

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

HINGRID GOMES REETZ

PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA FOLHA DO *PINUS ELLIOTTII* E AVALIAÇÃO DO SEU POTENCIAL EM ADSORVER CORANTES SINTÉTICOS

**Bagé
2024**

HINGRID GOMES REETZ

PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA FOLHA DO *PINUS ELLIOTTII* E AVALIAÇÃO DO SEU POTENCIAL EM ADSORVER CORANTES SINTÉTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia química.

Orientadora: Tânia Regina de Souza

Coorientador: André Ricardo Felkl de Almeida

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

R329p Reetz, Hingrid Gomes

Produção de carvão ativado a partir da folha do *Pinus elliottii* e avaliação do seu potencial em adsorver corantes sintéticos / Hingrid Gomes Reetz.

54 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA QUÍMICA, 2024.

"Orientação: Tânia Regina de Souza".

1. Adsorção. 2. Corantes. 3. Cinética. 4. Resíduos agrícolas. 5. *Pinus elliottii*. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

HINGRID GOMES REETZ

PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA FOLHA DO PINUS ELLIOTTII E AVALIAÇÃO DO SEU POTENCIAL EM ADSORVER CORANTES SINTÉTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Química.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 17 de dezembro de 2024.

Banca examinadora:

Prof^a. Dr^a. Tânia Regina de Souza

Orientadora

UNIPAMPA

Prof. Dr. André Ricardo Felkl de Almeida

Coorientador

UNIPAMPA

Prof. Dr. Gabriel Henrique Justi

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **ANDRE RICARDO FELKL DE ALMEIDA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/12/2024, às 10:37, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **GABRIEL HENRIQUE JUSTI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/12/2024, às 17:08, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **TANIA REGINA DE SOUZA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/12/2024, às 19:12, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1635486** e o código CRC **5EA69C38**.

Referência: Processo nº 23100.023111/2024-47 SEI nº 1635486.

Dedico este trabalho, com todo o meu amor e gratidão, ao meu avô Carlos Maria Pintos Gomes (*in memoriam*), que mesmo não sendo fisicamente, constantemente se faz presente em minha vida e sempre foi um exemplo de caráter e bondade.

AGRADECIMENTO

Primeiramente, agradeço a Deus acima de tudo, por ter me proporcionado todas as oportunidades que tive ao longo da minha trajetória e por sempre me abençoar com conquistas melhores das quais almejo. Muitos foram os momentos de dificuldades, mas Deus é fiel e garante a vitória para quem o serve.

Ao amor da minha vida, meu filho Antônio Carlos, que mesmo sem saber, muito me incentivou nessa caminhada e me deu forças para perseverar. Eu espero que o futuro o recompense por toda a minha ausência durante essa trajetória.

A minha mãe Alondra Carina, pela dedicação de uma vida inteira, por ter me dado condições para que eu pudesse estudar e por sempre ter acreditado em mim e no meu potencial, até mesmo quando eu não acreditei, e feito com que o meu sonho se tornasse o sonho dela também.

Ao meu pai, Edene Carlos, por apoiar minhas escolhas, torcer pelo meu sucesso e por também ter me dado condições para que eu pudesse estudar.

Aos professores do curso de engenharia química pelos ensinamentos transmitidos ao longo da graduação e pelos conselhos que serviram para o meu aprendizado.

E por fim, à professora orientadora Tânia Regina e ao professor André, pela paciência e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

“Eu tentei 99 vezes e falhei, mas na centésima tentativa eu consegui, nunca desista de seus objetivos mesmo que esses pareçam impossíveis, a próxima tentativa pode ser a vitoriosa”.

Albert Einstein

RESUMO

O *Pinus elliottii* é uma planta arbórea que gera uma quantidade significativa de resíduos após a colheita, na forma de cascas, folhas e galhos. Esses resíduos têm o potencial de ser utilizados como matéria-prima na produção de carvão ativado, podendo ser empregado no tratamento de efluentes têxteis. Nesse contexto, o presente trabalho apresentou a produção de um carvão ativado obtido a partir da folha do *Pinus elliottii*, que foi empregado na adsorção de corantes sintéticos. A folha do *Pinus elliottii* recebeu tratamento químico por meio da impregnação com ácido fosfórico (H_3PO_4) e o carvão foi produzido através de pirólise da folha impregnada sob atmosfera inerte de nitrogênio a uma temperatura de $500^\circ C$. O adsorvente produzido foi caracterizado e utilizado em ensaios para avaliar seu potencial de adsorção dos corantes sintéticos Azul de Metileno (AM) e o Verde Malaquita (VM) em solução. A caracterização do material adsorvente mostrou um diâmetro de partícula de $151,21\mu m$, massa específica de $1717,5kg/m^3$, área superficial de $27,13m^2/g$, porosidade do leito de 0,87 e teor de umidade de 1%. As análises de TGA e DRX demonstraram que a aplicação de tratamento ácido à matéria-prima e ao adsorvente ocasionou a degradação da celulose. As imagens de microscopia revelaram que o adsorvente possui superfície rugosa e uma grande variedade de tamanhos e formatos quanto a estrutura dos poros. Os processos de adsorção para os corantes estudados mostraram eficiências elevadas para remoção de corantes com o carvão produzido, sendo 99,95% para o AM e 99,97% para o VM, esses resultados assemelham-se a eficiência obtida pelo carvão ativado comercial que foi de 99,93% para o AM e 99,98% para o VM. O equilíbrio de adsorção para o AM utilizando o carvão ativado de *Pinus* foi alcançado em 15min, enquanto para o carvão ativado comercial o equilíbrio foi atingido em 5min. Para o corante VM o equilíbrio foi alcançado em 5min para os dois carvões. Essa adsorção rápida e eficiente indica um processo altamente convectivo de adsorção. O modelo que melhor se ajustou à cinética de adsorção para ambos os corantes, utilizando o carvão ativado de *Pinus* foi o modelo de pseudo segunda ordem e para o carvão ativado comercial foi o de pseudo primeira ordem. Com base nos estudos realizados, pode-se afirmar que as folhas do *Pinus elliottii* apresentaram resultados satisfatórios quanto ao seu emprego para a produção de carvão ativado.

Palavras-chaves: Adsorção; Corantes; Cinética; Resíduos Agrícolas; *Pinus elliottii*.

ABSTRACT

Pinus elliottii is a tree that generates a significant amount of waste after harvesting, in the form of bark, leaves and branches. These residues have the potential to be used as raw material in the production of activated carbon, which can be used in the treatment of textile effluents. In this context, this work presented the production of an activated carbon obtained from *Pinus elliottii* leaves, which was used in the adsorption of synthetic dyes. The *Pinus elliottii* leaf received chemical treatment by impregnation with phosphoric acid (H_3PO_4) and the carbon was produced through pyrolysis of the impregnated leaf under an inert nitrogen atmosphere at a temperature of 500°C. The adsorbent produced was characterized and used in tests to evaluate its adsorption potential of the synthetic dyes Methylene Blue (AM) and Malachite Green (VM) in solution. The characterization of the adsorbent material showed a particle diameter of 151.21 μm , specific mass of 1717.5 kg/m^3 , surface area of 27.13 m^2/g , bed porosity of 0.87 and moisture content of 1%. TGA and XRD analyses revealed that the application of acid treatment to the raw material and the adsorbent caused degradation of the cellulose. The microscopy images revealed that the adsorbent has a rough surface and a wide variety of sizes and shapes regarding the pore structure. The adsorption processes for the dyes studied showed high efficiencies for dye removal with the produced carbon, being 99.95% for AM and 99.97% for VM. These results are similar to the efficiency obtained by commercial activated carbon, which was 99.93% for AM and 99.98% for VM. The adsorption equilibrium for AM using activated carbon from *Pinus* was reached in 15 min, while for commercial activated carbon the equilibrium was reached in 5 min. For the dye VM the equilibrium was reached in 5 min for both carbons. This fast and efficient adsorption indicates a highly convective adsorption process. The model that best adjusted the adsorption kinetics for both dyes, using activated carbon from *Pinus* was the pseudo second order model and for commercial activated carbon it was the pseudo first order model. Based on the studies performed, it can be stated that *Pinus elliottii* leaves presented satisfactory results regarding their use for the production of activated carbon.

Keywords: Adsorption; Dyes; Kinetics; Agricultural residues; *Pinus elliottii*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Morfologia básica do <i>Pinus</i>	16
Figura 2 – Cadeia produtiva da madeira	17
Figura 3 – Estrutura molecular do AM, VC e VM.....	22
Figura 4 – Tipos de poros em um carvão ativado	25
Figura 5 – Etapas do processo de adsorção	27

LISTA DE QUADROS

Tabela 1 – Percentual dos resíduos da colheita florestal de Eucalyptus e Pinus....	18
Tabela 2 – Características do AM e VM.....	20
Tabela 3 – Comparação entre os métodos de tratamento de efluentes têxteis.....	23
Tabela 4 – Classificação dos poros de um adsorvente	24
Tabela 5 – Características de adsorção física e química	26
Tabela 6 – Estado da arte carvão ativado de Pinus.....	30

LISTA DE SIGLAS

ABIT – Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção

AM – Azul de metileno

ANOVA – Análise de Variância

BET – Brunauer, Emmett e Teller

CA – Carvão ativado

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DRX – Difração de raios-X

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ETA – Estações de tratamento de água

FISPQ – Ficha de segurança de produtos químicos

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

PPO – Pseudo primeira ordem

PSO – Pseudo segunda ordem

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

TGA – Análise termogravimétrica

UNIPAMPA – Fundação Universidade Federal do Pampa

UV-Vis – Ultravioleta e Visível

VM – Verde malaquita

LISTA DE SÍMBOLOS

- C – Estimativa da espessura da camada limite
- C_t – Concentração do adsorvato no tempo t
- C_o – Concentração inicial do adsorvato
- d_p – Diâmetro das partículas
- E – Eficiência de remoção
- \mathcal{E} – Porosidade do leito de partículas
- k_1 – Constante de velocidade de adsorção de pseudo primeira ordem
- k_2 – Constante de velocidade de adsorção pseudo segunda ordem
- K_{dif} – Constante de difusão intrapartícula
- m_{ad} – Massa de adsorvente
- P_p – Erro médio relativo
- q_e – Capacidade de adsorção no equilíbrio
- q_t – Capacidade de adsorção
- R^2 – Coeficiente de determinação
- t – Tempo
- U_{bu} – Teor de umidade
- V – Volume
- χ^2 – Qui-quadrado
- α – Velocidade inicial de adsorção
- β – Quantidade de sítios apropriados
- ρ_r – Massa específica real
- ρ_b – Massa específica aparente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVOS.....	12
2.1 Objetivo Geral	12
2.2 Objetivos Específicos.....	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Pinus: produção e beneficiamento.....	13
3.2 Corantes têxteis	15
3.3 Métodos de tratamento de efluente têxtil.....	19
3.4 Materiais adsorventes e o processo de adsorção.....	21
3.5 Cinética de adsorção.....	24
4 ESTADO DA ARTE.....	27
5 ARTIGO.....	28
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	46
REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

O constante aumento da população mundial trouxe conseqüentemente um aumento na quantidade de efluentes gerados pela população e pelo setor industrial. Essa geração abundante de efluentes trouxe uma grande preocupação social e ambiental principalmente por conta das substâncias contidas nesses efluentes, pois eles podem causar problemas de saúde ao ser humano e afetar o meio ambiente (SILVA, 2005).

O tratamento de efluentes é de suma importância e um dos processos mais utilizados para isso é a adsorção, que pode ser definida como a adesão de partículas de um fluido a uma superfície sólida (FERNANDES *et al.*, 2010). Há vários tipos de adsorventes, como o carvão ativado, resinas de troca iônica, adsorventes naturais, entre outros. A adsorção é considerada de desempenho superior a outras técnicas devido à possibilidade de reutilização da água após o processo de purificação e porque as espécies de contaminantes são transferidos do efluente para uma fase sólida, reduzindo o volume de descarte ao mínimo (FERNANDES *et al.*, 2010; LEITE, 2018).

Atualmente, vem sendo estudados adsorventes não convencionais, ou seja, oriundos de resíduos da agricultura, que são eficazes, de baixo custo, de baixa complexidade, além de serem uma opção de reaproveitamento (SILVA, 2005). Alguns biomateriais foram estudados como adsorventes, como a cinza da casca de arroz (KIELING, 2016), casca de café (SANTOS, 2013), escamas de peixe (SANTOS, 2009), serragem de *Pinus elliottii* (SILVA, 2005), semente de moringa (NOGUEIRA, 2010), farelo e casca de pinhão (Lima *et al.*, 2023), casca do coco verde (RAULINO, 2011), entre outros.

Nesse contexto, o intuito do presente trabalho é desenvolver um adsorvente não convencional a partir da folha do *Pinus elliottii*. O uso dessa matéria-prima se justifica porque há uma grande quantidade de folhas que se tornam resíduo após a colheita da madeira e a produção de um adsorvente a partir desse material agrega valor ao mesmo. O carvão ativado produzido será caracterizado e utilizado em ensaios para avaliar seu potencial de adsorção de corantes sintéticos em solução visando o tratamento de efluente têxtil.

2 OBJETIVOS

2.1 OBEJTIVO GERAL

Desenvolver um carvão ativado a partir das folhas do *Pinus elliottii* impregnadas com H_3PO_4 e avaliar sua capacidade de adsorver corantes sintéticos em solução, visando o tratamento de efluentes têxteis. Os corantes a serem avaliados são o azul de metileno e o verde malaquita.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Preparar soluções de azul de metileno e verde malaquita;
- Preparar as folhas do *Pinus elliottii* e as impregnar com H_3PO_4 ;
- Produzir o carvão ativado a partir da folha do *Pinus elliottii* impregnado;
- Caracterizar o material adsorvente produzido, por meio da determinação da massa específica real (ρ_r) e aparente (ρ_b), diâmetro de partícula (d_p), porosidade do leito de partícula (ϵ), teor de umidade (UBU), decomposição térmica (TGA), área superficial específica (BET) e difração de raios-X (DRX);
- Realizar o estudo da cinética de adsorção do azul de metileno e do verde malaquita, com o carvão ativado obtido e com o comercial, e ajustar os dados obtidos aos modelos cinéticos de pseudo primeira ordem, pseudo segunda ordem, difusão intrapartícula e Elovich;
- Analisar a eficiência de remoção dos corantes sintéticos;
- Verificar os melhores ajustes dos modelos através da análise do coeficiente de correlação (R^2) e qui-quadrado (X^2);
- Comparar os resultados obtidos com a literatura;
- Compilar os resultados obtidos em um artigo científico.

3 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

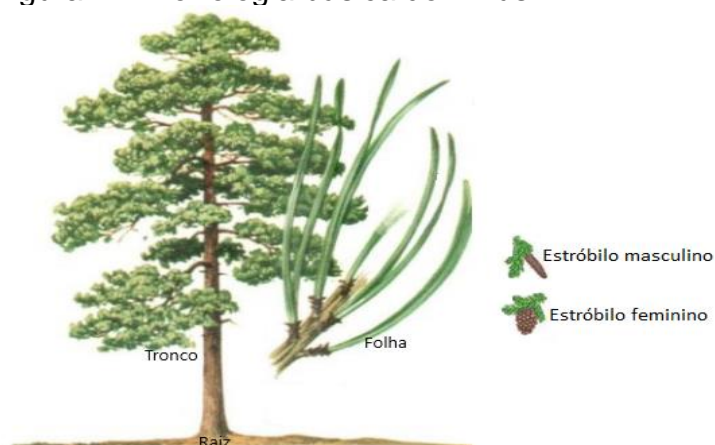
A revisão bibliográfica deste trabalho aborda temas relevantes para o embasamento teórico desse Trabalho de Conclusão de Curso.

3.1 Pinus: produção e beneficiamento

As árvores do gênero *Pinus* surgiram a 230 milhões de anos atrás, no período Triássico. Estima-se que existam mais de 120 espécies do gênero *Pinus* que ocorrem naturalmente em países do hemisfério norte como Europa, Ásia, Norte da África, Ilhas das Canárias, Filipinas, América do Norte e América Central (VALERI; DE PAULA, 2009).

A morfologia do *Pinus* basicamente é composta por raiz, caule, folha, flor e fruto. O sistema radicular é do tipo pivotante. O caule é do tipo tronco com lenho secundário. A folha, denominada como acícula, é muito fina e tem formato de agulha e possui a margem finamente serrilhada. As flores são estróbilos femininos e masculinos, que são encontrados na mesma árvore, e os frutos são as pinhas. A polinização se dá principalmente através do vento (VALERI e DE PAULA, 2009). Na Figura 1, está representada a morfologia básica de uma árvore do gênero *Pinus*.

Figura 1 – Morfologia básica do *Pinus*



Fonte: Adaptado de Valeri e De Paula (2009)

No Brasil, as espécies desse gênero foram introduzidas pelos imigrantes europeus para fins ornamentais. A partir da década de 1960 se iniciou o plantio de *Pinus* em escala comercial, principalmente nas regiões sul e sudeste do país. Nas

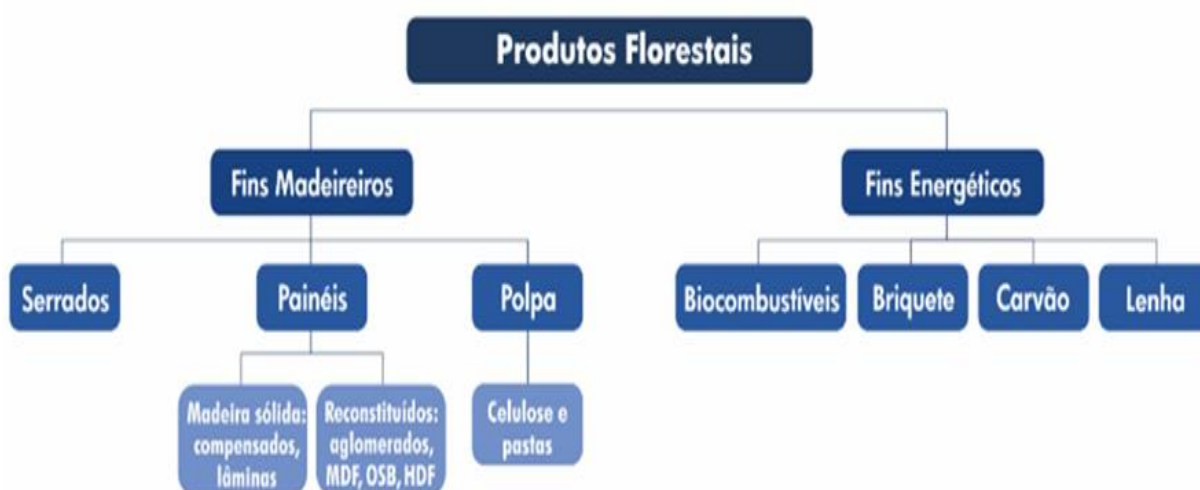
décadas de 1970 e 1980, as plantações deste gênero foram as principais fontes de matéria-prima para o desenvolvimento da indústria florestal, abastecendo um mercado altamente diversificado (EMBRAPA, 2020).

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, as espécies que melhor se adaptaram em solo brasileiro foram *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*. Outras espécies também foram plantadas no Brasil em menor escala, são elas: *Pinus caribaea*, *Pinus oocarpa*, *Pinus tecunumanii*, *Pinus maximinoi* e *Pinus patula* (EMBRAPA, 2020).

O potencial das espécies de *Pinus* no Brasil é um fator fundamental para a sustentação do parque industrial madeireiro. Atualmente, a madeira de *Pinus* representa 30% das plantações florestais destinadas à produção de papel e celulose, contribuindo com fibras longas imprescindíveis na fabricação de papéis que exigem maior resistência e melhor absorção de tinta (EMBRAPA, 2020).

A Madeira do *Pinus* pode ser destinada à indústria laminadora, que a utiliza para fabricação de compensados; para a indústria de serrados, que a transforma em madeira beneficiada ou é convertida em móveis; para a indústria de MDF, OSB entre outros. O seu resíduo tem sido aproveitado como biomassa para geração de vapor e energia (EMBRAPA, 2020). A cadeia produtiva da madeira pode ser observada na Figura 2.

Figura 2 – Cadeia produtiva da madeira



Fonte: Embrapa (2020)

Além disso, pode-se extrair resina dos *Pinus*, que é uma mistura de ácidos e éteres aromáticos, insolúveis em água e solúveis em álcool, éter e óleos essenciais.

Os principais produtos obtidos da resina são: a terebintina, o breu e a água raz. A terebintina é utilizada para diluir gorduras e tintas. O breu é utilizado em cola de papel, desinfetantes, graxas para calçados, oleados, pomadas, preparos para couros, produtos farmacêuticos, sabões, tintas e vernizes. A água raz é diluente de tintas (VALERI e DE PAULA, 2009).

No Brasil, atualmente, são geradas aproximadamente 30 milhões de toneladas de resíduos de madeira, e deste total, a indústria madeireira contribui com 91% dos resíduos. Os resíduos gerados durante a colheita da floresta são compostos principalmente de madeira, casca e copas de árvores (GRODSKY *et al.*, 2016; Pincelli *et al.*, 2017).

A Quadro 1, descreve a porcentagem de madeira, cascas e folhas produzidas em florestas de Eucalyptus e de Pinus.

Quadro 1 – Percentual dos resíduos da colheita florestal de Eucalyptus e Pinus

Espécie	Madeira com casca (%)	Casca solta (%)	Folhas (%)
Eucalyptus	74,9	-	25,1
Pinus	74,0	8,6	17,4

Fonte: adaptado de Pincelli *et al.*, (2017)

No Quadro 1, é possível observar que uma há uma grande quantidade de folhas que se tornam resíduo após a colheita da madeira, o aproveitamento racional desse resíduo pode proporcionar um novo tipo de processo produtivo (PONTES *et al.*, 2012).

3.2 Corantes têxteis

No Brasil, a indústria têxtil foi implementada na segunda metade do século XIX e se consolidou a partir de 1980 (KON; COAN, 2005; LISBOA, 2013). Atualmente, o Brasil é o 5º maior produtor mundial de têxteis (ABIT, 2023). Apesar de todos os benefícios econômicos que esse setor traz, ele é um dos segmentos industriais que mais consome água e conseqüentemente gera grandes quantidades de efluentes, com uma média de 50 a 100L de efluente por quilo de tecido produzido. Essa geração abundante de efluentes trouxe uma grande preocupação social e ambiental

principalmente por conta dos corantes contidos nesses efluentes (ARSLAN-ALATON *et al.*, 2008).

Corantes sintéticos são compostos orgânicos capazes de conferir cor a um determinado substrato, são extensivamente usados na indústria têxtil, farmacêutica, de cosméticos, de couros, entre outras. A enorme popularidade dos corantes sintéticos é justificada pelo seu menor custo e infinita possibilidade de síntese com grupos cromóforos (GUARATINI e ZANONI, 2000).

As moléculas de corante são formadas pelos cromóforos, que são um grupo de átomos responsável pela cor, e pelos auxocromos que funcionam como doadores ou receptores de elétrons que intensificam a cor dos cromóforos, ou seja, são responsáveis pela fixação do corante à fibra (SANTOS *et al.*, 2007).

De acordo com Guaratini e Zanoni (2000), os corantes podem ser classificados de acordo com o método pelo qual são fixados à fibra têxtil:

- a) Corantes reativos: contém um grupo eletrofílico (reativo) capaz de formar ligação covalente com grupos hidroxilas das fibras celulósicas. São altamente solúveis em água e tem grande estabilidade na cor do tecido tingido. Geralmente, são utilizados em algodão e outras fibras celulósicas e contém a função azo e antraquinona como grupos cromóforos.
- b) Corantes diretos: compostos solúveis em água com grande afinidade por fibras de celulose através de interações de Van der Waals. São aplicados em algodão, papel, couro e nylon.
- c) Corantes azoicos: compostos coloridos e insolúveis em água. São sintetizados sobre a fibra durante o processo de tingimento com o auxílio de um componente solúvel em água, conhecido como agente de acoplamento. É um método de tingimento de alto padrão de fixação e alta resistência à luz e à umidade.
- d) Corantes ácidos: são corantes aniônicos, solúveis em água e portadores de um a três grupos sulfônicos. A afinidade do corante com a fibra é resultante das ligações iônicas. Geralmente, são aplicados em lã, seda, nylon, acrílicos modificados, papel, couro e cosméticos.
- e) Corantes básicos: são corantes solúveis em água que produzem cátions coloridos em solução e, por isso, são chamados também de corantes catiônicos. Eles são usados para fins medicinais e no tingimento de papel, poliéster e lã.

- f) Corantes à cuba: são corantes insolúveis em água e utilizados em algodão e fibras celulósicas. Através da redução com hidrossulfito de sódio em meio alcalino, transformam-se em um composto solúvel.
- g) Corantes de enxofre: se caracterizam por possuir enxofre em sua molécula. São insolúveis em água e, geralmente, aplicados sobre a fibra após pré-redução em banho de hidrossulfito de sódio. Uma desvantagem desta classe de corante são os resíduos altamente poluentes.
- h) Corantes dispersivos: são insolúveis em água. São aplicados em fibras de celulose e fibras hidrofóbicas através de suspensão.
- i) Corantes pré-metalizados: são corantes utilizados geralmente para tintura de fibras protéicas e poliamida. No processo de tintura é explorado a capacidade de interação entre o metal e os agrupamentos funcionais portadores de pares de elétrons livres, como aqueles presentes nas fibras protéicas. Tem como desvantagem a alta quantidade de metal (cromo) nas águas de rejeitos.
- j) Corantes branqueadores: quando aplicados às fibras têxteis, proporcionam alta reflexão de luz. São utilizados para diminuir a tonalidade amarelada natural das fibras têxteis.

Na indústria têxtil, corantes como o Azul de Metileno (AM) e o Verde Malaquita (VM) são amplamente utilizados para tingir fibras sintéticas, como nylon e poliéster, além de fibras naturais, como lã e algodão. A escolha desses corantes depende da compatibilidade com o tipo de fibra e do efeito de cor desejado (ZOLLINGER, 1991). No Quadro 2, constam as principais características desses corantes.

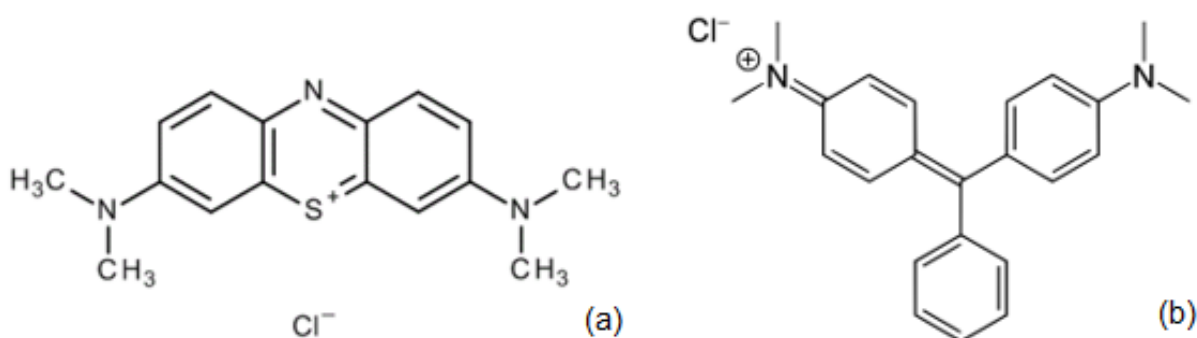
Quadro 2 – Características do Azul de Metileno e Verde Malaquita

Corante	Classe química	Fórmula química	Massa molar (g/mol)	Comprimento de onda (nm)
Azul de metileno	Corante catiônico	$C_{16}H_{18}N_3SCl$	319,9	660
Verde malaquita	Corante básico	$C_{23}H_{25}N_2Cl$	364,9	615

Fonte: Merck chemicals (2023)

Devido à toxidez destes compostos, cuja capacidade de reagir com diversos substratos os tornam de difícil tratamento, é de extrema relevância que os efluentes sejam tratados e que os corantes sintéticos sejam removidos (POGGERE *et al.*, 2011). Na Figura 3, estão representadas as estruturas moleculares do azul de metileno (a) e do verde malaquita (b), respectivamente.

Figura 3 – Estrutura molecular do azul de metileno (a) e verde malaquita (b)



Fonte: Merck Chemicals (2023)

Os corantes chegam ao efluente têxtil durante o processo de tingimento das fibras, que envolve a transferência de corantes do banho de tingimento para a fibra. Esse processo pode ser dividido em três etapas principais: primeiramente a difusão do corante no banho de tingimento, a adsorção do corante na superfície da fibra e a adsorção do corante da superfície da fibra para seu interior (LANGE, 2004). A quantidade de corante na fibra aumenta de acordo com o tempo de tingimento até que seja alcançada uma proporção constante de moléculas de corante na fibra e no banho, o que significa que o sistema atingiu o estado de equilíbrio (REVELLO, 2002).

Após o processo de tingimento e decorrido o tempo de fixação do corante na peça, o tecido é lavado com água fria, água quente e é ensaboado sendo enxaguado rigorosamente. A finalidade de enxaguar bem o tecido é retirar o corante hidrolisado sobre a fibra, evitando problemas de desbotamento (LANGE, 2004).

Os efluentes têxteis provenientes dos processos de tingimento e lavagem apresentam elevada concentração de corantes e quando descartados nos ambientes aquáticos podem causar diversos impactos, como danos à fauna aquática, redução da fotossíntese, poluição visual e toxicidade aguda e crônica nos ecossistemas (REVELLO, 2002). Além do fato de alguns corantes apresentarem compostos

carcinogênicos e mutagênicos em sua composição, por conter substâncias como fenóis, benzeno, tolueno e outros hidrocarbonetos (FERRARI, 2009).

3.3 Métodos de tratamento de efluente têxtil

A Resolução CONAMA nº 430/2011 estabelece padrões de qualidade para corpos hídricos e lançamentos de efluentes no Brasil. As indústrias, incluindo as têxteis, devem atender aos limites máximos e mínimos estabelecidos por esta resolução para parâmetros gerais de qualidade de água e de efluentes, como demanda bioquímica de oxigênio (DBO), oxigênio dissolvido, pH, sólidos totais, entre outros. Embora não mencione diretamente corantes têxteis, esta resolução define limites para parâmetros como cor que as indústrias têxteis devem observar ao tratar seus efluentes. Os efluentes industriais não podem ultrapassar o limite de 50UCA para a cor. Ou seja, é permitido que o efluente lançado no corpo hídrico contenha corantes, desde que a intensidade da cor não exceda esse valor estabelecido pela resolução (ABREU *et al.*, 2008).

Infelizmente, o setor têxtil brasileiro investe apenas o mínimo necessário no tratamento de seus efluentes, com o objetivo exclusivo de cumprir a legislação e evitar multas, sem considerar os impactos ambientais e sociais causados pelos corantes. Quando esses corantes são despejados em corpos hídricos, podem atingir reservatórios e ETA's. No entanto, os métodos convencionais de tratamento de águas residuais não conseguem remover ou degradar esses compostos. Por isso, é fundamental o desenvolvimento de novas tecnologias capazes de eliminar esses poluentes de forma eficiente (ABREU *et al.*, 2008; BRILLAS e MARTÍNEZ-HUITTLE, 2015; MEHRJOUEI *et al.*, 2015).

Apesar da falta de investimento do setor têxtil brasileiro, muitas pesquisas já comprovaram várias técnicas que podem ser usadas para tratamento desses efluentes. O Quadro 3 descreve alguns métodos utilizados para tratamento de efluentes com as vantagens e desvantagens de cada um.

Quadro 3 – Comparações dos métodos de remoção de corantes

Métodos químicos e/ou físicos	Vantagens	Desvantagens
Oxidação	Processo rápido	Alto custo de energia e formação de produtos
Adsorção	Altos índices de remoção	Requer regeneração ou acondicionamento adequado para o adsorvente usado
Processos biológicos	Processo econômico e ecologicamente correto	Necessita de áreas extensas para sua implantação, menor flexibilidade de operação, maior tempo necessário para descoloração e não é efetivo para todos os tipos de corantes
Técnica de membrana	Alta eficiência na remoção de moléculas de corantes	Custo elevado, limpeza e troca constante das membranas
Coagulação e floculação	Custo reduzido e facilidade de operação	Geração de grandes volumes de lodo, a ineficiência no tratamento de alguns corantes ou em concentrações muito baixas de corantes.

Fonte: Oliveira (2013)

A remoção de corantes é um desafio devido à sua estrutura molecular complexa e de difícil degradação. Sendo assim, a escolha da técnica deve levar em conta a eficiência, o custo, a facilidade de aplicação e as características do efluente (OLIVEIRA, 2013).

Os estudos mostram que a combinação de técnicas leva a uma maior eficiência de remoção do que no uso de um único método de tratamento porque processos combinados podem suprir as deficiências apresentadas pelos processos quando utilizados individualmente (ABREU *et al.*, 2008; OLIVEIRA, 2013).

Técnicas como precipitação, degradação química, eletroquímica e fotoquímica, estão disponíveis na literatura e vem demonstrando bons resultados (GUARATINI e

ZANONI, 2000). Mas as técnicas mais utilizadas para tratar efluentes têxteis são as de coagulação e floculação, remoção biológica e adsorção (ANTUNES, 2010).

3.4 Materiais adsorventes e o processo de adsorção

Materiais adsorventes são substâncias porosas que têm uma área superficial elevada para uma determinada quantidade de massa. Os poros são espaços vazios entre as partículas de um material e podem ser classificados de acordo com seu tamanho (MOREIRA, 2010). No Quadro 4, é representada a classificação de poros de acordo com o tamanho dos diâmetros dos poros (CLAUDINO, 2003).

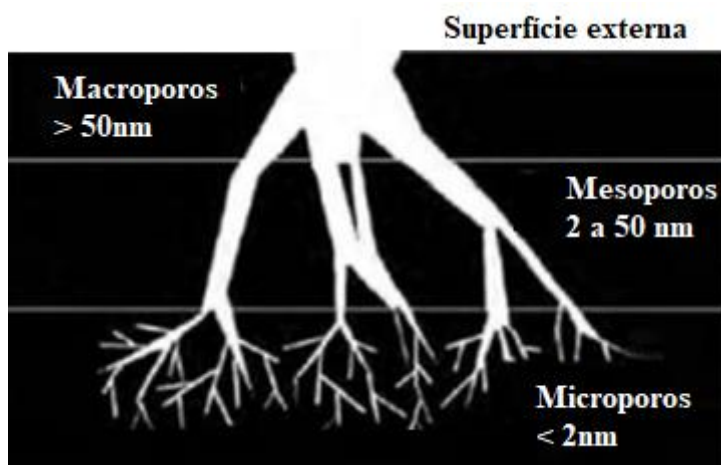
Quadro 4 – Classificação de poros de um material adsorvente

Tipo	Diametro médio
Macroporo	$d > 50 \text{ nm}$
Mesoporo	$2 < d < 50 \text{ nm}$
Microporo	$d < 2 \text{ nm}$

Fonte: Claudino (2003)

Os macroporos têm pouca contribuição para a área superficial específica e não são significativos para a adsorção, mas funcionam como canais para a passagem de fluido até os mesoporos e microporos, onde a adsorção ocorre de forma mais significativa. Os mesoporos são importantes para a adsorção de moléculas grandes, como corantes, oferecendo a maior parte da área superficial em carvões impregnados com produtos químicos. Já os microporos têm a maior área superficial, proporcionando alta capacidade de adsorção para moléculas pequenas, como gases e solventes. Todos os carvões ativados possuem micro, meso e macroporos, mas a proporção entre eles varia conforme o precursor e o processo de ativação utilizado (ROUQUEROL, 1994; CLAUDINO, 2003). A Figura 4 mostra a estrutura dos poros nos carvões ativados.

Figura 4 – Tipos de poros em um carvão ativado



Fonte: Claudino (2003)

O principal material adsorvente utilizado no tratamento de efluentes é o carvão ativado, devido a sua alta capacidade de adsorver uma diversidade de contaminantes orgânicos, inorgânicos e metais. No entanto, o desenvolvimento de adsorventes não convencionais tem sido o foco de muitas pesquisas porque embora os adsorventes convencionais sejam eficazes, os adsorventes não convencionais também oferecem boas propriedades de adsorção, com vantagens adicionais como regeneração mais barata e menor custo operacional, tornando-os uma opção atrativa para aplicações em larga escala (SILVA, 2005; MOREIRA, 2010).

Alguns biomateriais foram estudados como adsorventes, como a casca de arroz (KIELING, 2016), escamas de peixe (SANTOS *et al.*, 2009), semente de moringa (NOGUEIRA, 2010), coco verde (RAULINO, 2011), bagaço de laranja (FERRARI, 2009), serragem de madeira (ANTUNES *et al.*, 2010), cana-de-açúcar (FÔNSECA, 2020), entre outros.

A adsorção é uma operação unitária de separação e baseia-se na transferência de fase, onde um fluido chamado de adsorvato fica retido na superfície de um adsorvente (DEMBOGURSKI, 2019).

Existem dois processos de adsorção: a adsorção física, denominada também como fisissorção, e adsorção química, também chamada de quimissorção (PERUZZO, 2003). A diferença entre elas está nas forças de ligações que ocorrem entre as moléculas que estão sendo adsorvidas e o adsorvente (DEMBOGURSKI, 2019). O Quadro 5 descreve as características da fisissorção e da quimissorção.

Quadro 5 – Características da fisissorção e da quimissorção.

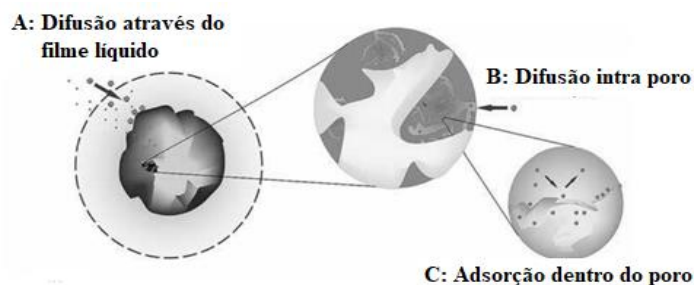
Fisissorção	Quimissorção
Causada por forças de Van Der Waals	Causada por forças eletrostáticas e ligações covalentes
Não há transferência de elétrons	Há transferência de elétrons, formando ligações entre adsorvente e adsorvato
Baixo calor de adsorção (entre 2-6 kcal/mol)	Alto calor de adsorção (entre 10-2000 Kcal/mol)
Formação de monocamada ou Multicamada	Somente formação de monocamada
Não há dissociação das espécies adsorvidas	Pode envolver dissociação de espécies adsorvidas
Significante a baixas temperaturas	É possível em uma larga escala de temperatura
Rápida, não ativada, reversível	Ativada, pode ser lenta e irreversível

Fonte: Adaptado de Dembogurski (2019)

A fisissorção ocorre à interação entre o adsorvato e a superfície do adsorvente através de forças de Van Der Waals, que são ligações intermoleculares muito fracas e incapazes de formar ligações químicas, sendo um processo que pode ser reversível (DEMBOGURSKI, 2019). Já a quimissorção envolve a troca de elétrons, onde o adsorvato se liga fortemente à superfície do sólido por meios de ligações iônicas ou covalentes polares (LEITE, 2018). Trata-se de um processo exotérmico e irreversível, visto que há formação de ligações químicas (DEMBOGURSKI, 2019).

O fenômeno da adsorção compreende três etapas, sendo elas a difusão através do filme líquido, difusão intra poro e a adsorção dentro do poro, conforme representa a Figura 5 (CARDOSO, 2020).

Figura 5 – Etapas do processo de adsorção



Fonte: Nascimento *et al.*, (2014)

A adsorção tem se mostrado uma técnica eficiente para tratar efluentes têxteis, em relação a outras técnicas, devido à possibilidade de reutilização da água após o processo de purificação e porque as espécies de contaminantes são transferidos do efluente para uma fase sólida, reduzindo o volume de descarte ao mínimo (FERNANDES *et al.*, 2010). O método de adsorção também é vantajoso devido a fácil operação, sem risco de subprodutos tóxicos e o baixo custo de produção quando comparado a outros métodos (LEITE, 2018).

A avaliação de um processo de adsorção é feita através da capacidade de adsorção de um adsorvente (MOREIRA, 2010), conforme a Equação 1.

$$q_t = \frac{(C_o - C_f)V}{m_{ad}} \quad (1)$$

em que: q_t massa de adsorvato retida pelo adsorvente (g), C_o e C_f concentrações da substância a ser adsorvida presentes no início e no final do processo, respectivamente (g ml^{-1}), V volume da solução (ml) e m_{ad} massa de adsorvente (g).

Segundo Moreira (2010), a eficiência da remoção do material adsorvido pode ser obtida através da Equação 2,

$$E = \frac{(C_o - C_f)}{C_o} \quad (2)$$

em que: E eficiência de remoção do material adsorvido (%).

3.5 Cinética de adsorção

O estudo da cinética de adsorção determina a taxa de remoção do adsorvato da fase fluida em relação ao tempo necessário para que o equilíbrio do processo seja atingido. Através dos modelos cinéticos, é possível determinar o mecanismo do processo de adsorção e avaliar a eficiência do processo de adsorção (BEHREND, 2019).

Diversos modelos cinéticos são empregados, mas os mais utilizados no ajuste dos dados obtidos experimentalmente são os modelos de pseudo primeira ordem, pseudo segunda ordem, difusão intrapartícula e Elovich (FONSÊCA, 2020).

Modelo de pseudo primeira ordem

O modelo cinético de pseudo primeira ordem baseia-se princípio que a velocidade de remoção do adsorvato em relação ao tempo é diretamente proporcional à diferença na concentração de saturação e ao número de sítios ativos disponíveis no material adsorvente (FONSÊCA, 2020). Esse modelo é expresso pela Equação 3,

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (3)$$

em que: k_1 constante de velocidade de pseudo primeira ordem (min^{-1}), t tempo de adsorção (min), q_e e q_t quantidades de soluto adsorvido por grama de adsorvente no equilíbrio e no tempo t , respectivamente (mg g^{-1}).

O modelo cinético de pseudo de primeira ordem, em muitos casos, não se ajusta a toda faixa de tempo de contato, sendo geralmente aplicável para tempos menores que 20 a 30 min do processo de adsorção (BEHREND, 2019).

Modelo de pseudo segunda ordem

Esse modelo considera que a velocidade da reação depende da quantidade do soluto adsorvido na superfície do adsorvente e da quantidade adsorvida no equilíbrio, não considerando a concentração do adsorvato. O modelo relata o comportamento do processo em toda a faixa de tempo de contato (LEITE, 2018). O modelo é descrito pela Equação 4,

$$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t} \quad (4)$$

em que: k_2 constante de velocidade de pseudo segunda ordem ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$).

Este modelo assume que a adsorção é química, envolvendo a participação de forças de valência ou troca de elétrons entre soluto e adsorvente (LEITE, 2018).

Modelo de difusão intrapartícula

Este modelo assume que a difusão do filme líquido que cerca o adsorvente pode ser desprezado e a difusão intrapartícula é a única taxa que controla as etapas do processo de adsorção (BEHENDS, 2019). A Equação 5, demonstra a expressão matemática deste modelo cinético,

$$q_t = k_{dif} t^{0,5} + C \quad (5)$$

em que: k_{dif} constante de difusão intrapartícula ($\text{mg L}^{-1/2} \text{min}^{-1/2}$) e C espessura da camada limite (mg g^{-1}).

Modelo de Elovich

A equação de Elovich aplica-se à cinética de quimissorção. Ela ajusta-se satisfatoriamente em processos de cinética de adsorção lenta e em alguns processos de quimissorção ativada (BEHENDS, 2019). Ela é representada pela Equação 6,

$$qt = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln t \quad (6)$$

em que: β número de sítios adequados para a adsorção em cada sistema, relacionado com a extensão da cobertura da superfície de energia de ativação para quimissorção (g mg^{-1}), e α velocidade de adsorção inicial ($\text{mg g}^{-1} \text{min}^{-1}$).

4 ESTADO DA ARTE

O Quadro 6, apresenta alguns dos estudos reportados da literatura a respeito da produção de carvão ativado obtido a partir de Pinus para a remoção de corantes sintéticos em efluentes.

Quadro 6 – Estado da arte carvão ativado de Pinus

Autor	Resíduo vegetal	Corante a ser removido do efluente
Muller <i>et al.</i> , 2016	Serragem de <i>Pinus elliottii</i> e bambu (<i>Drepanostachyum falcatum</i>)	Azul de metileno
Lunardi, 2014	Pó de serragem de Pinus	Vermelho Procion, vermelho RGB reativo, vermelho de metila e a bicromia vermelho de metila e azul de metileno
Lermem, 2017	Pinhas de <i>Pinus taeda</i>	Azul de metileno
Silva, 2005	Serragem de <i>Pinus elliottii</i>	Azul de metileno
Santos e Rocha, 2015	Pinhas de <i>Pinus taeda</i>	Laranja Reativo

Fonte: Autora (2024)

No Quadro 6, é possível se observar que há uma diversidade de materiais que podem ser estudados para a produção de carvão ativado a partir de resíduos agrícolas. Materiais do tipo madeira, serragem, cascas e caroços são aplicados normalmente em metodologias de ativação química, em que a porosidade é formada através de reações de desidratação na estrutura carbonácea. Na ativação química, o material de carbono desenvolve grupos funcionais oxigenados, sendo mais reativos, tendo um papel importante na capacidade de adsorção de compostos polares (TORRELLAS *et al.*, 2015).

5 ARTIGO

PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA FOLHA DO *PINUS ELLIOTTII* E AVALIAÇÃO DO SEU POTENCIAL EM ADSORVER CORANTES SINTÉTICOS

Hingrid Gomes Reetz*

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a produção e caracterização de carvão ativado obtido da folha do *Pinus elliottii*, cujo enfoque prático foi a remoção de Azul de Metileno e Verde Malaquita por meio da adsorção. A matéria-prima foi impregnada com ácido fosfórico 40%, e posteriormente, submetida a pirólise sob atmosfera inerte de N₂ a uma temperatura de 500°C. O adsorvente foi submetido a caracterização físico-química e para avaliar a eficiência de adsorção do carvão ativado produzido, foram realizados experimentos de cinética de adsorção com corantes, sendo que esse ensaio também foi conduzido com o carvão ativado comercial, a fim de realizar uma comparação. Evidenciou-se um diâmetro de partícula de 151,21 µm, massa específica real de 1717,5 kg/m³ e área superficial de 27,13 m²/g, valores que não atendem aos critérios estabelecidos para carvões ativados. A porosidade do leito foi de 0,87 e o teor de umidade cerca de 1%, ambos em conformidade com a literatura. As análises de TGA e DRX revelaram que a impregnação ocasionou a degradação da celulose. As análises de microscopia revelaram que o adsorvente produzido apresenta superfície rugosa e com grande variedade de poros distribuídos aleatoriamente. Os processos de adsorção mostraram eficiências elevadas com o carvão produzido, sendo 99,95% para o Azul de Metileno e 99,97% para o Verde Malaquita, esses resultados assemelham-se a eficiência obtida pelo carvão ativado comercial, que foi de 99,93% para o Azul de Metileno e 99,98% para o Verde Malaquita. O equilíbrio de adsorção para os corantes em ambos materiais adsorventes, foi estabelecido até 15 minutos de ensaio indicando uma adsorção rápida e eficiente com um processo altamente convectivo de adsorção. O modelo que melhor se ajustou à cinética de adsorção para o Azul de Metileno e o Verde Malaquita com o carvão ativado produzido foi o modelo de pseudo segunda ordem. Para o carvão ativado comercial, foi o de pseudo primeira ordem para ambos os corantes. Portanto, esse estudo revelou que a folha do *Pinus elliottii* apresentou resultados satisfatórios quanto ao seu emprego para a produção de carvão ativado.

Palavras-chaves: carvão ativado; adsorção; corantes sintéticos; *Pinus elliottii*.

1 INTRODUÇÃO

A poluição das águas resulta do rápido crescimento das cidades e população, sem um planejamento adequado para o tratamento de resíduos e efluentes. Com o avanço das tecnologias, identificaram-se diversos tipos de contaminantes nas águas, principalmente corantes, que são oriundos do processo de tingimento de fibras têxteis pela indústria e podem causar diversos impactos, como danos à fauna aquática, redução da fotossíntese, poluição visual e toxicidade aguda e crônica nos

ecossistemas. Além do fato de alguns corantes apresentarem compostos carcinogênicos e mutagênicos em sua composição (REVELLO, 2002; SILVA, 2005; FERRARI, 2009).

Portanto, é de extrema relevância que os efluentes sejam tratados e que os corantes sintéticos sejam removidos. Logo, é fundamental o desenvolvimento de novas tecnologias capazes de eliminar esses poluentes de forma eficiente. (ABREU *et al.*, 2008; BRILLAS; MARTÍNEZ-HUITTLE, 2015; MEHRJOUEI *et al.*, 2015).

Em meio a tantas técnicas existentes para a remoção dos fármacos presentes em água e efluentes, encontra-se a adsorção o qual é uma das mais aplicadas (GEANKOPLIS, 1998). É uma operação unitária de separação e baseia-se na transferência de fase, onde um fluido chamado de adsorvato fica retido na superfície de um adsorvente (DEMBOGURSKI, 2019).

No grupo dos adsorventes mais utilizados em processos industriais se sobressai o carvão ativado, por ter uma alta capacidade de adsorver para uma grande diversidade de contaminantes orgânicos e inorgânicos (FRANCO, 2018; FREITAS, 2022). Com isso, o emprego de alguns adsorventes não comerciais têm sido enfoque de diversos estudos como potenciais para novos adsorventes, e entre eles se têm o uso da cinza da casca de arroz (KIELING, 2016), casca de café (SANTOS, 2013), escamas de peixe (SANTOS, 2009), serragem de *Pinus elliottii* (SILVA, 2005), semente de moringa (NOGUEIRA, 2010), farelo e casca de pinhão (Lima *et al.*, 2023), casca do coco verde (RAULINO, 2011), entre outros.

Inserido nesse contexto, o presente trabalho tem como intuito a desenvolver um adsorvente não convencional a partir das folhas do *Pinus elliottii*. O uso desse material se justifica porque a produção de um adsorvente a partir desse material agrega valor ao mesmo, visto que após a colheita da madeira há uma grande quantidade de folhas que se tornam resíduo. O carvão ativado produzido será caracterizado e utilizado em ensaios para determinação da cinética do processo de adsorção de azul de metileno e do verde malaquita em solução, visando o tratamento de efluentes têxteis.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais e soluções

A folha do *Pinus elliottii* foi a matéria-prima utilizada para produzir o carvão ativado. O resíduo foi proveniente de uma propriedade rural localizada no município de Aceguá/RS. Para fins comparativos foi utilizado também como material adsorvente o carvão ativado comercial da marca 3M aqualar, obtido no mercado local.

Os efluentes sintéticos foram preparados em laboratório utilizando os corantes azul de metileno e verde malaquita, sendo ambos dissolvidos em água destilada na mesma concentração de 25 ppm.

2.2 Curva de calibração

Para quantificar o corante presente em solução, foi elaborada uma curva de calibração, que serve como padrão de comparação para medir a concentração de corantes em fase líquida. O ajuste linear realizado nos dados da curva de calibração possibilita converter as leituras de absorbância em uma medida quantitativa da concentração. Dessa forma, para calcular a concentração de cada corante em solução, foram utilizados os ajustes lineares apresentados no Quadro 1 a seguir.

Quadro 1 – Ajuste linear

Corante	Ajuste linear
Azul de metileno	$C_{eAM}=0,1358 A_1$
Verde malaquita	$C_{eVM}=0,1369 A_2$

Fonte: Autora (2024)

2.3 Preparo da matéria-prima e produção do carvão ativado

Inicialmente, a folha do *Pinus elliottii* foi triturada em um moinho de facas (Marconi, modelo Cróton), lavado a quente para remoção de possíveis extrativos e seco na estufa durante 24 h à 105°C. A impregnação desse material foi realizada com ácido fosfórico (H₃PO₄) 40% com uma proporção de 1:1 em massa. As amostras impregnadas ficaram em repouso por 24 h à temperatura ambiente e, em seguida, foram submetidas a mais 24 h em estufa a 105°C.

Para a produção do carvão ativado, foi realizado a pirólise da folha do *Pinus elliottii* impregnada a uma temperatura de 500°C por 30 minutos em um reator tubular em atmosfera inerte de N₂. Como etapa de finalização, o material teve seu pH neutralizado em água e seco em estufa a 105°C por 24 h.

2.3 Preparo da matéria prima e produção do carvão ativado

A caracterização físico-química do carvão foi realizada quanto a massa específica real (ρ_r) através da picnometria gasosa (ULTRAPYC 1200e, Quantachrome Instruments) e a massa específica aparente (ρ_{ap}) por ensaio de proveta. A porosidade do leito de partículas (ϵ) foi estimada pela relação entre as massas específica real e aparente (SOUZA, 2022). O diâmetro médio de partícula (dp) foi obtido por análises em granulometria (CILAS, 1190L). A análise para a umidade (Ubu) foi realizada de acordo com as normas ASTM-D1762. A análise de estruturas cristalinas feita por meio da difração de raios-X (DRX) (Rigaku ULTIMA IV, Japão), a análise termogravimétrica (TGA) foi realizada em uma termobalança (Shimadzu, TGA-50, Japão) em atmosfera de nitrogênio gasoso a 50 mL/min e com uma taxa de aquecimento de 10°C/min até 700°C. E a análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram feitas em um microscópio (JEOL, JSM- 6060LV Akishima, Tokyo, Japan).

2.4 Cinética de adsorção

Os ensaios de cinética foram realizados em batelada, utilizando 25 mL de efluente sintético com concentração de 25 ppm e 0,025 g de adsorvente. Vale ressaltar que os ensaios de cinética foram realizados individualmente para cada um dos corantes estudados com o carvão ativado produzido e com o carvão ativado comercial.

Para cada corante foram feitas 8 amostras em duplicata, onde as mesmas foram postas em agitação a 150 rpm durante diferentes tempos (5, 10, 15, 30, 45, 60, 120, 180 min). As fases foram separadas por uma centrifuga (QUÍMIS, Q222TM216, Brasil) a 3000 rpm por 10 min. A concentração remanescente de corante presente na solução foi quantificada por um espectrofotômetro UV-VIS (Kazuaki, II- 226, China) com um comprimento de onda de 660nm para o azul de metileno e 615nm para o verde malaquita.

A avaliação da adsorção foi feita através das Equações 1 e 2, que representam respectivamente a capacidade de adsorção e percentual de remoção do corante,

$$q_t = \frac{(C_o - C_f)V}{m_{ad}} \quad (1)$$

$$E = \frac{(C_o - C_t)}{C_o} \quad (2)$$

onde q_t é a capacidade de adsorção (mg g^{-1}), E é a eficiência de remoção, C_o é a concentração inicial (mg L^{-1}), e C_f é a concentração final de adsorvato na fase fluida (mg L^{-1}), V é o volume de solução (L) e m_{ad} é a quantidade de adsorvente (g).

Os dados experimentais obtidos foram ajustados aos modelos cinéticos de pseudo primeira ordem (Equação 3), pseudo segunda ordem (Equação 4), Difusão (Equação 5) e Elovich (Equação 6),

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (3)$$

$$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t} \quad (4)$$

$$q_t = k_{dif} t^{0,5} + C \quad (5)$$

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(1 + \alpha \beta t) \quad (6)$$

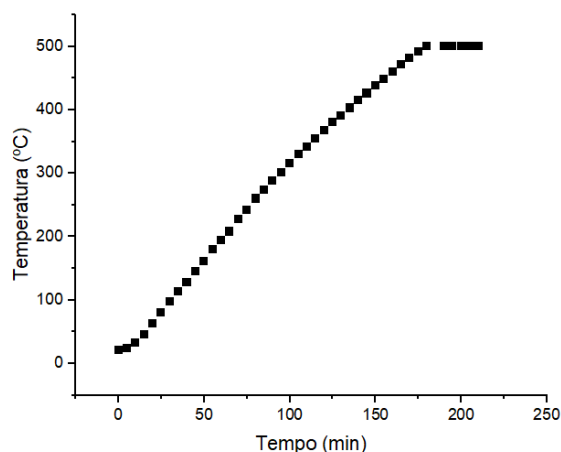
onde t é o tempo (min), q_t é a quantidade de corante adsorvido (mg g^{-1}), k_1 é a constante da velocidade da adsorção de pseudo primeira ordem (min^{-1}) e k_2 é a constante da velocidade da adsorção de pseudo segunda ordem em ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$). β é o valor do número de sítios adequados para a adsorção em cada sistema (g mg^{-1}) e α é a velocidade inicial de adsorção ($\text{mg. mg}^{-1} \text{min}^{-1}$). k_{dif} é a constante de difusão intrapartícula ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1/2}$) e C é a estimativa da espessura da camada limite (g mg^{-1}).

Para verificar a qualidade dos ajustes observou-se os valores do coeficiente de determinação (R^2) e qui-quadrado (X^2), os mesmos sendo feitos no *software origin*, mesmo *software* onde serão aplicados os modelos cinéticos de adsorção aos dados experimentais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1, está representado o perfil de temperatura do reator tubular durante a pirólise da folha do *Pinus elliottii* impregnada.

Figura 1 – Perfil de temperatura no reator tubular



Fonte: Autora (2024)

Na Figura 1, é possível observar que o reator tubular iniciou o processo com uma temperatura baixa e foi aumentando gradualmente até atingir 500°C, onde a temperatura foi mantida constante por 30 minutos. Esse tempo foi necessário para assegurar que todo o material, incluindo seu interior, tenha atingido a mesma temperatura, garantindo uma pirólise uniforme da matéria-prima impregnada.

Na Figura 2, está disposta uma fotografia ilustrativa do material adsorvente, sendo a folha do *Pinus elliottii* moída e seca (a) e o carvão ativado produzido a partir da matéria-prima seca e ativada quimicamente por impregnação com H_3PO_4 (b). Comparando ambos, nota-se que as características da matéria-prima se modificaram após a produção do carvão ativado.

Figura 2 – Folha de *Pinus elliottii* moída e seca (a), carvão ativado produzido (b)

Fonte: Autora (2024)

Na Tabela 1, são apresentados os resultados da etapa de caracterização físico-química do carvão produzido.

Tabela 1- Caracterização do carvão ativado

Parâmetro	Valores
ρ_r (kg/m ³)	1717,5 ±0,0010
ρ_{apa} (kg/m ³)	226,7± 0,0058
ϵ	0,87
d_p (µm)	151,21
S (m ² /g)	27,13
Ubu (%)	0,70±0,02

Fonte: Autora (2024)

O valor obtido para a massa específica real foi de 1717,5 kg/m³, o que não é compatível com os valores típicos de carvões ativados, uma vez que, os valores de massa específica para carvões ativados provenientes de resíduos agrícolas variam entre 1000 e 1700 kg/m³ (SILVA, 2019). O valor obtido para a massa específica aparente foi de 226,7 kg/m³, e, ao relacioná-lo com a massa específica real, a porosidade do leito encontrada foi de 0,87. Esse valor está no limite da faixa de porosidade reportada na literatura, que varia de 0,54 a 0,87 para carvões ativados produzidos a partir de resíduos agrícolas (SOUSA, 2018; SILVA, 2019).

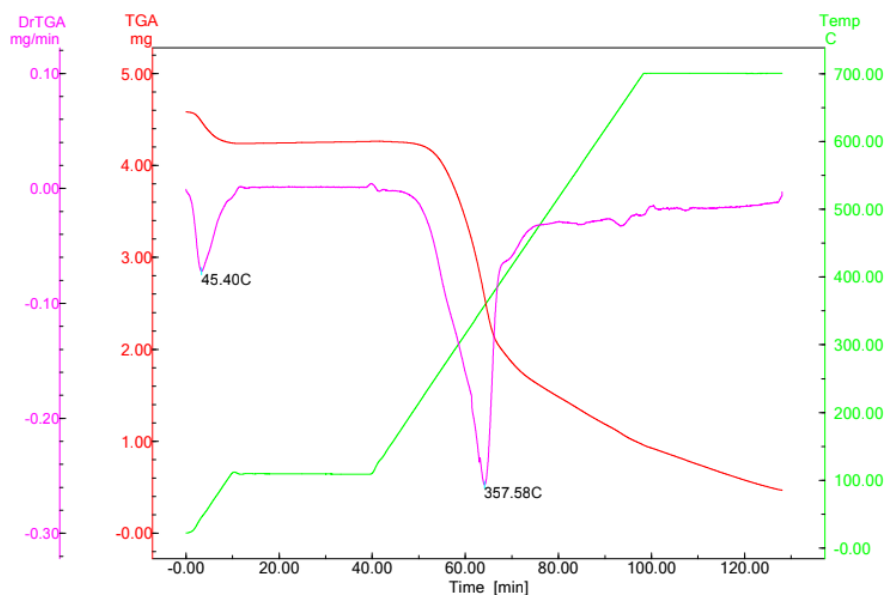
O carvão produzido apresentou um diâmetro de partícula de 151,21 µm, não atendendo ao critério para carvões ativados, no qual são desejadas partículas menores do que 44 µm (SANTOS *et al.*, 2018). A área superficial do material adsorvente, conforme a análise, foi de 27,13m²/g e considera-se um valor baixo para um carvão ativado pois deveria estar entre 400 e 1500 m²/g (CHEN *et al.*, 2011; ALMEIDA *et al.*, 2014).

Em relação ao teor de umidade, o ideal é que seja inferior a 10%, esse parâmetro é atendido pelo carvão produzido, com quase 1% de umidade. É preferível que esse parâmetro apresente valores baixos por questões de armazenamento do material e porque quanto menor a umidade do material, maior será disponibilidade de poros para a ocorrência da adsorção (SANTOS *et al.*, 2018; Silva, 2019)

As Figuras 3 e 4, apresentam as análises termogravimétricas da derivada da perda de massa em função da temperatura referentes à folha de *Pinus elliottii* moída e seca e ao carvão ativado obtido, respectivamente.

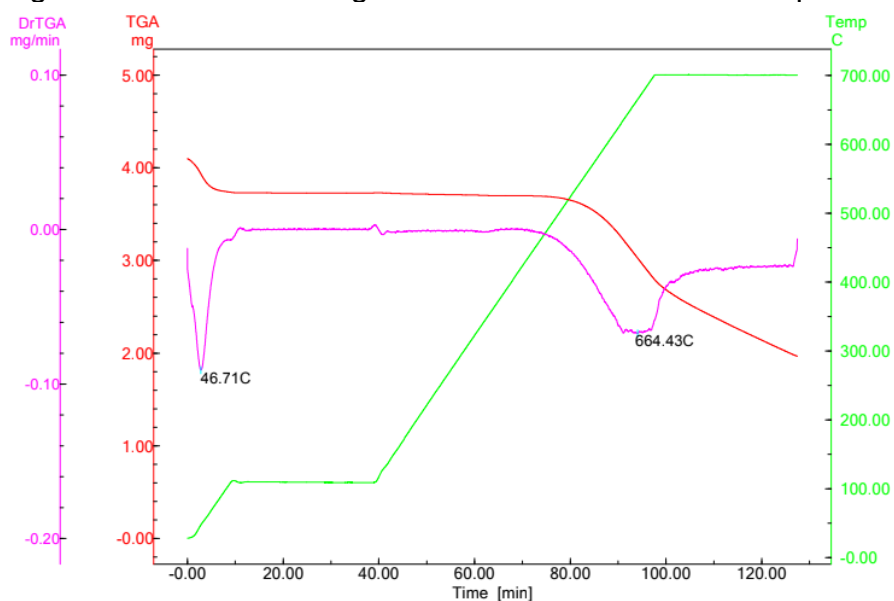
Na Figura 3, a primeira fase de perda ocorre com a temperatura em torno de 100°C e está associada à perda de umidade do material. A segunda fase de perda ocorre aos 400°C pode estar associada a degradação da celulose. Na Figura 4, há dois picos de perda de massa, relacionados ao carvão ativado obtido, ambas as perdas de massa ocorrem em temperaturas em torno de 300°C e também estão associadas a degradação da celulose. Segundo Camargo (2012), em análises termogravimétricas, espera-se que a perda de massa total da matéria ocorra em diversas etapas, fato que não foi observado em ambas as amostras.

Figura 3 – Análise termogravimétrica da matéria-prima



Fonte: Autora (2024)

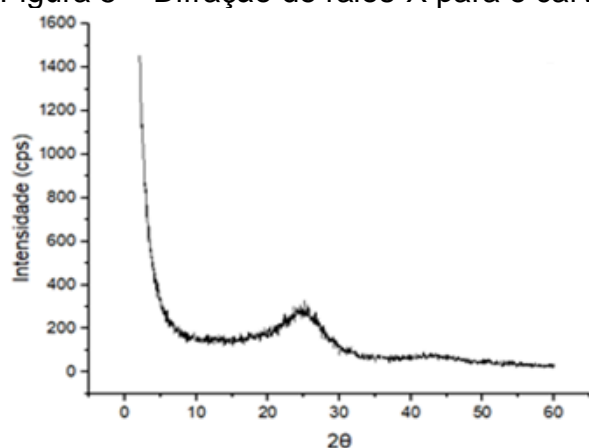
Figura 4 – Análise termogravimétrica do carvão ativado produzido



Fonte: Autora (2024)

À Figura 5, representa o resultado da difração de raios-X para o carvão ativado produzido. Verifica-se que o adsorvente apresentou uma fase amorfa que é identificada entre 20° e 30°. Entre 23° e 24°, há pequenos picos referentes a resquícios de H₃PO₄ utilizado no processo de impregnação química. O quartzo (SiO₂) foi o mineral predominante encontrado.

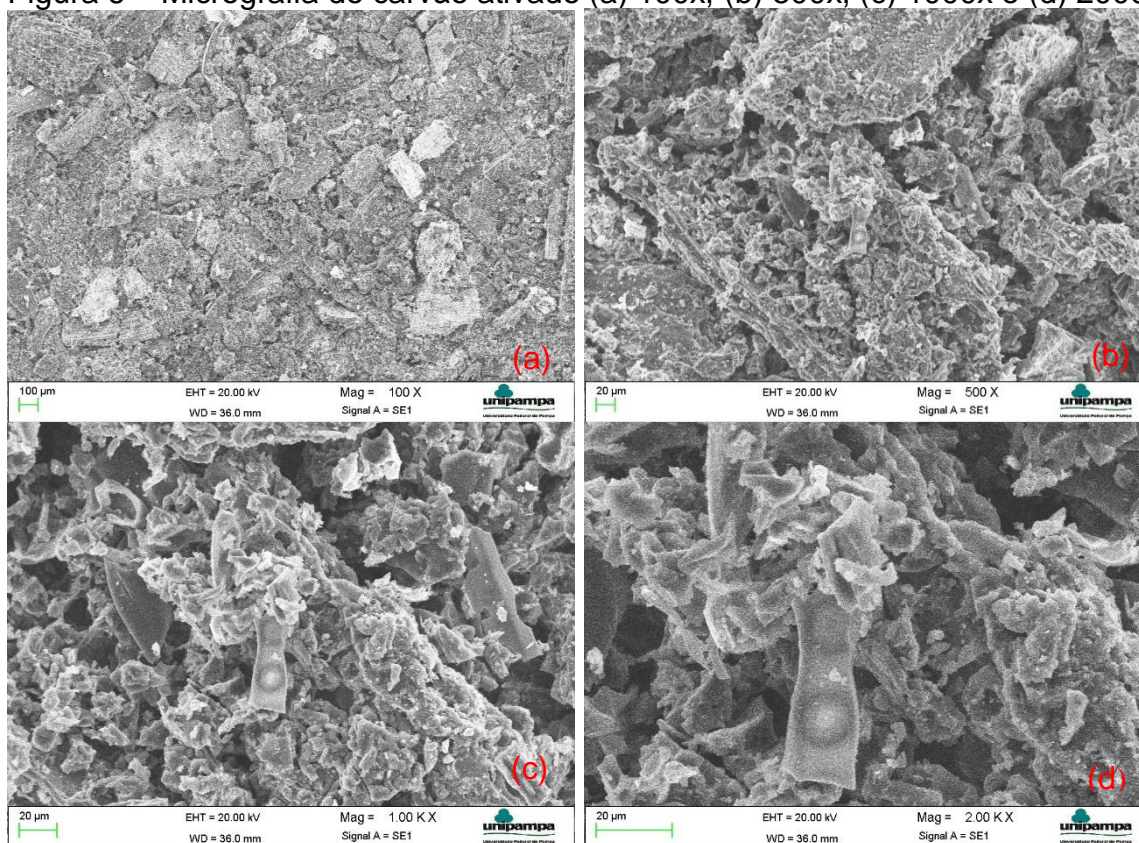
Figura 5 – Difração de raios-X para o carvão ativado



Fonte: Autora (2024)

As análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizadas com a finalidade de obter informações sobre a morfologia da superfície do carvão ativado obtido e podem ser visualizadas na Figura 6.

Figura 6 – Micrografia do carvão ativado (a) 100x, (b) 500x, (c) 1000x e (d) 2000x



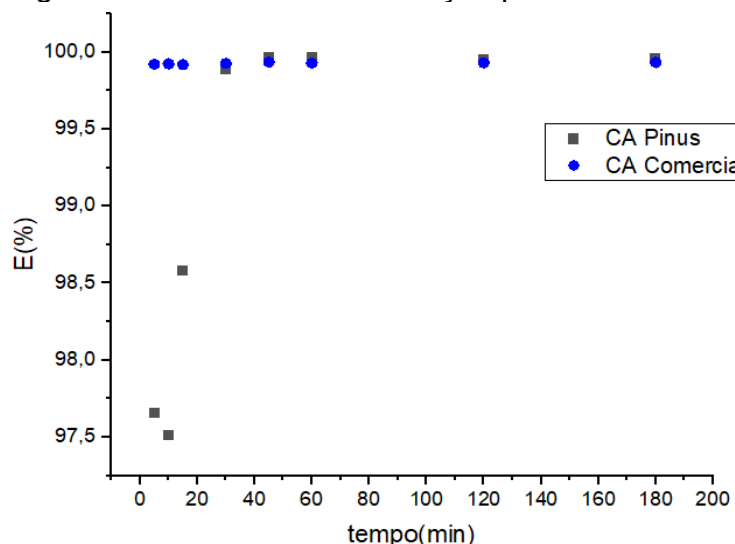
Fonte: Autora (2024)

Através das imagens de MEV é possível observar que carvão ativado produzido possui uma superfície rugosa e heterogênea tendo uma grande variedade de tamanhos e formatos quanto a estrutura dos poros, sendo distribuídos aleatoriamente. As imagens mostraram algumas alterações na morfologia e estrutura do material que

pode ser atribuída a impregnação ácida que altera a morfologia do material e contribui para a formação da estrutura porosa.

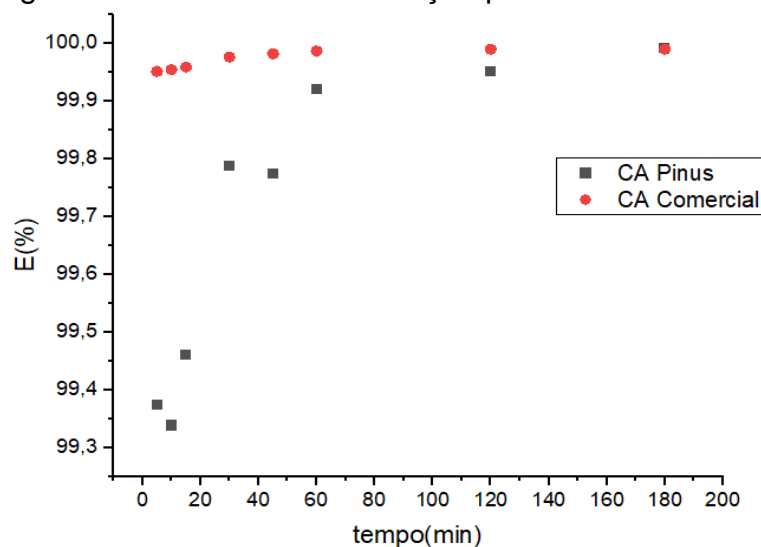
As eficiências de remoção para o azul metileno (a) e o verde malaquita (b), tanto com o carvão produzido quanto com o comercial, são evidenciadas na Figura 7 e na Figura 8, respectivamente.

Figura 7 – Eficiências de remoção para o AM



Fonte: Autora (2024)

Figura 8 – Eficiências de remoção para o VM

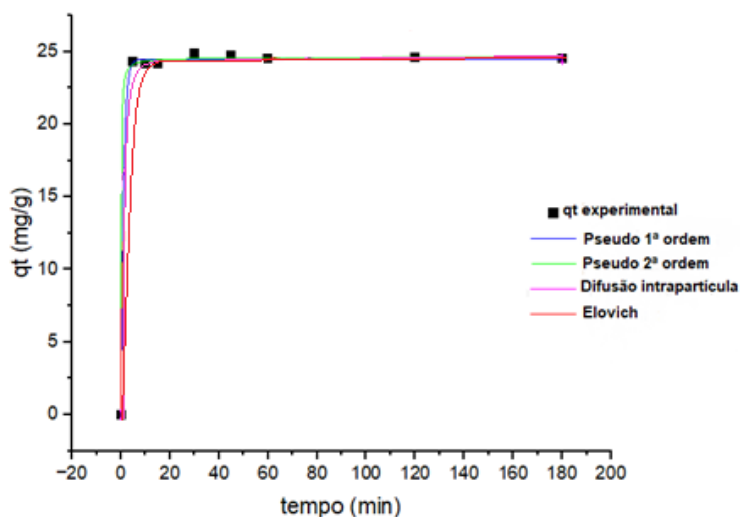


Fonte: Autora (2024)

Para o carvão ativado de *Pinus elliottii* foi obtida uma eficiência de 99,95% para o azul de metileno e 99,97% para o verde malaquita, enquanto para o carvão comercial foi obtida uma eficiência de 99,93% para o azul de metileno e 99,98% para o verde malaquita. O carvão produzido apresentou uma eficiência semelhante ao carvão ativado comercial e também apresentou valores superiores aos evidenciados pela literatura. Silva (2019) por exemplo, obteve 99,36% para a remoção de azul de metileno com carvão ativado obtido da palha de azevém e Silva (2021) obteve 91,5% para a remoção do verde malaquita com carvão ativado a partir do caroço do açaí.

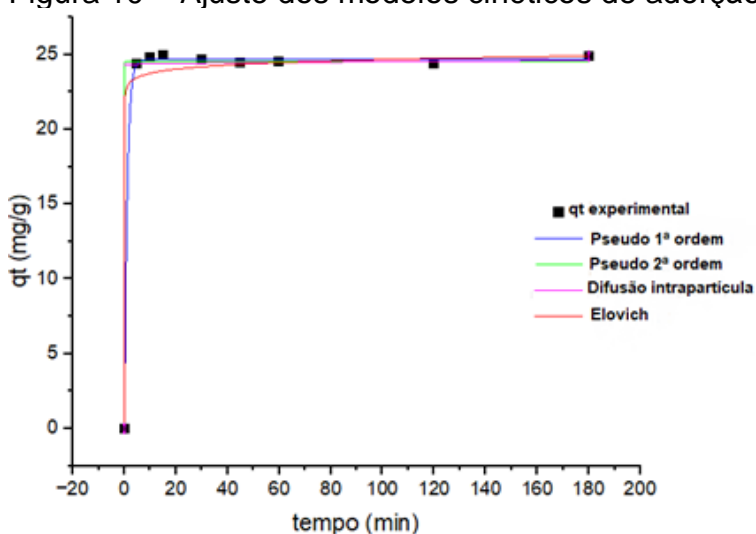
Nas Figuras 9 e 10, são mostrados os dados experimentais obtidos no ensaio de adsorção para os corantes azul de metileno e verde malaquita, utilizando tanto o carvão ativado produzido quanto o comercial, acompanhados dos ajustes dos modelos cinéticos aos dados obtidos.

Figura 9 – Ajuste dos modelos cinéticos de adsorção de AM com o CA produzido



Fonte: Autora (2024)

Figura 10 – Ajuste dos modelos cinéticos de adsorção de AM com o CA comercial

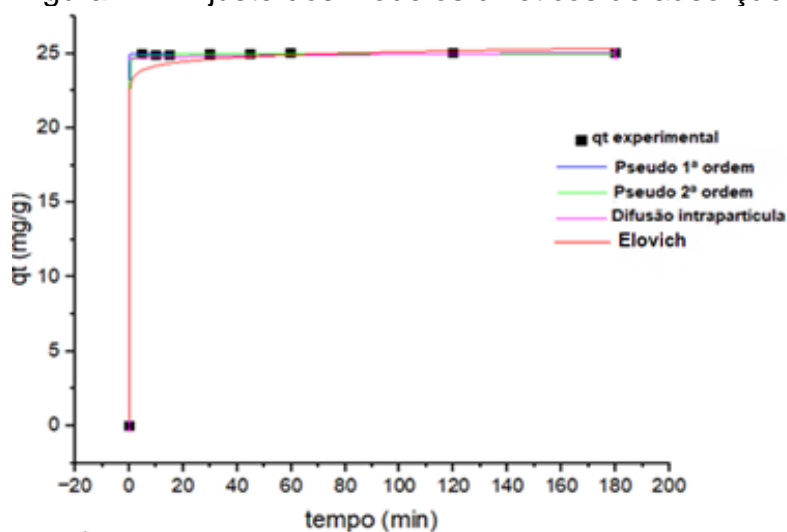


Fonte: Autora (2024)

Analisando as Figuras 9 e 10, observa-se que o equilíbrio de adsorção para o Azul de Metileno utilizando o carvão de Pinus foi alcançado em 15 minutos, enquanto para o carvão comercial o equilíbrio foi atingido em 5 minutos.

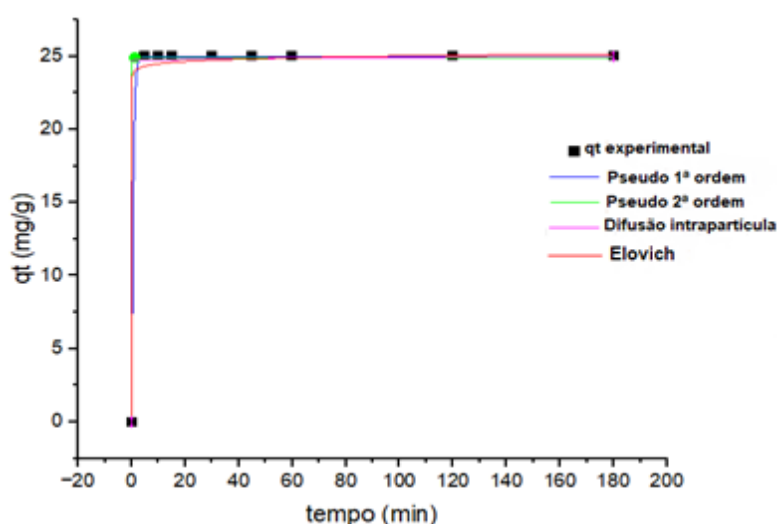
Nas Figuras 11 e 12, são mostrados os dados experimentais obtidos no ensaio de adsorção para o Verde malaquita utilizando tanto o carvão ativado produzido e o comercial, respectivamente, acompanhados dos ajustes dos modelos cinéticos aos dados obtidos.

Figura 11 – Ajuste dos modelos cinéticos de adsorção de VM com o CA produzido



Fonte: Autora (2024)

Figura 12 – Ajuste dos modelos cinéticos de adsorção de VM com o CA comercial



Fonte: Autora (2024)

As Figuras 11 e 12 mostram que o equilíbrio foi alcançado em 5 minutos tanto com o carvão de Pinus quanto com o comercial. Como o equilíbrio foi atingido rapidamente nos ensaios, concluiu-se que predominou um processo convectivo de transferência de massa. Segundo Silva (2019), esse processo se deu em função da adsorção das moléculas de adsorvato na superfície externa do material adsorvente, evidenciando ser um processo altamente convectivo, comprovado pelos modelos de ajuste.

Nos Quadros 3 e 4, são apresentados os valores dos parâmetros dos ajustes para os modelos cinéticos de pseudo primeira ordem, pseudo segunda ordem, difusão intrapartícula e Elovich para o azul de metileno e verde malaquita, respectivamente.

Quadro 3 – Parâmetros para os modelos cinéticos aplicados na adsorção do AM

Cinética de Azul de metileno com CA produzido								
Modelo	PPO		PSO		Difusão intrapartícula		Elovich	
Parâmetros	q_e	24,49 ± 0,09	q_e	24,59 ± 0,10	c	15,67 ± 4,38	α	130,70 ± 10,81
	k_1	0,93 ± 0,24	k_2	0,41 ± 0,21	k_{dif}	1,01 ± 0,60	β	0,31 ± 0,01
R^2	0,99		0,99		0,48		0,27	
X^2	0,06		0,04		54,34		61,26	
Cinética de Azul de metileno com CA comercial								
Modelo	PPO		PSO		Difusão intrapartícula		Elovich	
Parâmetros	q_e	24,66 ± 0,08	q_e	24,52 ± 0,04	c	24,31 ± 0,07	α	3,00E24 ± 1,20
	k_1	0,91 ± 0,18	k_2	3,96E43 ± 7,07E43	k_{dif}	0,02 ± 0,01	β	2,50 ± 0,16
R^2	0,99		0,27		0,13		0,01	
X^2	0,05		1,55		0,60		0,71	

Fonte: Autora (2024)

Quadro 4 – Parâmetros para os modelos cinéticos aplicados na adsorção do VM

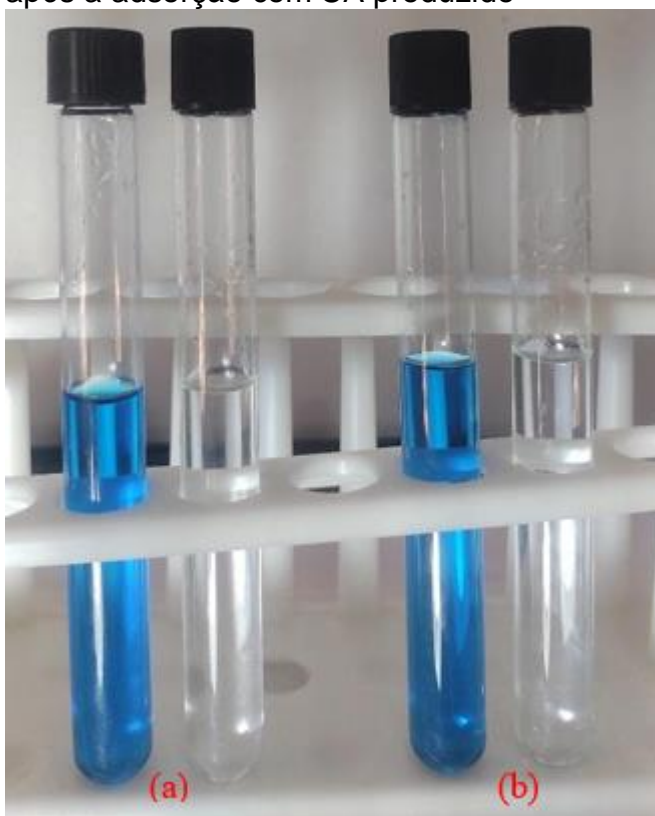
Cinética do Verde Malaquita com CA produzido								
Modelo	PPO		PSO		Difusão intrapartícula		Elovich	
Parâmetros	q_e	24,94 ± 0,02	q_e	24,96 ± 0,02	c	24,65 ± 0,07	α	2,43E24 ± 4,24E24
	k_1	4,35	k_2	2,68 ± 2,19	k_{dif}	0,030 ± 0,01	β	2,46 ± 0,07
R^2	0,01		0,99		0,01		0,78	
X^2	0,99		0,01		0,61		0,13	
Cinética do Verde Malaquita com CA comercial								
Modelo	PPO		PSO		Difusão intrapartícula		Elovich	
Parâmetros	q_e	24,99 ± 0,01	q_e	24,92 ± 0,03	c	24,70 ± 0,07	α	3,36E44 ± 3,375E43
	k_1	1,65 ± 0,11	k_2	-4,47E43 ± 4,83E43	k_{dif}	0,02 ± 0,01	β	4,34 ± 0,01
R^2	0,99		0,44		0,01		0,91	
X^2	1,08E-05		0,76		0,61		0,05	

Fonte: Autora (2024)

O modelo que melhor se ajustou à cinética de adsorção com o carvão ativado comercial foi o modelo de pseudo primeira ordem, que é baseado na capacidade de adsorção do sólido e assume que a velocidade de remoção do adsorvato, em relação ao tempo, é diretamente proporcional à diferença na concentração de saturação e ao número de sítios ativos disponíveis no material adsorvente. O modelo de pseudo segunda ordem, que apresentou o melhor ajuste para o carvão ativado produzido, fundamenta-se em um processo de adsorção química envolve a ação de forças de valência ou troca de elétrons entre o adsorvente e o adsorvato (CARVALHO, 2010).

Na Figura 13, está imagem o efluente sintético de azul de metileno (a) e de verde malaquita (b) antes do tratamento e após o tratamento com o carvão ativado produzido.

Figura 13 – Imagem comparativa dos efluentes sintéticos de AM (a) e VM (b) antes e após a adsorção com CA produzido



Fonte: Autora (2024)

4 CONCLUSÃO

Os resultados das caracterizações do carvão ativado obtido a partir da folha do *Pinus elliottii* apresentaram concordância com a literatura em alguns parâmetros. O adsorvente apresentou um diâmetro de partícula de 151,21 μm , massa específica de 1717,5 kg/m^3 e área superficial de 27,13 m^2/g , valores que não estão em conformidade com os reportados na literatura para carvões ativados obtidos a partir de resíduos agrícolas. Por outro lado, o valor obtido para a massa específica aparente foi de 226,7 kg/m^3 e a porosidade do leito foi de 0,87, encontrando-se dentro da faixa de porosidade indicada pela literatura. Assim como o teor de umidade encontrado, cerca

de 1%, que também está em conformidade com a literatura. As análises de TGA e DRX revelaram que a aplicação de tratamento ácido à matéria-prima e ao adsorvente obtido ocasionou a degradação da celulose. Através das imagens de MEV, foi possível observar que carvão ativado produzido possui uma superfície rugosa e heterogênea tendo uma grande variedade de tamanhos e formatos quanto a estrutura dos poros, sendo distribuídos aleatoriamente.

A análises das cinéticas de adsorção revelaram que a folha do *Pinus elliottii* apresentou resultados satisfatórios quanto ao seu emprego para a remoção de corantes, visto que, foi obtida uma eficiência de 99,95% para o Azul de Metileno e 99,97% para o Verde Malaquita assemelhando-se a eficiência obtida pelo carvão ativado comercial que foi de 99,93% para o Azul de Metileno e 99,98% para o Verde Malaquita.

O equilíbrio de adsorção para o Azul de Metileno utilizando o carvão de Pinus foi alcançado em 15 minutos, enquanto para o carvão ativado comercial o equilíbrio foi atingido em 5 minutos. Para o corante Verde Malaquita, o equilíbrio foi alcançado em 5 minutos tanto com o carvão de Pinus quanto com o comercial. Essa adsorção rápida e eficiente indica um processo altamente convectivo de adsorção.

O modelo que melhor se ajustou à cinética de adsorção para o Azul de Metileno e o Verde Malaquita com o carvão ativado produzido foi o modelo de pseudo segunda ordem. Para o carvão ativado comercial, o modelo que apresentou melhor ajuste foi o de pseudo primeira ordem para ambos os corantes. Esses modelos se destacaram por apresentarem uma regressão significativa, com valores de R^2 elevados e baixos valores de χ^2 , indicando que a transferência de massa por convecção predominou.

Desta forma, pode-se dizer que o carvão ativado produzido possui grande potencial de adsorção apresentando resultados semelhantes ao carvão ativado comercial.

REFERÊNCIAS

ABREU, C. S. A.; SILVA, J. C. L.; OLIVEIRA B. C.; HOLANDA, F. L. Perfis estratégicos de conduta social e ambiental: estudos na indústria têxtil nordestina. **Gestão de Produção**, v. 15, n. 1, p. 159-172, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/gp/a/KnJw9FvD49dntWX B7WNFdKh/?format=pdf>. Acesso em: 03 dez. 2023.

ALMEIDA V C, PEZOTI JR O, CAZETTA A L, SOUZA I P A F, BEDIN K C, MARTINS A C, SILVA T L. Adsorption studies of methylene blue onto ZnCl₂-activated carbon produced from buriti shells (*Mauritia flexuosa* L). **Journal of Ind and Eng Chem** 20: 4401–4407, 2014.

BRILLAS, E.; MARTÍNEZ-HUITLE, C. A. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An update review. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 166-167, p. 203-643, 2015. Disponível em: <https://www.scrip.org/reference/referencespapers?referenceid=2711955> Acesso em: 03 dez. 2023.

CAMARGO, R. S. **Desenvolvimento de material adsorvente do resíduo da casca da acácia negra (*Acacia mearnsii* De Wild) para o branqueamento de óleo de arroz**, 2021. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, 2021.

DEMBOGURSKI, L. S. **Remoção dos poluentes emergentes paracetamol e diclofenaco sódico por adsorção em carvão ativado em pó**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Química, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/200312/001101635.pdf?sequence=1> Acesso em: 03 dez 2024.

FERRARI, L. D. F. **Remoção de corante de efluentes da indústria têxtil utilizando processos com membranas e adsorção em bagaço de laranja**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Maringá, 2010. 166 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Maringá, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Maringá, 2009. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/bitstream/1/3673/1/000178905.pdf> Acesso em: 23 out. 2023.

FRANCO, Marcela Andrea Espina. Adsorção de fármacos em carvão ativado: processo em batelada, leito fixo e modelagem das curvas de ruptura. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – UFRGS. Porto Alegre – RS. 2018.

GEANKOPLIS, C. J. *Transport Processes and Unit Operations*. 3 ed. Englewood Cliffs: P T E Prentice-Hall, 1993.

KIELING, A. G. **Adsorção de BTEX – Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno – em cinza de casca de arroz e carvão ativado**. 2016. 175 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/143762/000997757.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 17 out. 2023.

LIMA, A. *et al.*, Efeito do Solvente sobre as Propriedades Espectroscópicas do Azul de Metileno. **XI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação** – Universidade do Vale do Paraíba, 2007. Disponível em: https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2007/trabalhos/exatas/inic/INICG00047_01C.pdf Acesso em: 07 dez. 2023.

MEHRJOU EI, M., MÜLLER, S., MÖLLER, D. A review on photocatalytic ozonation used for the treatment of water and wastewater. **Chemical Engineering Journal**, v. 263, p. 209-219, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894714015009> Acesso em: 3 nov. 2023.

NASCIMENTO, R. F. do *et al.* **ADSORÇÃO: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Ebook. **Fortaleza: Imprensa Universitária**, 2014. 256 p. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/10267>. Acesso em: 22 dez. 2022.

NOGUEIRA, M. W. **O uso do carvão ativado produzido a partir da casca da Moringa oleifera, como adsorvente na remoção de metais pesados presentes na água.** 2010. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-Graduação Engenharia Ambiental, Área de Concentração - Tecnologias Ambientais, Ouro Preto, 2010. Disponível em: https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/3294/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_UsoCarv%c3%a3oAtivado.pdf Acesso em: 25 nov. 2023.

RAULINO, G. S. C. **Sistema piloto de adsorção de íons de metais em coluna (leito fixo) utilizando como adsorvente o pó da casca de coco verde.** 2011. 110 f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil – Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Ceará, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de concentração – Saneamento Ambiental, Fortaleza, 2011. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/16771/1/2011_dis_gscraulino.pdf Acesso em: 25 nov 2024.

REVELLO, J. H. P. Tingimento de fios têxteis em bobinas - uma abordagem numérica e experimental. 2002. 219 f. Tese (Doutorado em Eng. Química) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/84354> Acesso em: 25 nov 2023.

ROCHA, O. R. S. da.; NASCIMENTO, G. E. do, CAMPOS, N. F. ; SILVA, V. L. da; DUARTE, M. M. M. B. Avaliação do processo adsorptivo utilizando mesocarpo de coco verde para remoção do corante cinza reativo bf-2r. **Revista Química Nova**, v. 35, n. 7, p.1369- 1374, 2012.

SANTOS, A. B.; CERVANTES, F. J.; VAN LIER, J. B. Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: Perspectives for anaerobic biotechnology. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 12, p. 2369–2385, 2007. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17204423>. Acesso em: 17 nov 2024.

SANTOS, M. M. M.; SILVA, J. J.; dos SANTOS, J. H. L.; DUARTE, M. M. M. B. Avaliação do uso de carvão ativado preparado a partir de palha do coqueiro para adsorção de fenol de soluções aquosas. In.: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2014, Florianópolis - SC. **Anais [...]**, 2014. Disponível em: <http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/avaliacao-do-uso-de-carvoativado-preparado-a-partir-de-palha-do-coqueiro-para-adsoro-de-fenol-de-soluesaquosas-17816>. Acesso em: 19 nov 2024.

SILVA, A. T. **Influência da temperatura na adsorção do corante de azul de metileno utilizando serragem de Pinus elliottii como um adsorvente alternativo: um modelo para o tratamento de efluentes têxteis.** 2005. 45 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de pós-graduação em Engenharia Química, Florianópolis, 2005. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/105181/Ariane_Torquato_da_Silva.pdf?sequence=1&isAllowed=y Acesso em: 17 nov 2024.

SILVA, E. O. **Carvão ativado obtido a partir da palha de azevém (*Lolium multiflorum Lam.*) para a adsorção do corante azul de metileno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2019

SOUSA, M. **Adsorção de azul de metileno utilizando carvão ativado produzido a partir do endocarpo do coco babaçu (*Attalea speciosa*)**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Universidade Federal do Pampa, 2018.

SOUSA, M. **Adsorção de azul de metileno utilizando carvão ativado produzido a partir do endocarpo do coco babaçu (*Attalea speciosa*)**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Universidade Federal do Pampa, 2018.

SOUZA, N. B. A. **Adsorção de fármacos a partir do resíduo da casca da acácia-negra (*acácia mearnsii de wild*) moído, tratado e transformado em carvão ativado**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, 2022.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio deste estudo, foi possível evidenciar que o resíduo agrícola da folha do *Pinus elliottii*, quando submetido a tratamentos químicos e físicos, apresenta considerável potencial adsorptivo, que deve ser explorado. O estudo revelou que a matéria-prima utilizada é adequada para produção de carvão ativado e apresentou diâmetro de partícula de 151,21 μm , massa específica de 1717,5 kg/m^3 , área superficial de 27,13 m^2/g , massa específica aparente foi de 226,7 kg/m^3 , porosidade do leito de 0,87 e o teor de umidade cerca de 1%. Análises indicaram degradação da celulose na matéria-prima e após impregnação e pirólise. Através das imagens de MEV, foi possível observar que carvão ativado produzido possui uma grande quantidade de poros de diversos tamanhos e formatos.

A análises das cinéticas de adsorção revelaram que a folha do *Pinus elliottii* apresentou resultados satisfatórios quanto ao seu emprego para a remoção de corantes sintéticos em solução, atingindo mais de 99% de eficiência e assemelhando-se ao carvão comercial que também ultrapassou os 99% de remoção. Nos ensaios de cinética de adsorção o equilíbrio foi atingido rapidamente, em até 15 minutos, indicando a eficiência na remoção dos adsorventes. O modelo que melhor se ajustou à cinética de adsorção para o Azul de Metileno e o Verde Malaquita com o carvão ativado produzido foi o modelo de pseudo segunda ordem. Para o carvão ativado comercial, o modelo que apresentou melhor ajuste foi o de pseudo primeira ordem para ambos os corantes, esses modelos confirmaram que a transferência de massa por convecção predominou na adsorção.

Desta forma, pode-se dizer que o carvão ativado produzido possui grande potencial de adsorção apresentando resultados semelhantes ao carvão ativado comercial e deve ser melhor explorado.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se que para os trabalhos futuros sobre este tema sejam abordados os seguintes itens:

1. Realizar ensaios de isoterma;
2. Realizar ensaios cinéticos com variação de temperatura;
3. Realizar estudos do pH do ponto de carga zero;
4. Realizar ensaios de dessorção.

REFERÊNCIAS

ABIT - Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção – **Perfil do setor**. 2023 Disponível em: <https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>. Acesso em: 13 dez. 2023.

ABREU, C. S. A.; SILVA, J. C. L.; OLIVEIRA B. C.; HOLANDA, F. L. Perfis estratégicos de conduta social e ambiental: estudos na indústria têxtil nordestina. **Gestão de Produção**, v. 15, n. 1, p. 159-172, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/gp/a/KnJw9FvD49dntWX B7WNFdkh/?format=pdf>. Acesso em: 03 dez. 2023.

ANTUNES, M. L. P.; CAMARGO, S. R. G.; JESUS, C. P.; RUSSO A. C. Estudo da utilização de serragem de madeira como adsorvente para tratamento de efluentes têxteis. **Revista de Estudos Ambientais (Online)**, Sorocaba, v. 12, n. 2, p. 6-14, jul./dez. 2010. Disponível em: <https://proxy.furb.br/ojs/index.php/rea/article/view/1697> Acesso em: 17 out. 2023.

ARSLAN-ALATON, I.; GURSOY, B. H.; SCHMIDT, J. E. Advanced oxidation of acid and reactive dyes: Effect of Fenton treatment on aerobic, anoxic and anaerobic processes. **Dyes and Pigments**, v. 78, p. 117-130, 2008 Disponível em: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/advanced-oxidation-of-acid-and-reactive-dyes-effect-of-fenton-tre> Acesso em: 25 nov. 2023

BEHRENDTS, S. L. Utilização da cinza da casca de arroz como adsorvente na remoção de paracetamol. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Química, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/200316> Acesso em: 13 dez. 2023.

BRILLAS, E.; MARTÍNEZ-HUITLE, C. A. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An update review. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 166-167, p. 203-643, 2015. Disponível em: <https://www.scrip.org/reference/referencespapers?referenceid=2711955> Acesso em: 03 dez. 2023.

CAMARGO, R. S; *et al.* **DESENVOLVIMENTO DE MATERIAL ADSORVENTE DO RESÍDUO DA CASCA DA ACÁCIA- NEGRA (ACÁCIA MEARNSII DE WILD) PARA BRANQUEAMENTO DE ÓLEO DE ARROZ**. 2021. – Universidade Federal do Pampa, [s. l.], 2021. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/riu/5845>.

CARDOSO, Carlos Magno. **Estudo da remoção de contaminantes emergentes em meio aquoso por carvão ativado alternativo com cascas do fruto Jatobá (Hymenaea stigonocarpa Mart.), utilizando sistema combinado CA-MO**. 2020. Tese (Doutorado em Tecnologias Químicas e Biológicas) – Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Químicas e Biológicas, Brasília, 2020. Disponível em:

http://icts.unb.br/jspui/bitstream/10482/43025/1/2020_CarlosMagnoMarquesCardoso.pdf. Acesso em: 03 dez. 2023.

COSTA, Patricia D.; FURMANSKI, Luana M.; DOMINGUINI, Lucas. Produção, Caracterização e Aplicação de Carvão Ativado de Casca de Nozes para Adsorção de Azul de Metileno. **Revista Virtual de Química**, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 1272–1285, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/1984-6835.20150070>.

DE SOUZA, M. A.; MAGALHÃES, D. R. Preparação de carvão ativado a partir de pinus caribaea e avaliação do poder adsorvente frente a soluções de azul de metileno. 2017 IFNMG – Montes Claros, **57º Congresso Brasileiro de Química** Disponível em: <https://www.abq.org.br/cbq/2017/trabalhos/12/12476-25161.html>. Acesso em: 13 dez. 2023.

DEMBOGURSKI, L. S. **Remoção dos poluentes emergentes paracetamol e diclofenaco sódico por adsorção em carvão ativado em pó**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Química, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <http://connepi.ifal.edu.br/ocs/index.php/connepi/CONNEPI2010/paper/viewFile/1280/821> Acesso em: 03 dez. 2023. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/200312/001101635.pdf?sequence=1> Acesso em: 03 dez. 2023.

DOS REIS, Glaydson Simões *et al.* Activated carbon from sewage sludge for removal of sodium diclofenac and nimesulide from aqueous solutions. **Korean Journal of Chemical Engineering**, [s. l.], v. 33, n. 11, p. 3149–3161, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11814-016-0194-3>.

DUTRA, D. K. R. **Obtenção de carvão ativado a partir do resíduo de casca do eucalipto branco** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) Universidade do Vale do Taquari, Departamento de Química Industrial, Lajeado, 2021. Disponível em: <https://www.univates.br/bduserver/api/core/bitstreams/51097ddf-9044-4b68-b82e-19d050eac0b5/content> Acesso em: 03 dez. 2023.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária **O Pinus** 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/pinus>. Acesso em: 13 dez. 2023.

EZZEDDINE, Z.; GENER, I. B.; POUILLOUX, Y.; HAMAD, H. Removal of methylene blue by mesoporous CMK-3: kinetics, isotherms and thermodynamics. **Journal of Molecular Liquids**, 223, p. 763 –770, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/307997597_Removal_of_methylene_blue_by_mesoporous_CMK-3_Kinetics_isotherms_and_thermodynamics Acesso em: 13 dez. 2023.

FABRÍCIO, T. N. R.; BRAGA M. A.; GOMES, T. R. S.; VASCONCELOS, A. K. P.; AQUINO, M. D.; ARAÚJO, R. Produção de Biossurfactante e Biodegradação no Cultivo de *Geobacillus stearothermophilus* com Corante Azul de Metileno. **V CONNEPI – Congresso Norte-Nordeste de Pesquisa e Inovação**, 2010.

FERNANDES, A. C. P.; CUNHA, D. V.; CRAVEIRO, I. P. C. et al. **ADSORÇÃO DE EFLUENTES TEXTÉIS: tratamento de efluentes da indústria têxtil por adsorção em materiais de baixo custo**. Relatório de projeto. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.

FERNANDES, R. **Adsorventes alternativos para remoção de fenol em solução aquosa**. 2005. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Florianópolis, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/102154/221031.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 23 out. 2023.

FERRARI, L. D. F. **Remoção de corante de efluentes da indústria têxtil utilizando processos com membranas e adsorção em bagaço de laranja**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Maringá, 2010. 2009. 166 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Maringá, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Maringá, 2009. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/bitstream/1/3673/1/000178905.pdf> Acesso em: 23 out. 2023.

FÔNSECA, M. C. **Avaliação da Adsorção de Fármacos presentes em Amostras Aquosas usando Biocarvão de Bagaço de Cana-de-Açúcar**, 2020. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual Paulista, Programa de Pós-Graduação em Química, Araraquara, 2020. Disponível em: https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=9396349

FRANCO, Marcela Andrea Espina. Adsorção de fármacos em carvão ativado: processo em batelada, leito fixo e modelagem das curvas de ruptura. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – UFRGS. Porto Alegre – RS. 2018.

GRODSKY, S. M.; MOORMAN, C. E.; FRITTS, S. R.; HAZEL, D. W.; HOMYACK, J. A.; CASTLEBERRY, S. B.; WIGLEY, T. B. Supplying renewable energy for Canadian cement production: Lifecycle assessment of bioenergy from forest harvest residues using mobile fast pyrolysis units. **Forest Ecology Manager**, 379, 91–101.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. Fixação do Corante A forma de fixação da molécula do corante a essas fibras geralmente é feita em solução aquosa e pode envolver basicamente. **Química Nova**, 23(1), 71–78, 1999. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/Hn6J5zNqDxVJwX495d4fnLL/?lang=pt> Acesso em: 17 out. 2023.

HAMEED, B. H.; AHMAD, A. L.; LATIFF, K. N. A. Adsorption of basic dye (methylene blue) onto activated carbon prepared from rattan sawdust. **Dyes and Pigments**, v. 75, n. 1, p.143-149, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/223175767_Adsorption_of_Basic_Dye_Methylene_Blue_onto_Activated_Carbon_Prepared_from_Rattan_Sawdust Acesso em: 07 nov. 2023

HONORATO, A. C.; MACHADO, J. M.; CELANTE, G.; BORGES, W. G. P.; DRAGUNSKI, D.C.; CAETANO, J. Biossorção de azul de metileno utilizando resíduos agroindustriais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. V. 19, n. 7, p. 705–710, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/F5VhQx5cH8GHRQDMZTsznNM/> Acesso em: 07 dez. 2023.

HORVAT, A. J. M.; PETROVIC, M.; BABIC, S.; PAVLOVIC, D. M.; ASPERGER, D.; PELKO, S.; MANCE, A. D.; KASTELAN-MACAN, M. Analysis, occurrence and fate anthelmintcs and their transformation products in the environment. **Trends in Analytical Chemistry**, v. 31, p. 61-24, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165993611002937> Acesso em: 07 dez. 2023.

KIELING, A. G. **Adsorção de BTEX – Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno – em cinza de casca de arroz e carvão ativado**. 2016. 175 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/143762/000997757.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 17 out. 2023.

KON, A.; COAN, D. C. Transformações da indústria têxtil brasileira: a transição para a modernização. **Revista de Economia Mackenzie**, ano 3, n. 3, p. 11-34, 2005. Disponível em: <https://editorarevistas.mackenzie.br/index.php/rem/article/view/774/461> Acesso em 29 nov. 2023

LANGE, C. R. **Estudo das condições operacionais do processo de tingimento de fibra mista acrílico/algodão em bobina cruzada**. 2004 135 f. Dissertação (Mestrado em Eng. Química) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/87736/212405.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 07 nov. 2023

LEITE, B. M. **Adsorção de paracetamol e ácido acetilsalicílico em fibras de carbono ativada e carvões ativados**. 2018. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Maringá, Programa de pós-graduação em Engenharia Química, Maringá, 2018. Disponível em: http://repositorio.uem.br:8080/jspui/bitstream/1/6296/1/Beatriz%20Meneguello%20Leite_2018.pdf Acesso em: 3 nov. 2023.

LERMEN, A. M. **Adsorção do corante azul de metileno em carvão ativado produzido a partir da pinha de Pinus taeda**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) Universidade Federal da Fronteira Sul, Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, Cerro Largo, 2017. Disponível em: <https://rd.uffs.edu.br/bitstream/prefix/1720/1/LERMEN.pdf> . Acesso em: 13 dez. 2023.

LIMA, A. *et al.*, Efeito do Solvente sobre as Propriedades Espectroscópicas do Azul de Metileno. **XI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação** – Universidade do Vale do

Paraíba, 2007. Disponível em: https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2007/trabalhos/exatas/inic/INICG00047_01C.pdf Acesso em: 07 dez. 2023.

LISBOA, S. A. A. **A organização da indústria têxtil brasileira no contexto internacional**. Monografia (Graduação em Economia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Economia, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: https://www.econ.puc-rio.br/uploads/adm/trabalhos/files/Sofia_Albuquerque_Anicet_Lisboa.pdf Acesso em: 3 nov. 2023.

LUNARDI, L. M. Remoção de corantes têxteis por adsorção com pó de serragem de pinus sp. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Civil, Campo Mourão, 2014. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6190/3/CM_COECI_2014_1_17.pdf. Acesso em: 13 dez. 2023.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit operations of Chemical engineering**. 5. ed. Boston: McGraw-Hill, 1993.

MEHRJOUEI, M., MÜLLER, S., MÖLLER, D. A review on photocatalytic ozonation used for the treatment of water and wastewater. **Chemical Engineering Journal**, v. 263, p. 209-219, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894714015009> Acesso em: 3 nov. 2023.

MERCK CHEMICALS - **Azul de Metileno**. 2023 Disponível em: https://www.merckmillipore.com/BR/pt/product/Methylene-blue-C.I.-52015,MDA_CHEM-159270#documentation . Acesso em: 15 nov 2013.

MORAIS, R. M.; SANTANA, G. M.; LELIS, R. C. C.; SCHUELER, V. E.; MORBECK, F. L.; PAES, J. B. Produção de carvão ativado a partir de Eucalyptus dunnii para adsorção de corante azul de metileno **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)** v. 10, p. 78-87, 2019 Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/cienciadamadeira/article/view/13560> Acesso em: 25 nov. 2023.

MOREIRA, D. N. **Desenvolvimento de adsorventes naturais para tratamento de efluentes de galvanoplastia**. 2010. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <https://tede2.pucrs.br/tede2/handle/tede/3158> Acesso em: 25 nov. 2023.

MÜLLER, L. C.; ALVES, .A. A. A.; MONDARDO, R. I., SENS. M. L. Adsorção do azul de metileno em serragem de Pinus elliottii (pinus) e Drepanostachyum falcatum (bambu). **Engenharia sanitária e ambiental**, v. 24, n. 4, p. 687–695, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/Bq98m83rpVvW4pWBKKBJLWB/abstract/?lang=pt> Acesso em 11 dez. 2023

NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: **Imprensa Universitária**, 2014, 256 p. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/10267/1/2014_liv_rfdnascimento.pdf Acesso em: 25 nov. 2023.

NOGUEIRA, M. W. **O uso do carvão ativado produzido a partir da casca da Moringa oleifera, como adsorvente na remoção de metais pesados presentes na água.** 2010. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-Graduação Engenharia Ambiental, Área de Concentração - Tecnologias Ambientais, Ouro Preto, 2010. Disponível em: https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/3294/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_UsoCarv%c3%a3oAtivado.pdf Acesso em: 25 nov. 2023.

OLIVEIRA Giulyani Félix. Produção de carvão ativado a partir do pecíolo do babaçu. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia – UFGD. Dourados, 2016.

OLIVEIRA, R. F. Estudo da adsorção de cromo hexavalente em altas concentrações. 2013. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/96390> Acesso em 11 dez. 2023

PATHANIA, D.; SHARMA, S.; SINGH, P. Removal of methylene blue by adsorption onto activated carbon developed from Ficus carica bast. **Arabian Journal of Chemistry**, 10, p. 1445 – 1451, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187853521300110X> Acesso em: 25 nov. 2023.

PERUZZO, L. C. Influência de agentes auxiliares na adsorção de corantes de efluentes da indústria têxtil em colunas de leito fixo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2003. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/85622> Acesso em 11 dez. 2023

PINCELLI, A. L. S. M; MOURA, L. F.; BRITO, J. O. Quantificação dos resíduos da colheita em florestas de Eucalyptus grandis e Pinus caribaea var. hondurensis **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 115, p. 519-526, 2017. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr115/cap09.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2023.

POGGERE, P. A., DAVIS, R., MONTANHER, S. F., LOBO, V. S. Azul de Metileno: Propriedades e tratamentos. III ENDICT, UFTPR, Toledo, 2011.

PONTES, S. M. A.; AFONSO, D. G.; NASCIMENTO, D. L. Análise comparativa das propriedades físico-mecânicas da madeira de galho e fuste de 02 espécies florestais com potencial madeireiro. In: IV **Congresso Florestal Paranaense**. Anais eletrônicos. Curitiba UFPR, 2012. Disponível em: <http://malinovski.com.br/CongressoFlorestal/Trabalhos/06-Tecnologia/TPF-Artigo-02.pdf>. Acesso em: 02 dez 2023.

RAULINO, G. S. C. **Sistema piloto de adsorção de íons de metais em coluna (leito fixo) utilizando como adsorvente o pó da casca de coco verde.** 2011. 110 f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil – Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Ceará, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área

de concentração – Saneamento Ambiental, Fortaleza, 2011. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/16771/1/2011_dis_gscraulino.pdf Acesso em: 25 set. 2023.

REVANKAR, M. S.; LELE, S. S. Synthetic dye decolorization by *Ganoderma* sp. WR-1. *Bioresourse Technology*, v. 98, p. 775-780, 2007. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16730976/> Acesso em: 02 dez 2023.

REVELLO, J. H. P. Tingimento de fios têxteis em bobinas - uma abordagem numérica e experimental. 2002. 219 f. Tese (Doutorado em Eng. Química) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/84354> Acesso em: 25 set. 2023.

SANTOS, A. B.; CERVANTES, F. J.; VAN LIER, J. B. Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: Perspectives for anaerobic biotechnology. **Bioresourse Technology**, v. 98, n. 12, p. 2369–2385, 2007. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17204423>. Acesso em: 19 nov 2024.

SANTOS, A. B.; CERVANTES, F. J.; VAN LIER, J. B. Impacto dos mediadores redox na remoção de cor de corantes azo e antraquinônico por lodo granular anaeróbio sob condições mesofílicas e termofílicas. **Engenharia Sanitária e Ambiental - Campo Grande - MS**, v.12, n.1, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/Sjnnfnj6cbcLb4vBmRrzpGz/?format=pdf&lang=pt> Acesso em: 11 dez. 2023

SANTOS, E. B.; VIEIRA, E. F. S.; CESTARI, A. R.; BARRETO, L. S. Caracterização de escamas do peixe piau (*Leporinus elongatus*) e sua aplicação na remoção de Cu(II) de meio aquoso. **Química Nova**, Vol. 32, N. 1, p. 134-138, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/mNQWw6ZFWpPzWbGwS8k9LC/> Acesso em: 11 out. 2023.

SANTOS, M. M. M.; SILVA, J. J.; dos SANTOS, J. H. L.; DUARTE, M. M. M. B. Avaliação do uso de carvão ativado preparado a partir de palha do coqueiro para adsorção de fenol de soluções aquosas. In.: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2014, Florianópolis - SC. **Anais [...]**, 2014. Disponível em: <http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/avaliacao-do-uso-de-carvoativado-preparado-a-partir-de-palha-do-coqueiro-para-adsoro-de-fenol-de-soluesaquosas-17816>. Acesso em: 19 nov 2024.

SANTOS, W. S.; ROCHA, R. D. C. Utilização de adsorventes naturais (pinha de *Pinus taeda*) no processo de remoção do corante laranja reativo. **Revistas UTFPR**, Pato Branco, v. 10, n. 1, p. 123–130, 2015. Disponível em: <https://revistas.utfpr.edu.br/pb/index.php/SysScy/issue/view/102> Acesso em: 11 dez. 2023

SILVA, A. T. **Influência da temperatura na adsorção do corante de azul de metileno utilizando serragem de *Pinus elliottii* como um adsorvente alternativo: um modelo para o tratamento de efluentes têxteis**. 2005. 45 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de pós-graduação em Engenharia Química, Florianópolis, 2005.

Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/105181/Ariane_Torquato_da_Silva.pdf?sequence=1&isAllowed=y Acesso em: 17 nov. 2023.

SILVA, J. **Estudo da eficiência e da aplicabilidade de carvão ativado resultante de pirolise de casaca de arroz em barreiras reativas na remoção de contaminantes em solo.** Tese, Doutorado em engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2009

SOUSA, F. W. **Adsorção de metais tóxicos em efluente aquoso usando o pó da casca de coco verde tratado.** 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil – Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Ceará, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de concentração – Saneamento Ambiental, Fortaleza, 2007. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/2189/1/2007_dis_fwsousa.pdf Acesso em: 13 out. 2023.

TORRELLAS, Silvia Álvarez et al. Chemical-activated carbons from peach stones for the adsorption of emerging contaminants in aqueous solutions. **Chemical Engineering Journal**, v. 279, p. 788-798, 2015.

VALERI; S. V.; DE PAULA, R. C. **Síntese das principais características do gênero *Pinus*.** 2009. Disponível em: <https://www.fcav.unesp.br/Home/departamentos/producaovegetal/SERGIOVALIENGOVALERI/sintese-principais-caracteristicas-genero-pinus1.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2023.

ZOLLINGER H. **Color chemistry: syntheses, properties and applications of organic dyes and pigments.** 2.ed. rev. Weinheim, VCH, 1991.