizadas para a análise em uma variedade de compostos. Esta técnica funciona com base na medição da interação de radiações eletromagnéticas (EMR) com matéria em comprimento de onda específico. Na espectroscopia UV-VIS, a absorção de luz é o fenômeno básico regida por várias leis de absorbância nas quais a espectroscopia UV-VIS funciona. (Akash *et al.*, 2020).

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 Corantes analisados

Investigação da capacidade adsorvente de um biomaterial frente à dez corantes têxteis (Tabela 1) e posteriormente propor um processo térmico combinado que permita a recuperação dos corantes, através da calcinação em forno acoplado a energia solar.

**Tabela 1.** Identificação e classificação dos corantes têxteis analisados

Código	Nome comercial	Número CAS	Classificação	Composição
C1	amarelo reativo 160	129898-77-7	corante monoazo	orgânico
C2	vermelho reativo 198	145017-98-7	corante monoazo	orgânico
C3	preto direto 22	6473-13-8	corante tetrazo	orgânico

C4	vermelho direto 227	12222-51-4	corante diazo	orgânico
C5	preto reativo 5	17095-24-8	corante diazo	orgânico
C6	amarelo reativo 86	50925-42-3	corante diazo	orgânico
C7	azul reativo 5	16823-51-1	corante antraquinona	orgânico
C8	vermelho direto 23	3441-14-3	corante diazo	orgânico
C9	azul reativo 14	12236-86-1	corante ftalocianina	metalorgânico
C10	azul reativo 21	129898-77-7	corante ftalocianina	metalorgânico

## 4.2 Reagentes

Os reagentes e solventes utilizados apresentam grau analítico e foram utilizados sem prévia etapa de purificação. Os produtos químicos de partida foram ácido clorídrico 36,5% (Dinâmica), ácido nítrico 65% (Neon), ácido succínico 99% (Aldrich), D-manitol 99% (Nuclear), extrato de levedura (Himidea), glicerol 99,5% (Dinâmica), hidróxido de sódio 99,8% (Neon), monohidrogenofosfato de sódio dodeca-hidratado 98,0% (Dinâmica), peptona (Kasvi).

## 4.3 Coleta de amostras e soluções de trabalho

Todos os corantes têxteis foram adquiridos em um mercado local de lavanderia na cidade de Toritama, Pernambuco, Brasil, tendo como coordenadas geográficas 08° 00' 24" de latitude sul, 36° 03' 24" de longitude oeste e altitude 349 m. As amostras de corantes têxteis foram submetidas a uma temperatura de 110 °C por 12 h para secagem completa e resfriadas em um dessecador. A solução estoque de cada corante foi preparada com uma concentração de 20,0 mg L<sup>-1</sup> utilizando água destilada previamente fervida para retirar os gases do meio e evitar qualquer processo de oxidação e variação no pH do sistema, (Figura 1). Para melhor conservação, todas as soluções de reserva foram também armazenadas em frascos âmbar à 5 °C.

**Figura 1:** (a) Soluções estoque dos corantes têxteis



Fonte: Autor (2024).

#### 4.4 Metodologia de digestão das amostras

Para a determinação do teor de metais em cada corante têxtil, uma quantidade de 1,0 g de cada amostra foi solubilizada e decomposta com água-régia (mistura de HCl/HNO<sub>3</sub> (3:1)) em uma placa de aquecimento a 100 °C durante 12 h. Posteriormente, as amostras foram deixadas em repouso até à temperatura ambiente. Por fim, as amostras foram filtradas e adicionadas a um balão volumétrico de 50 mL, e o volume foi aferido com solução de HNO<sub>3</sub> a 5% (v/v).

#### 4.5 Produção de Celulose Bacteriana (CB)

A produção de membrana bacteriana foi adaptada do trabalho de referência, Souto (2022). Foi utilizada a bactéria *Gluconacetobacter xylinus*, tendo o glicerol como fonte de carbono. O meio de cultura foi produzido com 30 g L<sup>-1</sup> de glicerol, 16 g L<sup>-1</sup> de extrato de levedura, 5 g L<sup>-1</sup> de peptona, 4 g L<sup>-1</sup> de Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, e 3,5 g L<sup>-1</sup> de ácido succínico. A solução de nutrição foi distribuída em frascos de vidro borossilicato previamente autoclavados à 121 °C por 15 min. Para a incubação, foram pipetados 5 mL de *G. xylinus* para meio Hestrin e Schramm (HS) por 48 h em condições estáticas à 30 °C. Após a obtenção da membrana a purificação foi realizada via imersão dos filmes em uma solução de NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>, sob aquecimento à 80 °C por 30 min. O processo foi repetido até o pH atingir a neutralidade, (Figura 2),

**Figura 2:** Obtenção da CB



Fonte: Autor (2024).

#### 4.6 Instrumentação

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície da celulose foi realizada no TESCAN MIRA 3 com uma tensão de aceleração de 20 kV e um detector de elétrons secundários *Equations*. O perfil vibracional dos grupos funcionais foi obtido pela técnica de Espectroscopia Vibracional com Transformada de Fourier (FTIR) em um espectrofotômetro IR-TRACER-100 da Shimadzu<sup>®</sup> utilizando-se pastilhas de KBr em uma faixa de 4000-400  $\text{cm}^{-1}$ . O comportamento de absorção foi analisado em um Espectrofotômetro Ultravioleta-Visível (UV-Vis) da Shimadzu<sup>®</sup>, modelo UV-1800 com uma cubeta de quartzo de 10 mm. O intervalo de trabalho foi delimitado entre 380-750 nm. A estabilidade térmica foi verificada no TGA 50 da Shimadzu<sup>®</sup>, utilizando atmosfera de  $\text{N}_2$ , com um fluxo de 100  $\text{mL min}^{-1}$  e rampa de aquecimento de 5  $^{\circ}\text{C min}^{-1}$  até 800  $^{\circ}\text{C}$ . O teor de metais foi analisado pela técnica de Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES).

#### 4.7 Análise multivariada

Esta análise foi utilizada para pontuar a relação entre as características extraídas dos corantes. Todo o conjunto de dados é composto por valores de absorbância e o teor de metais de todos os corantes. Um total de 10 amostras foi processado utilizando a Análise de Componentes Principais (do inglês, PCA). As classificações foram derivadas pelo agrupamento de variáveis de acordo com a cor específica e as concentrações de metal.

#### 4.8 Estudos de estabilidade de pH e cinética de adsorção

A estabilidade dos corantes têxteis foi avaliada a partir da resposta de absorvância em uma faixa de pH entre 3,0 a 11,0. Os 5,0 mL de solução estoque foram corrigidos com HCl 1,0/0,10 mol L<sup>-1</sup> e NaOH 1,0/0,10 mol L<sup>-1</sup> até atingir os valores de pH de interesse. O experimento de adsorção foi conduzido pela adição de ~100 mg de CB seca (por aproximadamente 6 h, até obter massa constante em estufa a 50 °C), em forma de um quarto de círculo. A massa de CB foi mantida à temperatura ambiente, sob agitação constante e abrigo de luz em 20,0 mL das soluções estoque dos corantes avaliados. As amostras permaneceram sob agitação constante variando o tempo de contato de 0; 1; 2; 4; 8; 12; e 24 h. Em cada período, foram retirados 2,0 mL do sistema para análise de absorção eletrônica e devolvidos o mais rápido possível ao recipiente para evitar interferência na concentração da solução.

**Figura 3.** (a) Aspectos visual dos testes de adsorção do C6, C7, C8 e C10<sub>ácido</sub> C10<sub>básico</sub> na CB.  
(b) Aspecto visual da CB após 24h na solução





Fonte: Autor (2024).

O ensaio de adsorção foi realizado em triplicata, e a porcentagem de remoção do corante foi estimada pela (equação 1):

$$\% \text{ de remoção} = \frac{C_i - C_f}{C_i} * 100 \quad (1)$$

Onde:  $C_i$  representa a concentração inicial ( $\text{mg L}^{-1}$ ) dos corantes;

$C_f$  é igual à concentração ( $\text{mg L}^{-1}$ ) medida no intervalo definido.

Outro parâmetro avaliado foi a quantidade de corante retido pelo adsorvente no equilíbrio,  $q_e$  ( $\text{mg g}^{-1}$ ), em um tempo  $t$ , definido pela (equação 2):

$$q_e = \frac{(C_i - C_f) * V}{m} \quad (2)$$

Onde:  $V$  representa o volume da solução (L)

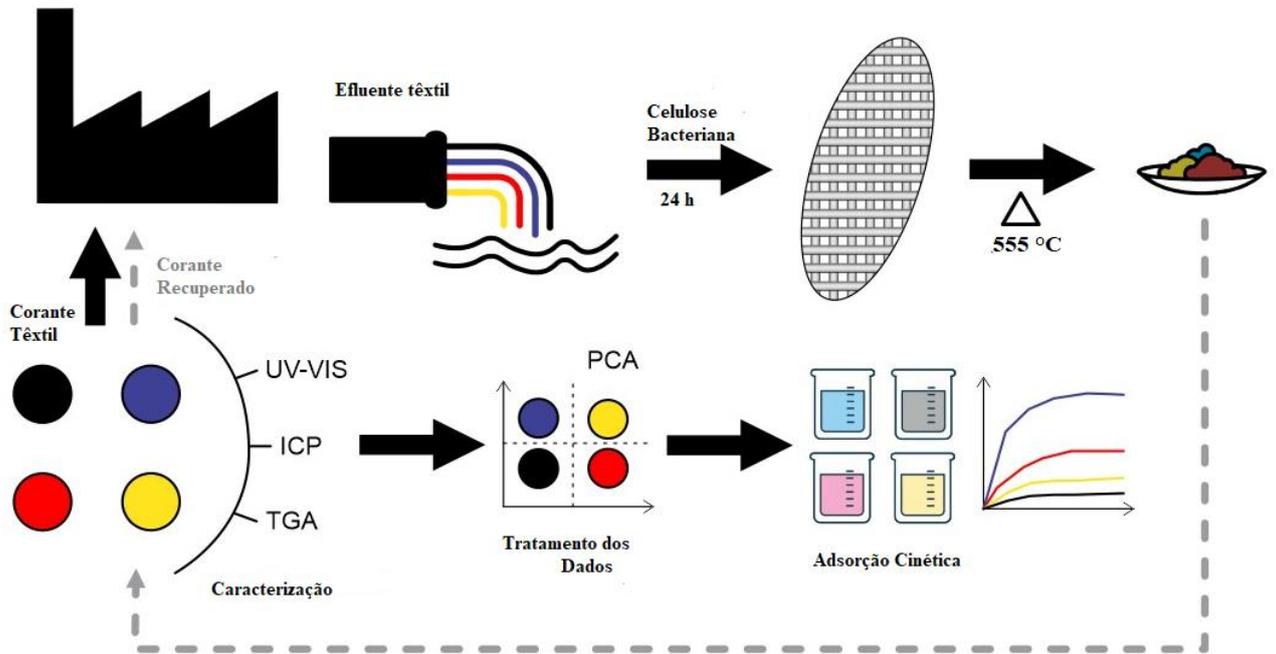
$m$  é a massa seca do adsorvente (g).

#### 4.9 Obtenção do corante ecológico através de CB

Na investigação, foi produzido um bioadsorvente como alternativa ao tratamento de águas residuais têxteis, que poderia atuar como uma ferramenta para reciclar corantes e poupar

água. Este processo reduziria os custos de tingimento de tecidos através da obtenção de um novo “corante ecológico” para posterior curtimento, conforme exposto na figura 1.

**Figura 4:** Esquemática para obtenção do corante ecológico

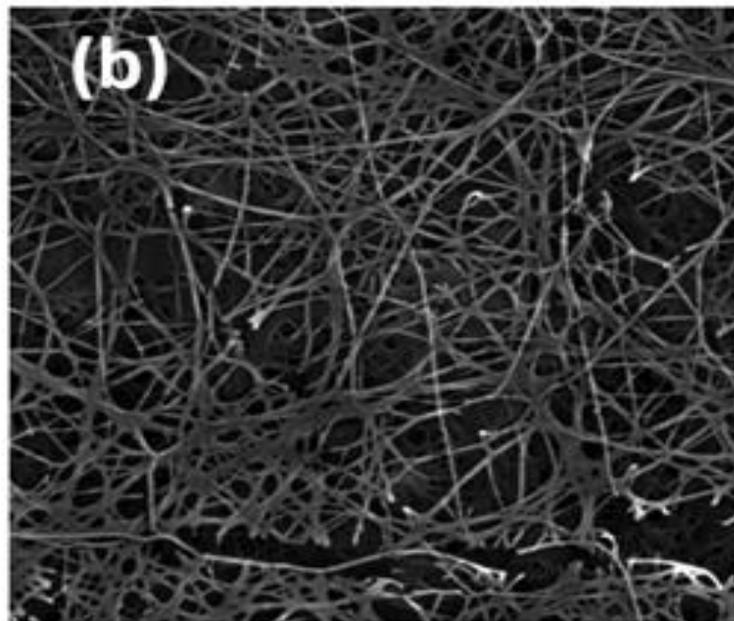
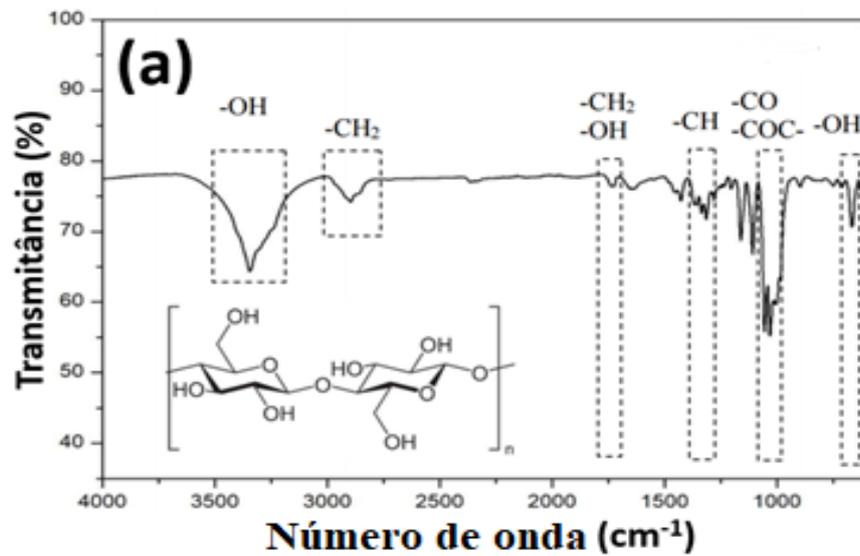


Fonte: Autor (2024).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização da CB

**Figura 5.** (a) Espectro FTIR da CB. (b) MEV da CB.



Fonte: Souto, 2022.

Como podemos ver na Figura 5(a), o comportamento vibracional da CB foi investigado. A banda A em  $3344 \text{ cm}^{-1}$  refere-se ao padrão de estiramento H-O, com um perfil bem conhecido de interação intermolecular entre os grupos hidroxila (Ho Jin *et al.*, 2019). O pico B em  $2897 \text{ cm}^{-1}$  é atribuído ao grupo metileno ( $-\text{CH}_2-$ ) presente na zona cíclica da estrutura da CB. O sinal C em  $1361 \text{ cm}^{-1}$  mostrou vibrações associadas a grupos metileno ( $-\text{CH}-$ ) (Quintana-Quirino *et al.*, 2019). Também foi observado que um pico D em  $1161 \text{ cm}^{-1}$  foi causado pelo estiramento assimétrico de  $-\text{C}-\text{O}-\text{C}-$  do tipo de ligação glicosídica ( $\beta 1 \rightarrow 4$ ) (Taokaew *et al.*, 2023).

Finalmente, em  $1109\text{ cm}^{-1}$  o pico  $\underline{E}$  atribuído à ligação -C-O presente na unidade mínima do polissacárido (Souza *et. al*, 2020). Na Figura 5(b), as micrografias demonstram a morfologia característica da CB apresentada em microfibras (Taokaew *et al.*, 2023). Tanto o tamanho quanto a largura foram medidos no software *ImageJ*, levando a uma ordem de tamanho de 15-42 nm para as fibras de CB. Vale ressaltar que a *G. xylinum* sintetiza fibras primárias com dimensões laterais na faixa de 7 a 13 nm, que podem se agregar em faixas finas e planas com sua largura chegando a 70 nm (Keshk, 2014).

## 5.2 Caracterização dos corantes

Para a caracterização inicial dos dez corantes têxteis escolhidos para esta pesquisa, foi realizada a análise ICP-EOS para quantificar o teor de metais em cada amostra e verificar a autenticidade do tipo de corante adquirido no mercado de lavanderia área apontada neste estudo. Abaixo estão resumidas as concentrações mais expressivas de metais nas espécies investigadas, na Tabela 2.

**Tabela 2.** Resultados de ICP-EOS para o teor de metais nas amostras de corantes C1-C10

Corante	As	Ca	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mo	Na	Ni	P	Sr	Zn
C1	2,5	0,3	2,0	19	0,1	0,2	0,1	0,5	150	3,0	10,5	6,0	123
C2	2,5	1,7	0,5	19	0,1	0,3	0,1	0,5	150	0,5	0,8	4,0	3,0
C3	2,5	0,4	0,5	0,5	0,1	0,3	0,1	0,5	150	0,5	0,1	9,0	0,5
C4	2,5	0,6	0,5	4,0	0,1	0,5	0,5	0,5	150	0,5	0,1	24	10
C5	2,5	0,9	2,0	113	0,2	0,6	0,3	0,5	150	1,0	0,1	23	2,0
C6	2,5	0,1	0,5	0,5	0,1	0,4	0,1	0,5	150	0,5	0,8	3,0	0,5
C7	2,5	0,1	2,0	5,0	0,2	0,3	0,2	0,5	115	3,0	0,1	7,0	2,0
C8	2,5	0,2	2,0	3,0	0,1	0,5	0,2	1,0	150	2,0	0,1	6,0	0,5
C9	2,5	1,1	0,5	>10000	0,5	0,3	0,3	57	150	4,0	0,9	27	0,5
C10	15	0,5	0,5	>10000	0,1	0,7	0,3	20	136	3,0	1,5	9,0	16

\*escala em ppm.

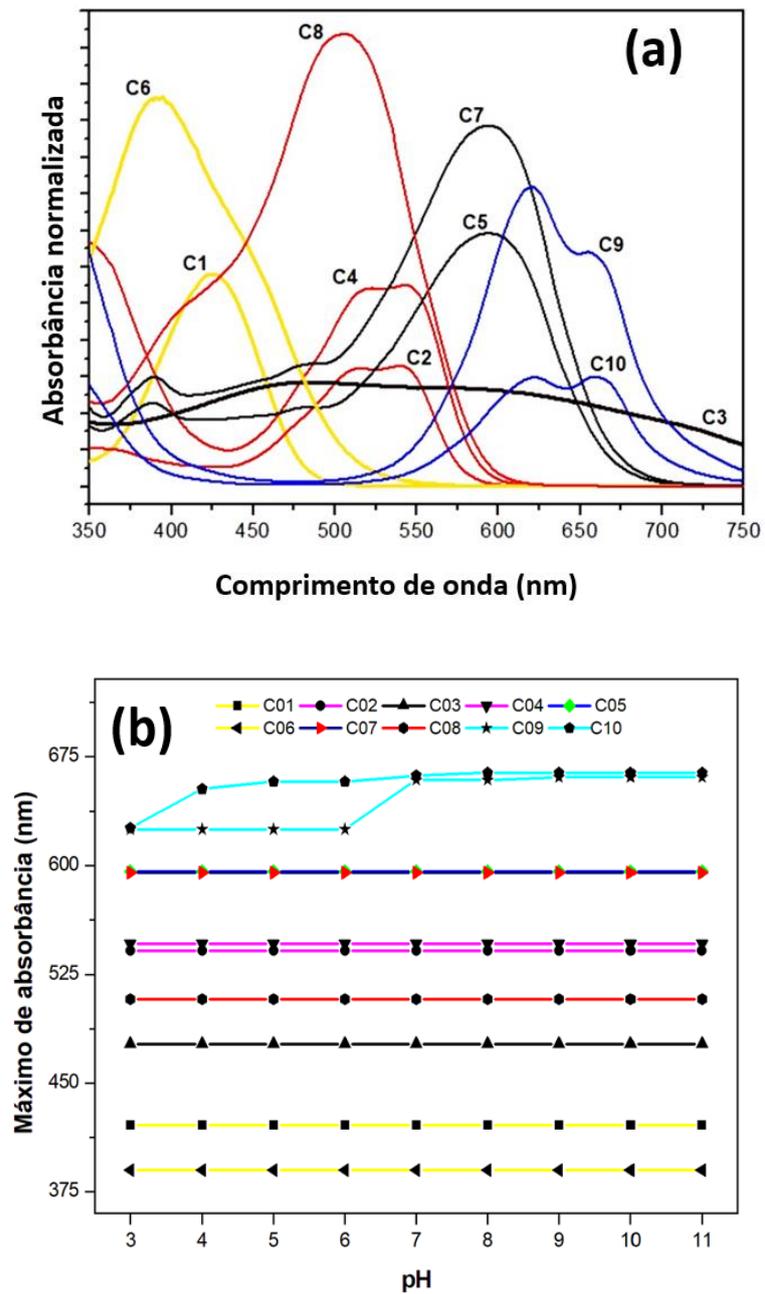
Os dados apresentados na Tabela 2 indicam a presença de alguns metais potencialmente tóxicos (Ahmed *et al.*, 2023), tais como As, Cu, Mo e Zn (C1, C9 e C10), que não deveriam

estar na composição do corante têxtil orgânico de acordo com as informações do rótulo. Este tipo de contaminação pode ocorrer devido a alguns mecanismos, como um processo de purificação ineficiente da produção de corantes (Zanoni; Yanamaka, 2016), ou a reutilização negligente de recipientes para mistura de corantes primários afim de se obter diferentes tonalidades de pigmentos (Dehnavi *et al.*, 2016; Bafrooei *et al.*, 2018). O segundo mecanismo ocorre normalmente porque a prática de misturar corantes é a mais utilizada recorrentemente para obter tonalidades únicas brilhantes (Zhang *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2019). O elevado teor de Cu nos corantes C9 e C10 são destacados mediante sua toxicidade em potencial, uma vez que o consumo recorrente de alimentos e água contaminados com uma percentagem elevada de  $\text{Cu}^{2+}$  pode provocar efeitos secundários preocupantes (Pal; Prasad, 2015), e agravar diagnósticos clínicos críticos como a doença de Wilson. (Schilsky *et al.*, 2017 ; Aggarwal *et al.*, 2020). Para além do cobre, foram também detectados teores significativos de Mo nesta técnica, o que poderá ser explicado pela elevada afinidade entre estes dois elementos em minerais, por exemplo (Berzina *et al.*, 2016). A associação entre o cobre e o molibdénio ocorreu majoritariamente devido à sua afinidade e semelhança química nos minérios, o que os torna um subproduto de outro no processo de purificação industrial (Orrego *et al.*, 2019). Outra questão seria os altos níveis de Na em todas as dez amostras, o que pode afetar a salinidade do corpo hídrico e desequilibrar os parâmetros naturais da água doce, causando danos à fauna nativa (Lu *et al.*, 2022). A eliminação incorreta de efluentes ricos neste tipo de contaminantes pode causar danos graves ao ambiente através da descarga de poluentes orgânicos e inorgânicos tóxicos na água (Tanveer *et al.*, 2022; Zeng *et al.*, 2023).

### 5.2.1 Análise da absorbância UV-Vis e estabilidade do pH

As soluções-estoque ( $20,0 \text{ mg L}^{-1}$ ) de C1-C10 foram submetidas à análise de absorção eletrônica em diferentes valores de pH e seus comprimentos de onda máximos de foram definidos na Figura 6.

**Figura 6.** (a) Espectros de absorção dos corantes C1-C10. (b) Monitoramento da absorção dos corantes C1-C10 em função do pH



Fonte: Autor (2024).

Na etapa seguinte, foi estudada a estabilidade dos corantes têxteis em função do pH do sistema (Tabela 3).

**Tabela 3.** Resultados de absorção eletrônica para os corantes têxteis com variação de pH

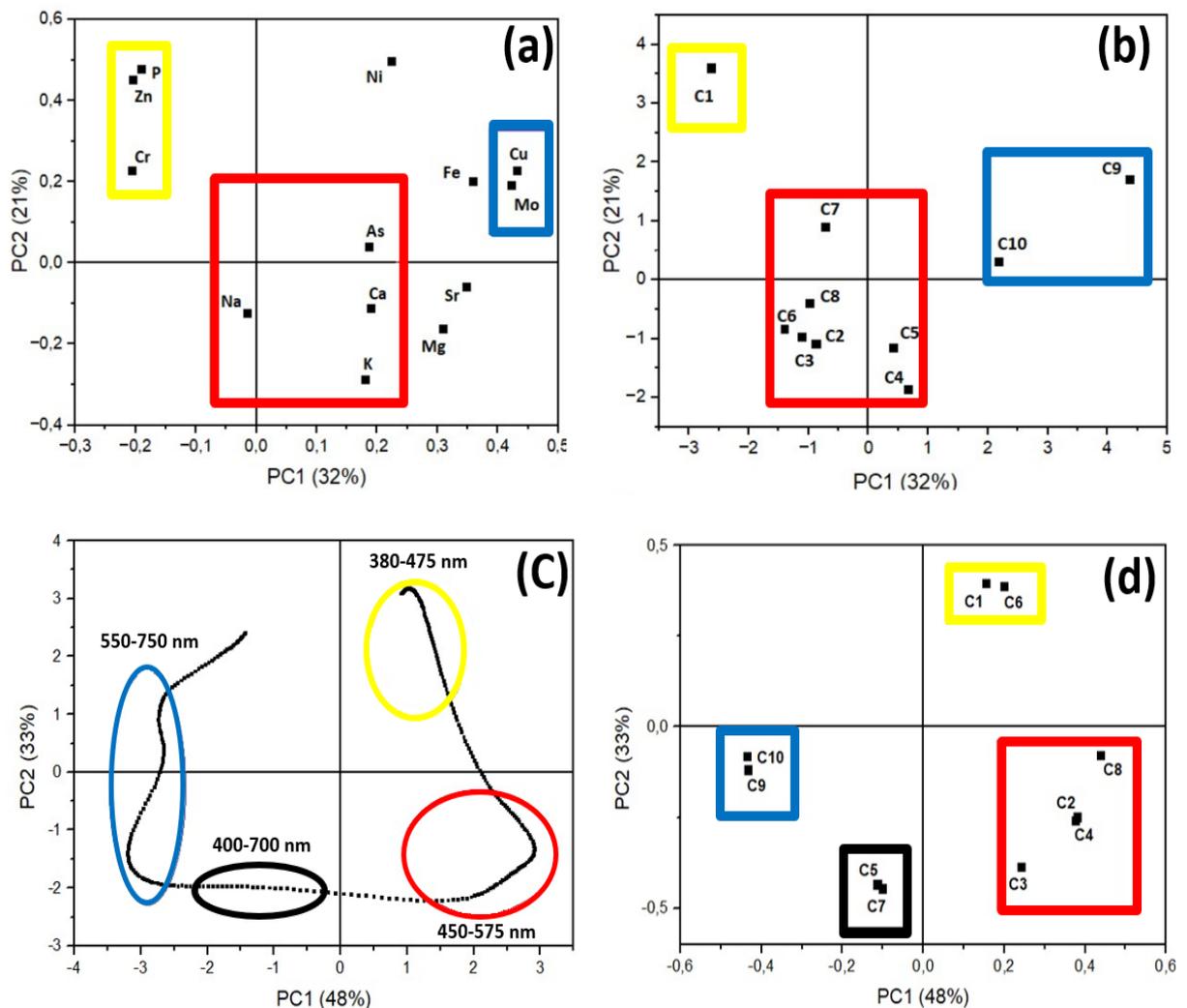
Corante	Cor	$\lambda_{\max}$ (nm)	Zona ácida forte (pH 3-5)	Zona biofílica (pH 6-8)	Zona alcalina forte (pH 9-11)
C1	amarelo	424	estável	Estável	estável
C2	rosa	541	estável	Estável	estável
C3	preto	595	estável	Estável	estável
C4	rosa	546	estável	Estável	estável
C5	azul marinho	596	estável	Estável	estável
C6	amarelo	390	estável	Estável	estável
C7	azul marinho	595	estável	Estável	estável
C8	vermelho	508	estável	Estável	estável
C9	ciano	625	estável	661 nm	661 nm
C10	ciano	624	estável	664 nm	664 nm

Este ensaio ajudou a compreender o comportamento químico da estrutura do corante e a estimar a possibilidade de rearranjo intramolecular promovido pela acidez da solução (Patil *et al.*, 2022). Como podemos observar na Figura 6(a), cada corante apresentou uma banda na região de sua respectiva coloração complementar, exceto o corante C3, que apresentou uma banda larga cobrindo todo o espectro visível. Os espectros de absorvância dos corantes orgânicos (C1-C8) apresentam transições causadas pelos principais grupos cromóforos nas estruturas químicas, tais como antraquinona, porfirina, azo e sistemas  $\pi$  hiperconjugados (Atav *et al.*, 2022; Yahya *et al.*, 2022). Os corantes metalorgânicos C9 e C10 mostraram dois picos principais com a contribuição do  $\text{Cu}^{2+}$  preso no anel tipo porfirina por ligações coordenativas (El Aggadi *et al.*, 2021). Na Figura 6(b) é perceptível alterações na estrutura do pigmento metalorgânico quando a forma ácida é submetida a um meio fortemente alcalino. Este comportamento pode indicar que o íon cobre pode ser liberado na zona ácida (devido à protonação excessiva dos sítios básicos de nitrogênio) e mais facilmente lixiviado para o solo ou para a água quando erroneamente descartado (El Aggadi; El Hourch, 2021). Esta evidência é uma informação crucial para a seleção da natureza do corante para os ensaios de adsorção, tendo em conta o perfil de contaminação bidirecional deste poluente antropogênico.

### 5.3 Análise de Componentes Principais (PCA)

Com base nos dados extraídos das regiões de absorvância, estabilidade em pH variante e teor de metais quantificados na análise ICP-OES para os dez corantes, foi possível dividir as amostras em *clusters* menores devido à sua semelhança química e estatística. Foi organizado no agrupamento estatístico de PCA de acordo com as informações inicialmente disponíveis, como demonstrado na Figura 7.

**Figura 7.** (a) PCA baseado no teor de metal na amostra de corante. (b) Agrupamento com base no tipo de corante avaliado. (c) PCA baseado na região de absorção das amostras de corantes. (d) Agrupamento com base na faixa de absorção de cada corante



Fonte: Autor (2024).

A primeira conclusão desta abordagem matemática foi que na Figura 7(a) e (b), extraídas no ICP-OES, a composição química foi a principal responsável pelos critérios de classificação. Nos extremos, temos dois grupos associados à presença de Zn ou Cu/Mo de alguma forma. Os restantes elementos variam igualmente para C1-C10. Os *clusters* demarcados na Figura 7(b) estão divididos pela sua toxicidade, em que C1 é a representação de um elevado nível de Zn para corantes amarelos, enquanto C9-C10 foram responsáveis por elevados níveis de Cu/Mo nos corantes azuis (Ilgun *et al.*, 2021).

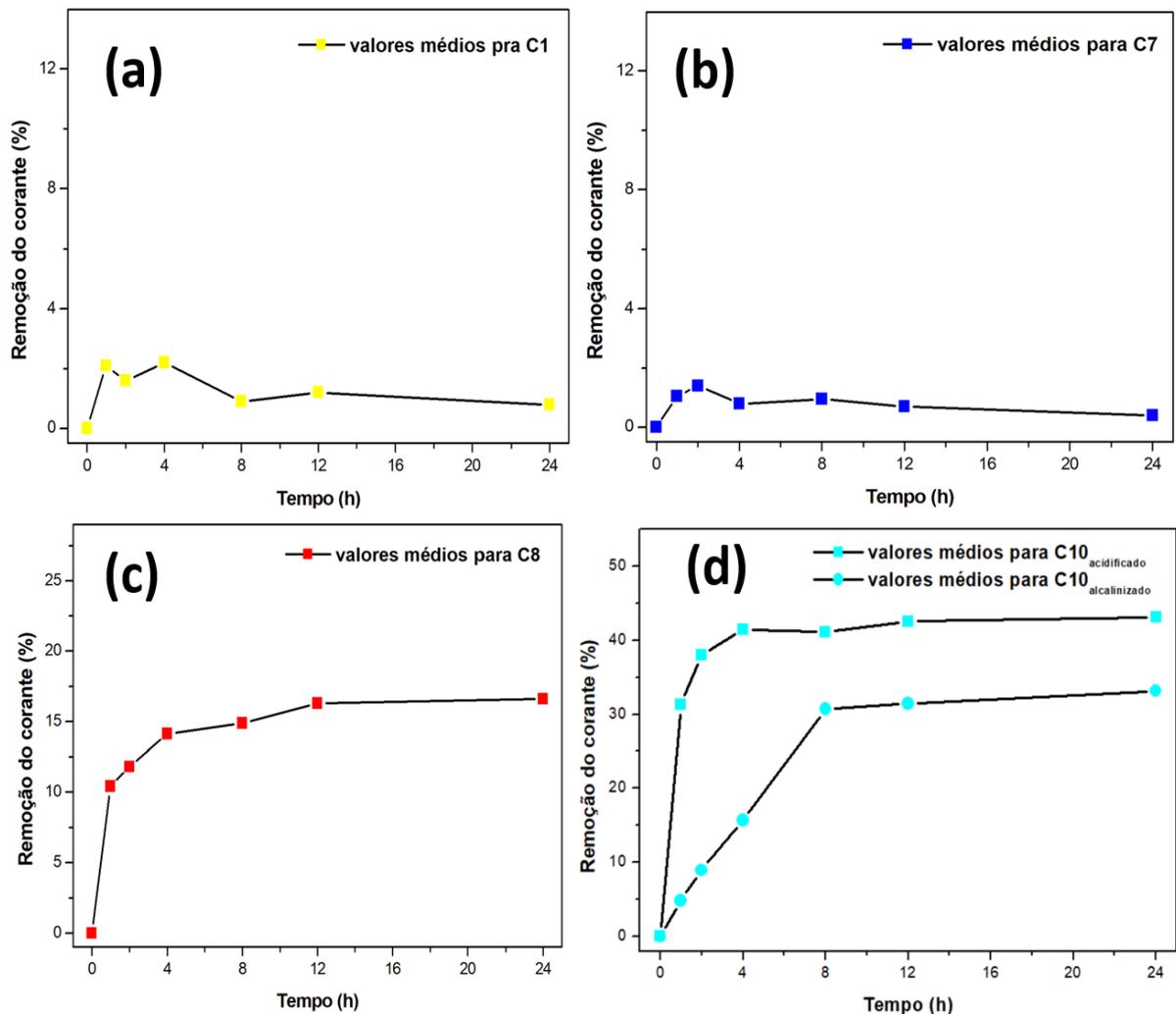
A PCA da Figura 7(c) baseou-se na faixa de absorvância de cada corante têxtil, o que redimensionou o quantitativo de amostras a quatro grupos. A separação das amostras foi mais notável nessa segunda abordagem, comparada com a baseada no ICP-OES, gerando quatro grupos que foram melhor definidos entre si. Como podemos ver acima, os representantes dos pigmentos amarelos (C1) e azuis (C10) já haviam sido definidos, e agora foram instituídos representantes para os grupos pretos (C7) e o vermelhos (C8). A representatividade estatística desses corantes (C1, C7, C8 e C10) também é observada na natureza estrutural dos corantes. O efeito oposto no PC1 da Figura 7(d) distingue os sítios de cromóforos grandes, como a antraquinona e as ftalocianinas, dos aglomerados de corantes monoazo/diazo. Notou-se também que a classe dos corantes diretos (C3, C4 e C8) foi agrupada em um único grupo, para além dos pigmentos reativos. Após a PCA, o quantitativo de dez corantes foi reduzido a quatro grupos com cada representante (C1, C7, C8 e C10), devido à semelhança química e à minimização do número de ensaios, como uma vantagem das abordagens quimiométricas (Da Costa *et al.*, 2020). Todos os quatro corantes escolhidos foram submetidos ao processo de tratamento por adsorção em CB para investigar o potencial de remoção deste biomaterial adsorvente como uma alternativa barata e viável para o tratamento de águas residuais em grande escala (El Aggadi; El Hourch, 2021).

#### 5.4 Cinética de adsorção

Com base no agrupamento estatístico, C1, C7, C8 e C10 foram submetidos a testes de adsorção, conforme descrito na secção na sessão metodológica. Foi verificado no estudo de estabilidade, dentre os corantes representativos, apenas o C10 apresenta sensibilidade química à variação do pH do meio, pelo que a sua cinética foi realizada tanto em zona alcalina forte (pH

11,0) como em zona ácida forte (pH 3,0) para posterior comparação em termos de otimização do processo de remoção. Os desempenhos de remoção de CB para C1, C7, C8 e C10 são apresentados na Figura 8.

**Figura 8.** (a) Remoção de C1, (b) C7, (c) C8 e (d) C10 por CB em um processo de adsorção de 24h



Fonte: Autor (2024).

As Figuras 8(a) e (b) mostram que não houve afinidade química entre os C1 e C7 e a CB para promover o tratamento hipotético das águas residuais. A percentagem de remoção não atingiu a escala de 3,0% e por isso suas isotermas de adsorção foram desconsideradas. Os valores oscilaram nos períodos iniciais, sem comportamento definido, o que indica os

mecanismos de adsorção e dessorção simultâneos na superfície da CB, o que ilustra a baixa eficiência da membrana como agente purificador. Na Figura 8(c) é visível que o C8 teve melhor interação com a CB e não demonstrou um padrão de libertação igual ao observado nos outros dois corantes. Até a completa saturação da quantidade de CB, 16,61% do corante C8 foi retirado do sistema. Quando a CB foi empregada nos corantes ftalocianinas (C9-C10), observou-se o melhor desempenho de remoção. Em meio ácido foi observado uma eficácia de adsorção mais acentuada (43,09%) em comparação com o ensaio realizado em solução alcalina (33,17%). A remoção foi potencializada em 9,92% quando o sistema foi submetido a zonas ácidas, o que foi classificado como uma otimização dos métodos para esta classe de corante. Outros pesquisadores também apontaram uma boa afinidade entre a CB e os pigmentos de ftalocianina em meio ácido (Aydin *et al.*, 2022). As isotermas de adsorção para os sistemas C8, C10<sub>(ácido)</sub> e C10<sub>(básico)</sub> são vistas na Tabela 4.

**Tabela 4.** Cinética de adsorção de corantes na membrana de CB

Corante	Ajuste exponencial	Cinética (pseudo primeira ordem)			Cinética (pseudo segunda ordem)		
		q <sub>e</sub> (mg g <sup>-1</sup> )	K <sub>1</sub> (min <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	q <sub>e</sub> (mg g <sup>-1</sup> )	K <sub>2</sub> (min <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
C8	$y = 15,56 - 15,27E^{-x/1,136}$ [R <sup>2</sup> = 0,9559]	0,1569	0,9002	0,9655	0,1695	8,3786	0,9922
C10 <sub>ácido</sub>	$y = 39,56 - 39,57E^{-x/0,633}$ [R <sup>2</sup> = 0,9780]	0,0725	1,5767	0,9626	0,0743	61,2540	0,9876
C10 <sub>básico</sub>	$y = 31,79 - 32,88E^{-x/1,138}$ [R <sup>2</sup> = 0,9513]	0,0872	0,2054	0,9113	0,1092	1,8093	0,9558

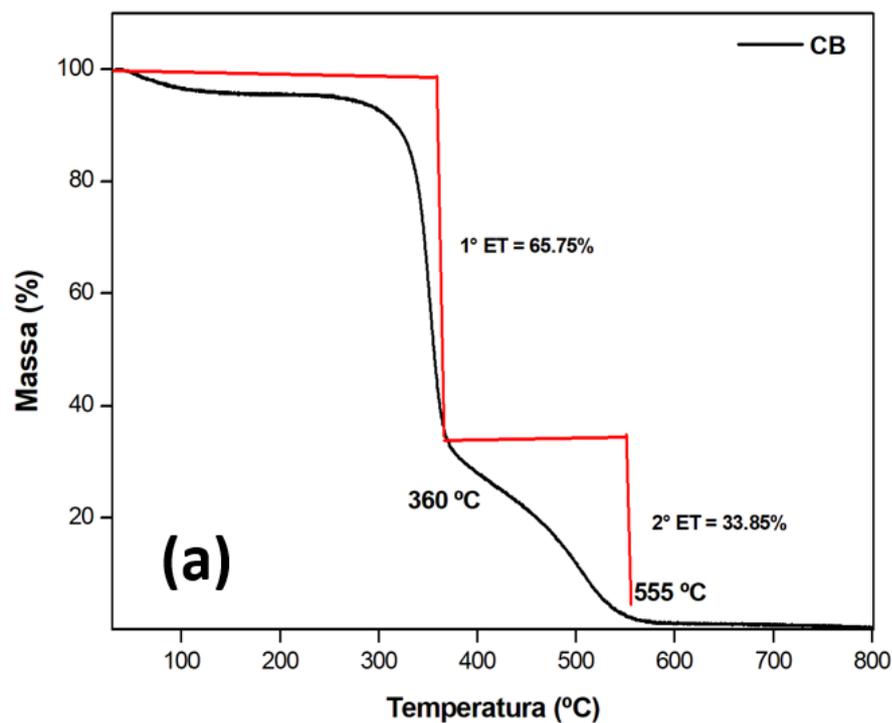
A importância do controle de pH é descrita em outros trabalhos como na adsorção semelhante de íons prata na quitina, onde maiores taxas de adsorção em pH 3 foram observados devido à natureza eletrostática do corante, que permite a interação com o solvente no meio ácido resfriado (Longhinotti *et al.*, 1998). Um ponto característico observado é que o baixo pH

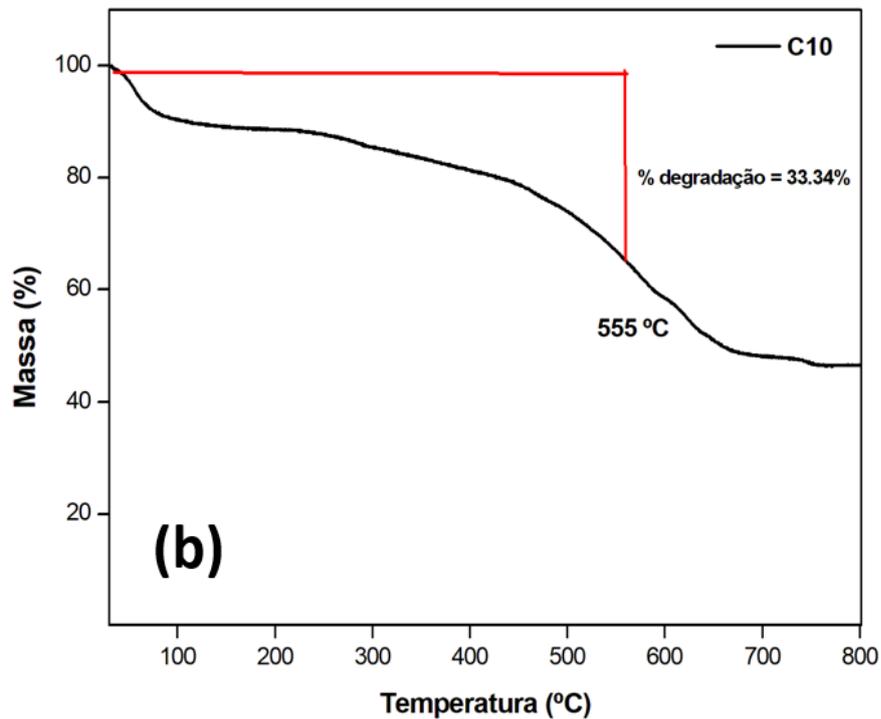
promove o aparecimento de cargas positivas na superfície do adsorvente, o que possibilita um aumento na capacidade de adsorção para o corante analisado, pois o composto é aniônico (Mall *et al.*, 2006).

### 5.5 Caracterização térmica da CB e corantes

Tanto a CB como o C10 foram submetidos à avaliações térmicas para compreender a estabilidade de degradação e propor um processo de recuperação de corantes para as águas residuais têxteis. A razão para a seleção do C10 como modelo inicial baseou-se na sua melhor taxa de adsorção na abordagem de tratamento com a CB. Os termogramas da CB e C10 são ilustrados na Figura 9.

**Figura 9.** (a) Termograma de CB. (b) Termograma de C10





Fonte: Autor (2024).

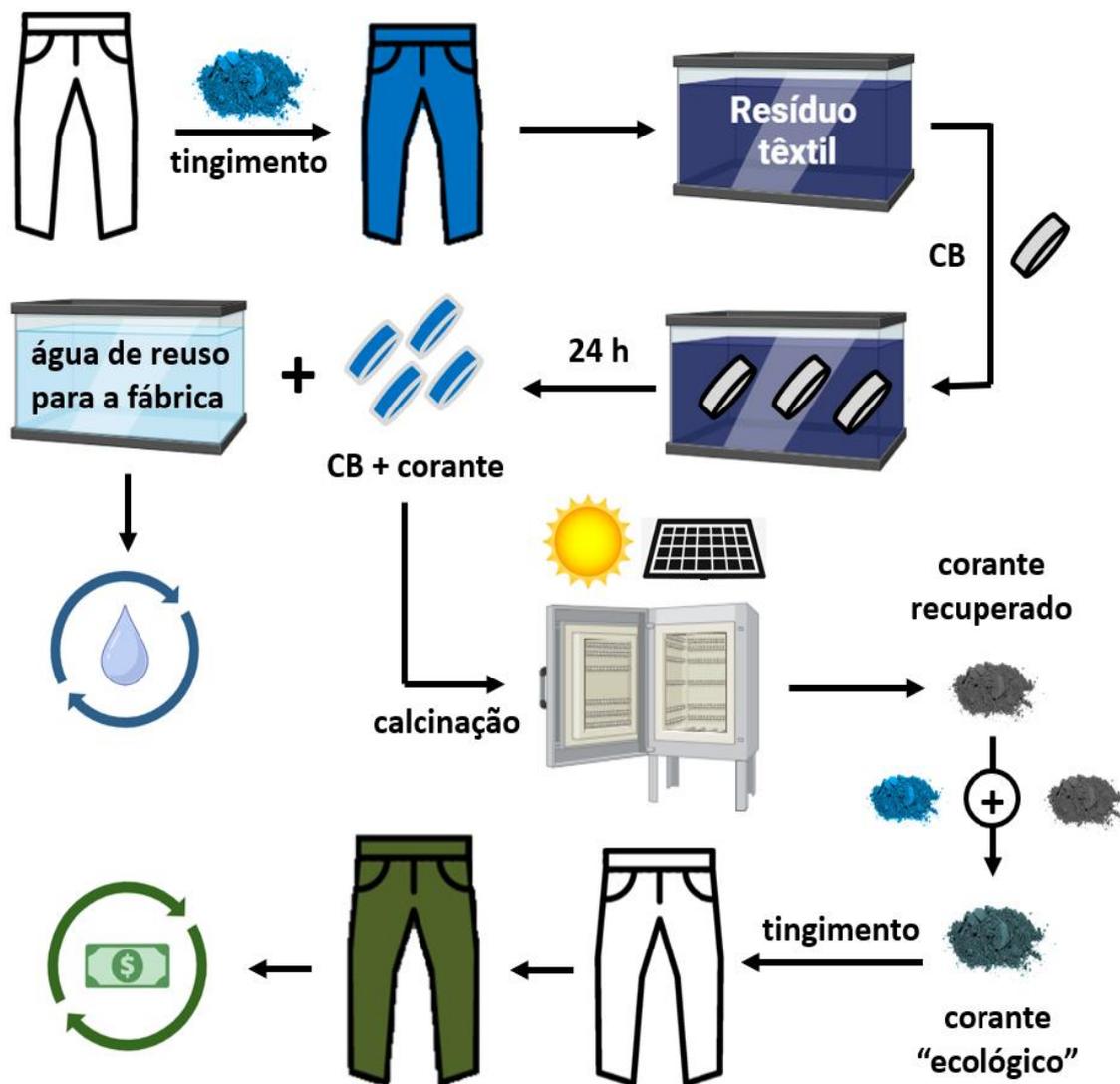
A Figura 9(a) ilustra o comportamento térmico da CB, onde se destacam dois eventos térmicos principais (ET) relacionados com a degradação quase completa do polissacárido à  $T > 500$  °C (De Jesus *et al.*, 2019). Como visto na Figura 9(a) a CB começa a sofrer degradação à 360 °C, e perde 65,75% de massa, sendo totalmente consumido na temperatura de 555 °C. Ao comparar o ponto de degradação da CB com o C10 na Figura 9(b), essa mesma temperatura estabelecida para a CB representou uma perda de massa de 33,34% em massa de C10. Esse perfil demonstra que o corante têxtil, devido à estabilidade do grupo porfirina, é mais estável termicamente (Zhu *et al.*, 2022), do que o bioadsorvente, e possivelmente poderia ser recuperado após um processo de secagem, seguido de calcinação em faixas superiores a 555 °C.

### 5.6 Proposta para processo térmico de recuperação de corantes têxteis utilizando a CB

Através de pesquisas e desenvolvimento de novos métodos economicamente viáveis e ambientalmente legais, o forno acoplado a energia solar, poderia ser inserido após etapa de remoção de corantes têxteis por CB. O sistema "CB + corante" seria seco e calcinado no forno

solar a pelo menos 555 °C para degradar toda a CB e recuperar o pigmento quantitativamente e aplicá-lo no processo de coloração em uma proporção percentual específica com o próprio pigmento novo (Figura 10).

**Figura 10.** Esquema proposto para recuperação de corantes têxteis utilizando CB e forno acoplado à energia solar



Fonte: Autor (2024).

Assim, destaca-se a possibilidade de após etapa de remoção de corantes pelas características do adsorvente CB, tendo em conta o enorme volume diário de águas residuais e lodo produzidas

pela indústria têxtil, será possível recuperar uma quantidade expressiva de corante a partir do uso de energia limpa e renovável, com forno solares, podendo tornar o processo de tingimento mais barato e reduzir a liberação de metais potencialmente tóxicos no meio ambiente.

### **5.7 Perspectiva para forno acoplado a energia solar**

O Sol é uma fonte de energia renovável e o aproveitamento desta energia como fonte de calor, é uma das alternativas energéticas mais promissoras no novo milênio (Sarmiento, 2015). *Gonçalves et al.* (2013), elenca alguns benefícios na utilização do forno solar como: conservação de combustíveis convencionais como lenha e de consequência, a preservação do ecossistema. A tendência atual aponta que, provavelmente, na segunda década deste século, o consumo de energia nos países desenvolvidos seja ultrapassado pelo consumo nos países em desenvolvimento em virtude da melhoria dos parâmetros socioeconômicos nesses países (Pereira *et al.*, 2006).

Na figura 11 tem-se um projeto de uma planta a fins de ilustração, em uma indústria têxtil fictícia que instalou energia solar e acoplou em fornos a fim de reintroduzir o corante recuperado no comércio. O setor denominado “Tanque de Adsorção” apresenta 4 reservatórios com determinado volume de águas de efluente tratado por método convencional, nesses reservatórios serão inseridos determinada massa de CB por 24h, após essa etapa a CB é transferida para a seção denominada “Forno Solar” para o processo térmico e obtenção do subcorante. Parte desse subcorante ecológico poderá ser incorporado no corante original e após o estudo das cores na seção denominada “Laboratório”, poderá ser reinserido na cadeia têxtil para venda e alcance de consumidores e expansão do seu mercado de comercialização através da sustentabilidade e boas práticas ambientais no processamento, pois o corante adquirido será parte ecológico e realizado por processos que mitigam a poluição e contaminação ambiental.

**Figura 11-** Planta ilustrativa de uma indústria têxtil, no processo de reutilização do corante



Fonte: Autor (2024).

Através de pesquisas científicas e estudos bibliográficos referente ao tema de impactos ambientais causados pela indústria têxtil, foi desenvolvido um experimento em laboratório que visou remover do efluente industrial a cor e os metais pesados pós-tratamento de efluentes convencional, através de adsorção por CB em um processo térmico que deve chegar aos 555°C, para que essa perspectiva possa dar continuidade na própria indústria têxtil, foi pensado na sustentabilidade, na mitigação de impactos ambientais, mas também na economia para que o projeto seja viável, através dos fornos acoplados a energia solar que atinjam essa temperatura e recupere os corantes do efluente têxtil, tendo a possibilidade de após processo térmico, reinserir na cadeia de produção, como um subcorante feito de forma ecológica. Muitas lavanderias estão interessadas em obter o selo verde que atesta que estão adequadas à regularização ambiental, para manter sua importância, e conquistar novos mercados, logo essa estratégia visa alcançar essas empresas.

## 6- CONCLUSÕES

Entre todos os tipos de tratamento de águas residuais, a abordagem combinada bio-físico-química tem sido uma ótima metodologia para resíduos têxteis em grande escala. Neste trabalho, foi sintetizada com sucesso uma membrana de CB produzida à base de glicerol, demonstrando ser um processo barato, atóxico, reprodutível e versátil para remoção eficiente da cor e metais pesados dos efluentes.

Visando assim, a recuperação dos corantes que seriam estocados no lodo têxtil e posteriormente lixiviados nos aterros, contribuindo para contaminação de corpos hídricos e do solo. Como observado pelas análises, o uso de CB permitiu uma boa taxa de sucesso na absorção para ftalocianinas em comparação com corantes antraquinona e azo. A avaliação térmica do sistema "CB + corante" forneceu uma perspectiva de um processo de recuperação para obter parte do pigmento dissolvido no efluente.

Esta evidência serviu com base no projeto de uma tecnologia reciclável para tornar o processo industrial de tingimento de roupa mais barato e reduzir consideravelmente a emissão de poluentes tóxicos para o meio ambiente, além de trazer uma proposta para processo térmico de recuperação de corantes têxteis utilizando a CB através de calcinação em forno solar, pois ao investir em tecnologias de energias renováveis, as indústrias não apenas economizam custos operacionais, mas também são direcionadas para a preservação do meio ambiente, garantindo um futuro mais limpo e verde para as gerações futuras.

## REFERÊNCIAS

ABIT - Associação Brasileira Da Indústria Têxtil E De Confecção. Perfil do Setor: Dados gerais do setor atualizados em 2024, referentes ao ano de 2023 (estimativa). Disponível em: <<https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>> Acesso em: 06-04-2024.

ABRELPE - Associação das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022. Disponível em: < <https://abrelpe.org.br/panorama/>> Acesso em: 06-04-2024.

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 10004: 2004. Resíduos Sólidos - classificação, Rio de Janeiro, 2004.

Aggarwal, A.; Bhatt, M. Wilson disease. *Curr. Opin. Neurol.* **2020**, *33*, 534. <https://doi.org/10.1097/WCO.0000000000000837>  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32657896>.

Ahmad, M.A., Ahmed, N.B., Adegoke, K.A., *et al.*, “Sorption studies of methyl red dye removal using lemon grass (*Cymbopogon citratus*)”, *Chemical Data Collections*, v. 22, pp. 100249, Ago. 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cdc.2019.100249>.

Ahmed, M. A.; Mohamed, A. A. A systematic review of layered double hydroxide-based materials for environmental remediation of heavy metals and dye pollutants. *Inorg. Chem. Commun.* **2023**, *148*, 110325. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.110325>.

Akash, MSH, Rehman, K. (2020). Espectroscopia ultravioleta-visível (UV-VIS). Em: Fundamentos da análise farmacêutica. Springer, Cingapura. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-1547-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-15-1547-7_3)

Andrade, F.K.; Pertile, R.N.; Dourado, F.; Gama, F.M., Bacterial cellulose: properties, production, and applications. Editors: A. Lejeune, T. Deprez. *Nova Science. Publishers.* 2010, 427-458. Available at: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/57017>.

Antero, S. A. Articulação de políticas públicas a partir dos fóruns de competitividade setoriais: a experiência recente da cadeia produtiva têxtil e de confecções. *Revista de Administração de Empresas*. v. 40, p. 57-80, 2006.

Araujo, W. C.; Fontana, M. E. Proposta de estruturação do problema da destinação dos efluentes do polo têxtil de Pernambuco. XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Porto de Galinhas – PE, agosto, 2015.

Atav, R.; Çağman, F. N.; Şahin, H.; Çolakoğlu, Ö. Determination of Color Removal and Fading Performance of Environmentally Friendly Chemical Alternatives to Hydrosulfite in Reactive Dyed Cotton Knitted Fabrics Depending on Dye Chromophore. *J. Nat. Fibers* **2022**, *19*, 15882. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2135667>.

Ávila, L. V.; Madruga, L. R. R. G.; Rocha, A. C.; Camargo, C. R. Análise das estratégias de gestão ambiental em empresas do setor industrial. *Revista Capital Científico - Eletrônica*, v. 11, n. 1, p. 1-16, 2013.

Aydın, N.; Cıfci, D. I.; Gunes, E.; Gunes, Y.; Atav, R. Decolorization potential of reactive dyes by using galvanising industry's waste (aluminum hydroxide sludge) depending on dye chromophore. *J. Text. Inst.* **2022**, *0*, 1. <https://doi.org/10.1080/00405000.2022.2124614>.

Bafrooei, F. K.; Khalili, H.; Safi, M. A new approach for color matching of fluorescent dyes in binary mixture. *Indian J. Fibre Text. Res.* **2018**, *43*, 112.

BRASIL. **Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências.. Brasília, DF: Presidência da República, [1998] Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9605.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9605.htm).> Acesso em: 20 Jan. 2024.

Bilińska, L.; Gmurek, M. Novel trends in AOPs for textile wastewater treatment. Enhanced dye by-products removal by catalytic and synergistic actions. *Water Resour. Ind.* **2021**, *26*, <https://doi.org/10.1016/j.wri.2021.100160>.

Benkhaya, S.; M'rabet, S.; El Harfi, A. A review on classifications, recent synthesis and applications of textile dyes. *Inorg. Chem. Commun.* **2020**, *115*, 107891. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2020.107891>.

Berzina, A. N.; Berzina, A. P.; Gimón, V. O. Paleozoic-mesozoic porphyry Cu(Mo) and Mo(Cu) deposits within the southern margin of the Siberian craton: Geochemistry, geochronology, and petrogenesis (a review). *Minerals* **2016**, *6*, 1. <https://doi.org/10.3390/min6040125>.

Campano, C. Enhancement of the fermentation process and properties of bacterial cellulose: a review. *Cellulose*, v.23, p.57–91, 2016. DOI: 10.1007/s10570-015-08020.

CARUARU - Prefeitura Municipal de Caruaru. **Lei complementar nº 5.058, de 25 de novembro de 2010**. Dispõe sobre o licenciamento, as infrações ambientais, no Município de Caruaru e dá outras providências. Caruaru, PE: Poder Executivo [2010]. Disponível em: <[http://caruaru.alfaconsultoria.digital/wp-content/uploads/2018/04/URB\\_\\_LEI\\_5058\\_\\_CONSOLIDADA\\_2011-1-1.pdf](http://caruaru.alfaconsultoria.digital/wp-content/uploads/2018/04/URB__LEI_5058__CONSOLIDADA_2011-1-1.pdf)>. Acesso em: 21 Jan. 2024.

Cozalto, Marina. **USP Central Multiusuário de Análises Ambientais**, 2023. Fundamentos de espectrometria de emissão óptica com plasmas indutivamente acoplado (ICP OES). Disponível em: <<https://cmaa.esalq.usp.br/fundamentos-icp-oes/>>. Acesso em: 18, Maio de 2024.

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Revoga a Resolução nº 020, de 18 de jun. de 1986. 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. Publicada no D.O.F, n. 53, 18 mar. 2005. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>>. Acesso em: 20 Jan. 2024.

Da Costa, H. C.; Pereira, S. D. F. P.; Santos, L. P.; De Oliveira, A. F. S.; E Silva, T. D. M.; E Silva, C. S.; Rocha, R. M.; Freitas, K. H. G.; Santos, D. C. Dos; Cruz, E. S. Chemometrics Applied in the Development of a Water Quality Indicator System for the Brazilian Amazon. *ACS Omega* **2020**, *5*, 32899. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03430>.

De Jesus, L. C. C.; Da Luz, S. M.; Leão, R. M.; Zattera, A. J.; Amico, S. C. Thermal properties of recycled polystyrene composite reinforced with cellulose from sugarcane bagasse |

Comportamento térmico de compósitos de poliestireno reciclado reforçado com celulose de bagaço de cana. *Rev. Mater.* **2019**, *24*.

Dehnavi, E.; Shams-Nateri, A.; Khalili, H. Wool dyeing with binary mixture of natural dyes. *Pigment Resin Technol.* **2016**, *45*, 52. <https://doi.org/10.1108/PRT-06-2014-0045>.

Deng, Y.; Ye, D.; Guo, Y.; Zhou, G.; Jiang, H. Multi-Chromophore Dyes for Improving Light Stability of Electro-Fluidic Displays. *Front. Phys.* **2021**, *9*, 1. <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.737205>.

Donini, Í.A.N.; Salvi, D.T.B. de; Fukumoto, F.K.; Lustri, W.R.; Barud, H.S.; Marchetto, R.; Messaddeq, Y.; Ribeiro, S.J.L. Biosynthesis and recent advances in bacterial cellulose production. *Chemical Ecclesia.* 2010, *35*, 165. Available at: <https://revista.iq.unesp.br/ojs/index.php/ecletica/article/view/244>.

El Aggadi, S.; El Hourch, A. Removal of reactive blue 21 (RB21) phthalocyanine dye from aqueous solution by adsorption process: A review. *Polish J. Environ. Stud.* **2021**, *30*, 3425. <https://doi.org/10.15244/pjoes/127384>.

El Aggadi, S.; Kaichouh, G.; El Abbassi, Z.; Cherkaoui, O.; Mohammed, F.; El Hourch, A. Anodic oxidation of a water-soluble copper phthalocyanine dye with different operating parameters. *Mater. Today Proc.* **2021**, *45*, 7278. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1006>.

Furlan, F.L. Use of agricultural and agroindustrial residues as alternative adsorbents of manganese and iron in aqueous solution. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v.13, p.1, 2018. DOI: 10.4136/ambiagua.2181.

Filho, O. de A. V.; Morais, M. B.; De Almeida Vasconcelos, M. C. B. Culturalismo e subjetividade das relações de trabalho : uma análise de sua precarização na produção têxtil do agreste pernambucano. *Rev. Científica Disruptiva* **2019**, *1*, 113.

GONÇALVES, N. N.; SILVA, R. S.; ANDRADE, R. N.; SIQUEIRA, B. M. M.; RUY, R. B. Construção de fornos solares: uma atitude sustentável para erradicação da pobreza. *Revista Eletrônica Debates em Educação Científica e Tecnológicas.* 2013, v. 03. n° 1. 88-94.

Guaratani, C. I.; Oliveira, M. V. B. Corantes têxteis, **Química Nova**, V. 23, p71, 2000.

Güneş, Y.; Atav, R.; Namırtı, O. Effectiveness of ozone in decolorization of reactive dye effluents depending on the dye chromophore. *Text. Res. J.* **2012**, 82, 994. <https://doi.org/10.1177/0040517511429611>.

Ho Jin, Y.; Lee, T.; Kim, J. R.; Choi, Y. E.; Park, C. Improved production of bacterial cellulose from waste glycerol through investigation of inhibitory effects of crude glycerol-derived compounds by *Gluconacetobacter xylinus*. *J. Ind. Eng. Chem.* **2019**, 75, 158. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.03.017>.

Iguchi, M.; Yamanaka, S.; Budhiono, A. Bacterial cellulose - a masterpiece of nature. *J. Mater. Sci.* 2000, 35, 261-270. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1004775229149>.

İlgün, C.; Sevim, A. M.; Çakar, S.; Özacar, M.; Gül, A. Novel Co and Zn-Phthalocyanine dyes with octa-carboxylic acid substituents for DSSCs. *Sol. Energy* **2021**, 218, 169. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.02.042>.

Kant, R. Textile dyeing industry an environmental hazard. *Nat. Sci.* **2012**, 04, 22. <https://doi.org/10.4236/ns.2012.41004>.

Keshk, S. M. A. S. Vitamin C enhances bacterial cellulose production in *Gluconacetobacter xylinus*. *Carbohydr. Polym.* **2014**, 99, 98. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.08.060> <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24274484>.

Kim, K. R.; Ng, F.; Zhou, J.; Hu, J. Pigment mixing effect realized with pre-dyed opaque yarns for Jacquard textile design development. *Text. Res. J.* **2019**, 89, 87. <https://doi.org/10.1177/0040517517741153>.

Kim, S.C. Application of response surface method as an experimental design to optimize coagulation–flocculation process for pre-treating paper wastewater. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 38, p. 93-102, 2016.

Klemm, D.; Kramer, F.; Moritz, S.; Lindström, T.; Ankerfors, M.; Gray, D.; Dorris, A. Nanocelluloses: A new family of nature-based materials. *Angewandte Chemie International Edition*. 2011, 50, 5438-5466. Available at: <http://static.sites.sbq.org.br/quimicanova.sbq.org.br/pdf/AR2019-0497.pdf>.

Kunz, A.; Peralta-Zamora, P.; Moraes, S. G.; Durán, N. Novas tendências no tratamento de Efluentes têxteis. *Química Nova*, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 78-82, jan. /fev. 2002.

Kuo, C.H. Utilization of acetate buffer to improve bacterial cellulose production by *Gluconacetobacter xylinus*. *Food Hydrocolloids*, v.53, p.98–103, 2016. DOI:10.1016/j.foodhyd.2014.12.034.

Latif, H. H. Gopalakrishnan, B. Nimbarte, A. Currie, K., 2017. **Sustainability index development for manufacturing industry**. *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 24, pp. 82-95.

Leeper, S.; Abdel-Karim, A.; Gad-Allah, T. A.; Gorgojo, P. Air-gap membrane distillation as a one-step process for textile wastewater treatment. *Chem. Eng. J.* **2019**, 360, 1330. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.209>.

Lins, L. S. G.; Silva, W. E.; Belian, M. F.; Calazans, G. M. T. Use of biodiesel waste for efficient production of cellulosic membranes: A “green” proposal for filter preparation. *Cellul. Chem. Technol.* **2019**, 53, 417. <https://doi.org/10.35812/CelluloseChemTechnol.2019.53.42>.

Lira, Elizabete Buonora de Souza. Monitoramento geoquímico e ambiental da qualidade dos sedimentos no Rio Ipojuca no Polo Têxtil do Agreste de Pernambuco-Brasil. Recife. 54 p. 2019.

Longhinotti, E.; Pozza, F.; Furlan, L.; Sanchez, M. D. N. D. M.; Klug, M.; Laranjeira, M. C. M.; Fávere, V. T. Adsorption of anionic dyes on the biopolymer chitin. *J. Braz. Chem. Soc.* **1998**, 9, 435. <https://doi.org/10.1590/S0103-50531998000500005>.

Lu, M.; Su, M.; Liu, N.; Zhang, J. Effects of environmental salinity on the immune response of the coastal fish *Scatophagus argus* during bacterial infection. *Fish Shellfish Immunol.* **2022**, 124, 401. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2022.04.029>  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/35472400>.

Lubes, G.; Goodarzi, M. Analysis of Volatile Compounds by Advanced Analytical Techniques and Multivariate Chemometrics. *Chem. Rev.* **2017**, *117*, 6399. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00698>  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28306239>.

Mall, I. D.; Srivastava, V. C.; Agarwal, N. K. Removal of Orange-G and Methyl Violet dyes by adsorption onto bagasse fly ash - Kinetic study and equilibrium isotherm analyses. *Dye. Pigment.* **2006**, *69*, 210. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2005.03.013>.

Marina Colzato. Fundamentos de espectrometria de emissão óptica com plasmas indutivamente acoplado (ICP OES). Universidade de São Paulo, 2023. Disponível em: <<https://cmaa.esalq.usp.br/fundamentos-icp-oes/>> Acesso em: 29, Maio de 2024.

Marques, F. **Legislação para tratamento de efluentes: o que você precisa saber?** ACQUASOLUTION, 2017.

Marques, B.S., Frantz, T.S., Cadaval Junior, T.R.S., *et al.*, “Adsorption of a textile dye onto piaçava fibers: kinetic, equilibrium, thermodynamics, and application in simulated effluents”, *Environmental Science and Pollution Research International*, v. 26, n. 28, pp. 28584–28592, Oct. 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-018-3587-5>. PubMed PMID: 30377973.

Martins, G. B. C.; Sucupira, R. R.; Suarez, P. A. Z. Chemistry and colors. *Rev. Virtual Quim.* **2015**, *7*, 1508. <https://doi.org/10.5935/1984-6835.20150082>.

Milan, G. S.; Vitorazzi, C.; Reis, Z. C. A Redução de Resíduos Têxteis e de Impactos Ambientais: Um Estudo Desenvolvido em uma Indústria de Confecções do Vestuário. In: XIII SEMEAD - Seminários em Administração, 2010, São Paulo - SP. XIII SEMEAD - Seminários em Administração. São Paulo - SP: FEA/USP, 2010.

MPPE. Ministério Público Estadual de Pernambuco. Caruaru: lavanderias devem se adequar a legislação ambiental. 2015.

Disponível em: <<https://mppe.mp.br/mppe/index.php/comunicacao/noticias/ultimas-noticias-noticias/3595-caruaru-lavanderias-devem-se-adequar-a-legislacao-ambiental>> Acesso em: 21 Jan. 2024.

Muttler Toledo. Aprimore Reações Químicas com a Espectroscopia FTIR In-situ em Tempo Real Disponível em: <[https://www.mt.com/br/pt/home/applications/L1\\_AutoChe\\_Applications/ftirspectroscopy.html](https://www.mt.com/br/pt/home/applications/L1_AutoChe_Applications/ftirspectroscopy.html)>. Acesso em: 18, junho de 2023

Muthukumar, M.; Selvakumar, N. Studies on the effect of inorganic salts on decolouration of acid dye effluents by ozonation. *Dye. Pigment.* **2004**, *62*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2003.11.002>.

Oliveira de Amorim, J. rancisco; Vilar dos Prazeres, R.; Dos Santos, C. O DESENVOLVIMENTO DO APL DE CONFECÇÕES : UM ESTUDO THE DEVELOPMENT OF THE APL OF CONFECTIONS : A SOCIOECONOMIC STUDY ON AGRESTE PERNAMBUCANO. *Rev. Econ. Política Do Desenvolv.* **2017**, *3*, 39.

Oliveira, E. Espectrometria de Emissão Atômica (ICP-AES). Universidade de São Paulo, Laboratório de Espectrometria de Emissão Atômica (apostila), 1996.

Oliveira, E. C.; de Melo, J. C. P.; Ribeiro, C.; Carbohidr. Res. **2006**, 341, 2842.

Opher, T., Friedler, E., Shapira, A., 2018. Comparative life cycle sustainability assessment of urban water reuse at various centralization scales. *Int. J. Life Cycle Assess.* *23*, 1315–1330. doi:<https://doi.org/10.1007/s11367-018-1469-1>

Orrego, P.; Hernández, J.; Reyes, A. Uranium and molybdenum recovery from copper leaching solutions using ion exchange. *Hydrometallurgy* **2019**, *184*, 116. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.12.021>.

Pal, A.; Prasad, R. An overview of various mammalian models to study chronic copper intoxication associated Alzheimer's disease like pathology. *BioMetals* **2015**, *28*, 1. <https://doi.org/10.1007/s10534-014-9799-3> <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25307560>.

Pan, H., Tianren, Y., Jin, Y., Dall'erba, S., Hewings, G., 2019. Understanding heterogeneous spatial production externalities as a missing link between land-use planning and urban economic futures. *Reg. Stud.* <https://doi.org/10.1080/00343404.2019.1701186>.

Patil, A. R.; Shastri, L. A.; Tilakraj, T. S.; Inamdar, S. R.; Shastri, S. L.; Hebbar, N. U.; Pawar, V.; Sunagar, V. A. Synthesis and characterization of acid-base indicator: Exploring pH sensor,

photophysical, thermal applications and theoretical study. *J. Mol. Struct.* **2022**, *1254*, 132363. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.132363>.

Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Abreu, S. L.; Ruther, R. Atlas Brasileiro de Energia Solar. São José dos Campos: INPE, 2006.

Queiroga, G.M.; Melo, D.C.P.; Lamardo, E.Z. Desempenho de ETES de lavanderias têxteis do polo de confecções do município de Caruaru. Agreste pernambucano, que utilizam processos físico-químicos. *Revista Eletrônica do PREDEMA* v.13, n. 2, p.55-71. 2019.

Quintana-Quirino, M.; Morales-Osorio, C.; Viguera Ramírez, G.; Vázquez-Torres, H.; Shirai, K. Bacterial cellulose grows with a honeycomb geometry in a solid-state culture of *Gluconacetobacter xylinus* using polyurethane foam support. *Process Biochem.* **2019**, *82*, 1. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.04.023>.

Rahman, M.; Pudasainee, D.; Rajender Gupta, R. Review on chemical upgrading of coal: Production processes, potencial applications and recent developments. *Fuel Processing Technology*. v. 158, p. 35-56, 2017.

Rambo, M.K.D.; *et al.* Estudo de Análise Termogravimétrica de diferentes biomassas lignocelulósicas utilizando a Análise por Componentes Principais. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 37n. 3set-dez. 2015, p. 862-868.

Recouvreux. Development of New Biomaterials Based on Bacterial Cellulose for Biomedical and Tissue Engineering Applications. Doctoral thesis in Chemical Engineering. *Federal University of Santa Catarina*. 2008, v. Single, p. 145, 2008. Available at: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/91189>.

Rocha, R. de M.; Da Silva Júnior, L. H.; Barros, V. J. de A. INOVAÇÃO E COMPETIÇÃO : UM ESTUDO DE CASO DO ARRANJO PRODUTIVO DE CONFECÇÃO DO AGRESTE PERNAMBUCANO. *Gestão e Desenvol. em Rev.* **2015**, *1*, 50.

Santos, B. B.; Vasconcelos, V. M. Fatores socioeconômicos e demográficos associados ao trabalho informal: o caso de Toritama, Pernambuco, Brasil. *Contemp. - Rev. Sociol. da UFSCar* **2018**, *8*, 289. <https://doi.org/10.4322/2316-1329.060>.

Santos, E. J. Determinação de elementos formadores de hidretos e mercúrio em amostras ambientais e biológicas com amostragem em suspensão por geração química de vapor acoplada à espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado. **Tese de doutorado**. Florianópolis-SC, 2007.

Sarkar, S.; Banerjee, A.; Halder, U.; Biswas, R.; Bandopadhyay, R. Degradation of Synthetic Azo Dyes of Textile Industry: a Sustainable Approach Using Microbial Enzymes. *Water Conserv. Sci. Eng.* **2017**, *2*, 121. <https://doi.org/10.1007/s41101-017-0031-5>.

Sarmento, J. S. Construção e análise de um forno solar como uma atividade prática não formal no ensino de física. 2015. 76 f. [dissertation] (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática) – Universidade Federal do Ceará, Ceará. 2015.

Souza, A. M.; Poppi, R. J. **Quim. Nova.** 2012, *35*.

Schilsky, M. L. Wilson Disease: Diagnosis, Treatment, and Follow-up. *Clin. Liver Dis.* **2017**, *21*, 755. <https://doi.org/10.1016/j.cld.2017.06.011>  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28987261>.

Souza, E. F.; Furtado, M. R.; Carvalho, C. W. P.; Freitas-Silva, O.; Gottschalk, L. M. F. Production and characterization of *Gluconacetobacter xylinus* bacterial cellulose using cashew apple juice and soybean molasses. *Int. J. Biol. Macromol.* **2020**, *146*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.180>  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31883899>.

Schroeder, L. H. Tratamento físico-químico por coagulação-floculação-sedimentação de efluente de indústria de celulose. Universidade Tecnológica Federal do Paraná-Curitiba, 2016.

Silva, Fábيا Martins. Utilização de Métodos Quimiométricos na Determinação de Propriedades e Aplicações de Lodo Industrial do Polo Têxtil do Agreste de Pernambuco. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife. 67p. 2018.

Silva, Rivaldo Antônio Jeronimo. MODELO DE GESTÃO AMBIENTAL PARA REÚSO DE ÁGUAS DE LAVANDERIAS DO AGRESTE DE PERNAMBUCO. 1 Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife. 128p. 2016.

Souto, Thaís Jeruzza Maciel Póvoas. Estudo do comportamento químico e ambiental de efluentes industriais e resíduos sólidos oriundos de lavanderias do polo têxtil no agreste pernambucano. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife. 58p. 2017.

Souto, Thaís Jeruzza Maciel Póvoas. proposta para reutilização de corantes da indústria têxtil através da aplicação de nanomateriais em processos adsorptivos por meio da celulose bacteriana. Tese de Doutorado. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife. 133p. 2022.

Tanveer, K.; Mahmood, M. S.; Ashraf, M.; Khan, A. Azo and Phthalocyanine Dyes Degradation by Bacteria Isolated from Textile Industrial Waste. *Pak. J. Zool.* **2022**, *54*, 2381.

Yagub, M.T., Sen, T.K., Afroze, S., *et al.*, “Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: a review”, *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 209, pp. 172–184, Jul. 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>. PubMed PMID: 24780401.

Yahya, M.; Nural, Y.; Seferoğlu, Z. Recent advances in the nonlinear optical (NLO) properties of phthalocyanines: A review. *Dye. Pigment.* **2022**, *198*, <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2021.109960>.

Zanoni, M. V. B.; Yanamaka, H. *Corantes: Caracterização química, toxicológica, métodos de detecção e tratamento* 2016.

Zeng, X.; Zhang, G.; Wen, J.; Li, X.; Zhu, J.; Wu, Z. Simultaneous removal of aqueous same ionic type heavy metals and dyes by a magnetic chitosan/polyethyleneimine embedded hydrophobic sodium alginate composite: Performance, interaction and mechanism. *Chemosphere* **2023**, *318*, 137869. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137869> <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/36720414>.

Zhang, M. L. Z. Roles of magnetic particles in magnetic seeding coagulation-flocculation process for surface water treatment. Elsevier, v. 212, p. 337-343, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.11.011>. Acesso em: 10 Maio. 2024.

Zhang, H.; Yang, H.; Xie, K.; Hou, A.; Gao, A. Novel reactive dyes with intramolecular color matching combination containing different chromophores. *Dye. Pigment.* **2018**, *159*, 576. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2018.07.031>.

Zhu, S. E.; Yang, W. J.; Zhou, Y.; Pan, W. H.; Wei, C. X.; Yuen, A. C. Y.; Chen, T. B. Y.; Yeoh, G. H.; Lu, H. D.; Yang, W. Synthesis of zinc porphyrin complex for improving mechanical, UV-resistance, thermal stability and fire safety properties of polystyrene. *Chem. Eng. J.* **2022**, *442*, 136367. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136367>.