

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO PROVENIENTE DO BAGAÇO DE MALTE
PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES PROVENIENTE DA INDÚSTRIA TEXTIL
UTILIZANDO COMO ATIVANTE K_2CO_3**

Roberto Gomes Maia
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

ROBERTO GOMES MAIA

**PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO PROVENIENTE DO BAGAÇO DE MALTE
PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES PROVENIENTE DA INDÚSTRIA TEXTIL
UTILIZANDO COMO ATIVANTE K_2CO_3**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Rita de C. S. de Sousa

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

M217p
2025

Maia, Roberto Gomes, 1981-

Produção de carvão ativado proveniente do bagaço de malte para tratamento de efluentes provenientes da indústria têxtil utilizando K_2CO_3 como agente ativante / Roberto Gomes Maia. – Viçosa, MG, 2025.

1 dissertação eletrônica (77 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Rita de Cássia Superbi de Sousa.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Química, 2025.

Referências bibliográficas: f. 67-77.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.217>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Carvão vegetal - Testes. 2. Carbono ativado. 3. Malte. 4. Adsorção. 5. Corantes. 6. Microscopia eletrônica. 7. Espectroscopia de infravermelho. I. Sousa, Rita de Cássia Superbi de, 1983-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDD 22. ed. 662.74

ROBERTO GOMES MAIA

**PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO PROVENIENTE DO BAGAÇO DE MALTE
PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES PROVENIENTE DA INDUSTRIA TEXTIL
UTILIZANDO COMO ATIVANTE K₂CO₃**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 24 de fevereiro de 2025.

Assentimento:

Roberto Gomes Maia
Autor

Rita de Cassia Superbi de Sousa
Orientadora

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 08/05/2025 às 18:29:35 e pela orientadora em 15/05/2025 às 10:33:52. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **ITCT.7ZED.QNPA** e clique no botão 'Validar documento'.

Dedico esse trabalho a Deus, pois sem Ele não teria capacidade para desenvolver e concluir meu estudo. Em especial a minha esposa Luana Thays Macedo Soares e á Maria Santíssima .

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Raimundo e Geni, devo um reconhecimento especial por todo o apoio e suporte que me proporcionaram nesta jornada. Eles me incentivaram, abençoaram e sustentaram minha vida em suas orações, demonstrando amor, segurança e confiança. Sou grato por tê-los ao meu lado, pois sem eles tudo seria mais difícil;

Agradeço também a minha irmã, Andreia , que sempre estive presente para me ajudar em todas as situações;

Aos meus fiéis amigos, que sempre comemoram minhas conquistas e estão ao meu lado, são pessoas essenciais em minha vida. Sua amizade é de grande valor e sou grato por tê- los comigo;

À Professora Rita de Cássia Superbi de Sousa , expresse minha gratidão por sua orientação, profissionalismo e incentivo ao longo desta jornada de pós-graduação;

Ao meu co-orientador Wagner Luís da Silva Faria minha gratidão pelo apoio em todo período da pós-graduação .

Gostaria de expressar minha sincera gratidão aos membros da banca examinadora, composta pelos professores André Pereira Rosa e Alexandre Fontes Pereira, que generosamente aceitaram participar e colaborar com esta dissertação. Sua contribuição é de extrema importância para o desenvolvimento do meu trabalho;

Meus agradecimentos se estendem aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, que proporcionaram um ambiente de aprendizado pessoal e profissional enriquecedor;

Sou muito grato à Universidade Federal de Viçosa por tornar possível a realização deste mestrado, fornecendo as condições necessárias para o meu crescimento acadêmico;

Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho. Seja por meio de apoio, orientação ou incentivo, cada contribuição foi valiosa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Tudo o que a sua mão encontrar para fazer, faça-o com todo o seu coração.
Eclesiastes 9:10-12

RESUMO

MAIA, Roberto Gomes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2025. **PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO PROVENIENTE DO BAGAÇO DE MALTE PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES PROVENIENTE DA INDÚSTRIA TEXTIL UTILIZANDO COMO ATIVANTE K_2CO_3** . Orientadora: Rita de Cassia Superbi de Sousa.

Carvões ativados podem ser produzidos a partir de uma variedade de materiais à base de carbono. O bagaço de malte se apresenta como uma matéria-prima promissora para a produção de carvão ativado devido à sua alta disponibilidade e baixo custo. A ativação aumenta a capacidade de adsorção, permitindo que o material de carbono seja usado em vários tratamentos, como a remoção de corantes usados na indústria têxtil, exemplificado pelo corante azul reativo BF-5G (C.I Reactive Blue 203). O Ponto de Carga Zero (pHPZC) é usado para indicar o comportamento do material de acordo com o pH do meio, determinado em 6,28. Os métodos de caracterização empregados incluíram Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difração de Raios X (XRD) e Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) foram conduzidas para caracterizar e identificar modificações estruturais no material de carbono. O método de área de superfície Brunauer-Emmet-Teller (BET) demonstrou que a área de superfície aumentou após ativação com K_2CO_3 , de $1,35 \text{ m}^2/\text{g}$ do bagaço de malte para $3,503 \text{ m}^2/\text{g}$ do carvão ativado no ponto 12 do planejamento fatorial. As isotermas de adsorção são essenciais para otimizar o uso de adsorventes; os modelos de isotermas usados neste estudo incluem as equações de Langmuir, Tenkin e Freundlich, que forneceram resultados de eficiência de adsorção, alcançando isoterma de Langmuir ($q_{\text{Max}} = 397,4 \text{ mg/g}$). Esse estudo apresenta, pela primeira vez, o uso de biomassa de bagaço de malte para produzir carvão ativado com K_2CO_3 como adsorvente sólido para o corante azul reativo BF-5G.

Palavras-chave: carvão vegetal, Adsorção, Azul reativo BF-5G, Carbonato de potássio

ABSTRACT

MAIA, Roberto Gomes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2025. **PRODUCTION OF ACTIVATED CARBON FROM MALT BAGASSE FOR TREATMENT OF EFFLUENTS FROM THE TEXTILE INDUSTRY USING K₂CO₃ AS ACTIVATOR.** Adviser: Rita de Cassia Superbi de Sousa.

Activated carbons can be produced from a variety of carbon-based materials. Malt bagasse emerges as a promising raw material for activated carbon production due to its high availability and low cost. Activation enhances adsorption capacity, allowing the carbon material to be used in various treatments, such as the removal of dyes used in the textile industry, exemplified by the reactive blue dye BF-5G (C.I. Reactive Blue 203). The Point of Zero Charge (pHPZC) is used to indicate the material's behavior according to the pH of the medium, determined to be 6.28.

The characterization methods employed included Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray Diffraction (XRD), and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), which were conducted to analyze and identify structural modifications in the carbon material. The Brunauer-Emmett-Teller (BET) surface area method demonstrated that the surface area increased after activation with K₂CO₃, from 1.35 m²/g for malt bagasse to 3.503 m²/g for activated carbon at point 12 of the factorial design. Adsorption isotherms are essential for optimizing the use of adsorbents; the isotherm models used in this study included the Langmuir, Temkin, and Freundlich equations, which provided adsorption efficiency results, with the Langmuir isotherm yielding a maximum adsorption capacity (q_{Max}) of 397.4 mg/g. This study presents, for the first time, the use of malt bagasse biomass to produce activated carbon with K₂CO₃ as a solid adsorbent for the reactive blue dye BF-5G.

Keywords: activated carbon, adsorption, reactive blue BF-5G, potassium carbonate

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - fluxograma da produção industrial da cerveja	18
Figura 2 apresenta o gráfico do crescimento das cervejarias nos últimos dez anos.	19
Figura 3 - Estrutura corante fornecido pela indústria Texpal Química Ltda	33
Figura 4 - Estrutura molecular do corante azul reativo BF 5G.....	33
Figura 5 – Fluxograma de produção de carvão ativado.....	35
Figura 6 - Bagaço de Malte Seco.....	43
Figura 7 - Resultado da Carbonização	44
Figura 8 - Curva de Analítica para o azul reativo BF-5.....	44
Figura 9 – Diagrama de Pareto: Influência das variáveis e de suas interações sobre as variáveis de resposta	46
Figura 10 – Superfície de resposta.....	49
Figura 11 - Carvão ativado do ponto 12 do planejamento fatorial	50
Figura 12 - MEV do bagaço de malte em: a) em 1.000x; b) em 8.000x.....	51
Figura 13 - MEV do carvão não ativado em: 8000x.....	52
Figura 14 - MEV do carvão ativado no ponto 12 em : a) em 15.000x ; b) em 8.000x.....	53
Figura 15 - DXR do carvão ativado, bagaço de malte e do carbonizado.....	54
Figura 16 - FTIR do carvão ativado, bagaço de malte e do carbonizado	55
Figura 17 – Ponto de Carga Zero do Carvão Ativado	59
Figura 18 - Modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem (PPO), pseudo-segunda ordem (PSO) ajustados aos dados experimentais obtidos para adsorção do azul reativo BF-5G com o carvão.....	60
Figura 19 – Isotermas de adsorção do corante no carvão ativado	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 : Tipos de carbonização	21
Tabela 2 - Níveis e variáveis dos fatores	38
Tabela 3 - Ensaio para o planejamento fatorial	38
Tabela 4 . Rendimentos de adsorção em cada ponto do planejamento fatorial	45
Tabela 5 – Estimativa dos coeficientes de regressão do modelo para as variável resposta	47
Tabela 6 – Anova gerada pelo softwer Statistica7	48
Tabela 7 - Propriedades texturais do bagaço de malte seco, do carvão neutro e do carvão após a ativação.	57
Tabela 8 - Resultado do experimento de Ponto de Carga Zero do Carvão Ativado	58
Tabela 9 - Resultado do Ensaio de pH realizado	59
Tabela 10 . Parâmetros cinéticos da adsorção do corante azul reativo BF-5G	61
Tabela 11 . Parâmetros dos modelos de Langmuir, Freundlich e Temkim	63
Tabela 12 . Capacidade máxima de adsorção de corantes reativos BF-5G com diferentes adsorventes	64

LISTA DE SIGLAS

EUA	- Estados Unidos da América
MAP	- pirólise assistida por micro-ondas (MAP),
MEV	- microscopia eletrônica de varredura
FTIR	- Infravermelho com Transformada de Fourier
PHPCZ	- ponto de Carga Zero
DCCR	- planejamento composto central rotacional
BET	- Brunauer-Emmett-Teller
TP	- Temperatura de pirólise
RI	- Razão de impregnação
TA	- Tempo de ativação
DQO	- Demanda química de oxigênio
nm	- nanômetros
rpm	- Rotações por minutos
(HTC)	- hidrotérmica
M	- Bagaço de malte
CA	- Carvão ativado
CN	- Carbonizado
BM	- Bagaço de Malte
RI	- Razão de impregnação
MP	- Material precursor
RPM	- Rotações por minuto
SQ	- Soma dos quadrados
GL	- Grau de liberdade
MQ	- Média dos quadrados
SSR	- Somatório do quadrado dos resíduos

Sumário

1. INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo geral	16
2.2 Objetivos específicos	16
3. REVISÃO DE LITERATURA	17
3.1. Bagaço de Malte	17
3.1.2 Carbonização	20
3.1.3 Ativação química	22
3.1.4 Adsorção	23
3.1.5. Modelos Cinéticos de Pseudo-Primeira e Pseudo-Segunda Ordens	25
3.2. Isotermas de adsorção	26
3.2.1 Isoterma de Langmuir	26
3.2.2 Isoterma de Freundlich	26
3.2.3. Isoterma de Temkin	27
3.3 Caracterização do Carvão Ativado	27
3.3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	27
3.3.2 Difratomia de Raios X (DRX)	28
3.3.3 Espectroscopia no Infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR)	29
3.3.4 Isotermas de BET	30
3.4 Efluentes da Indústria Têxtil	31
3.4.1 Corantes têxteis	31
3.4.2 Corante BF-5G (C.I Reactive Blue 203)	32
4 MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1 Obtenção e preparo do bagaço de malte e do corante	34
4.2 Etapas de Produção do Carvão Ativado	34
4.3 Curva de Analítica do corante	36
4.4 Ensaios de Adsorção	36
4.5 Planejamento Fatorial	37
4.6 Ensaio do pH	38
4.7 Caracterização do Carvão Ativado	39
4.7.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	39
4.7.2 Difratomia de Raios X (DRX)	40

4.7.3 Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR)	40
4.7.4 Área superficial BET	41
4.7.5 Ponto de Carga Zero	41
4.7.6 Cinética de Adsorção	41
4.7.7 Isotermas de Adsorção	42
4.7.8 Cálculo do rendimento do bagaço de Malte	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1 Bagaço de Malte e Carvão Vegetal Produzido	42
5.2 Ensaio de Adsorção	44
5.3. Caracterização do Carvão Ativado	50
5.3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (ME)	50
5.3.2 Difractometria de Raios X (DRX)	53
5.3.3 Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR)	55
5.3.4 Área superficial BET	56
5.3.5 Ponto de Carga Zero.	57
5.4. Ensaio de pH	59
5.4.1 Cinética de Adsorção	60
5.4.2 Isotermas de adsorção	61
6. CONCLUSÃO	65
7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	66
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

1. INTRODUÇÃO

No Brasil mercado cervejeiro cresce a cada ano, o número de estabelecimentos da indústria cervejeira registrados em 2023, segundo Anuário da Cerveja 2024 (Brasil,2024), teve uma expansão de 6,8% com 118 cervejarias em relação ao ano anterior, somando 1847 em 2023, o que representa o 8º maior aumento da série histórica em números absolutos, e o bagaço de malte é o principal subproduto da indústria cervejeira, conseqüentemente crescendo o volume de produção desta biomassa .

Dessa forma, o bagaço de é um subproduto oriundo da produção de cerveja, que é uma bebida fermentada possui elevado volume de produção e consumo, tendo como uma das mais importantes matérias primas o malte de cevada, um material rico em amido, que a cada 100 litros produzidos de cerveja são gerados em torno de 20 kg de bagaço biomassa que com aumento das cervejarias a disponibilidade dessa biomassa aumenta e aumenta também a necessidade de aproveitar esse grande volume de produção , além do seu principal destino , a alimentação animal alternativas como a produção de carvão ativado vem ganhando destaque (Juchen *et al.*, 2018).

Nesse sentido , com crescimento da demanda para produção de carvão ativado, por poder ser aplicado em vários tratamentos de poluentes industriais, e a vantagem do carvão poder ser produzido a partir de uma grande variedade de biomassa, como o bagaço de malte (Mildenberg , 2019).

Portanto, o carvão ativado é um adsorvente que possui grande área superficial porosa, termoestabilidade e baixa reatividade ácido/base, razões que motivam o recebimento de grande atenção atualmente (Yuan *et al.*, 2020). Esse material oferece aplicações no controle da poluição do ar, recuperação de solventes, processamento de alimentos, indústrias químicas e farmacêuticas, tratamento de águas residuárias com (corantes, metais pesados, detergentes, herbicidas, pesticidas e hidrocarbonetos poliaromáticos), recuperação de metais, catálise, bem como na melhoria do odor e sabor (Zhang *et al.*, 2018; Singh *et al.*, 2023).

Os carvões ativados podem ser produzidos a partir de uma variedade de materiais com base de carbono (Zhang *et al.*, 2018). A escolha da matéria prima para o carvão depende, em grande parte, de sua disponibilidade, custo e pureza, mas o processo de fabricação e a aplicação pretendida do produto também são considerações importantes (Yuan *et al.*, 2020). Por conseguinte, a biomassa precursora deve ser renovável, amplamente disponível, barata e menos ofensiva ao meio ambiente como o bagaço de malte (Yuan *et al.*, 2020).

Neste contexto , o carvão pode ser ativado de forma física ou química, com o objetivo de

melhorar a sua porosidade e área superficial (Singh *et al.*, 2022). A ativação química é amplamente utilizada, com grande diversidade de compostos químicos para ativação, como os compostos químicos com potássio, sendo o mais utilizado o KOH, que gera uma ampla gama de carbonos porosos com diferentes características físico-químicas (Singh *et al.*, 2019). Entretanto possui a desvantagem de sofrer limitações quanto à sua corrosividade, causando deterioração do equipamento e toxicidade ao meio ambiente, fatores que leva estudos com outros sais de potássio como o carbonato de potássio (K_2CO_3), buscando diminuir os efeitos danosos ao meio ambiente causado pelo hidróxido de potássio (Singh *et al.*, 2023).

Os compostos químicos à base de potássio têm ganhado atenção, além do KOH, devido ao seu efeito semelhante sobre a porosidade dos carbonos porosos e efeitos prejudiciais menores ou nulos sobre o meio ambiente (Yuan *et al.*, 2020). Dentre eles, o carbonato de potássio (K_2CO_3), bicarbonato de potássio ($KHCO_3$) e acetato de potássio ($K_3C_6H_5O_7$) (Mondal *et al.*, 2017). Estes compostos químicos com potássio, geram propriedades relevantes para ativação de carvões, demonstram grande potencial para uso em tratamento de rejeitos em águas residuais, efluentes da indústria química, farmacêutica e da indústria têxtil (Mondal *et al.*, 2017).

A geração de poluentes em águas residuais é uma das principais preocupações de sustentabilidade ambiental nas indústrias como em indústrias têxteis, que produz cerca de 50 a 100 L de água residual por quilo de tecido produzido, possuindo as águas residuais têxteis cor forte e alta demanda química de oxigênio (DQO), e com o descarte desses efluentes têxteis sem tratamento nos cursos de rio, lagos e outros ambientes aquáticos podem levar rapidamente ao esgotamento do oxigênio dissolvido devido alta demanda química de oxigênio (DQO), tendo como consequência o desequilíbrio desses ecossistemas, e certos corantes com grupos azo como azul reativo BF-5G, são tóxicos e conversíveis em compostos cancerígenos e mutagênicos em condições anaeróbica (Ribeiro, 2021; Chaves *et al.*, 2022).

O corante azul Reativo BF-5G, que pertence à classe dos corantes reativos monoclorotriazina do tipo azo, produzido pela Texpal Chemical S.A (Texpal, 2016). Esses efluentes requerem etapas de processamento custosas de tratamento, o que justifica a busca de meios alternativos para tratar esses efluentes (Koprivanac *et al.*, 2018).

Os tratamentos convencionais para águas residuárias com corantes nem sempre são eficientes em sua degradação (Koprivanac *et al.*, 2018). Evidenciando a necessidade de buscar métodos de tratamento que possam aumentar a eficiência no tratamento das águas contendo corantes (Chaves *et al.*, 2022). Buscando meios eficientes diversas técnicas podem ser aplicadas para remoção de corantes a fim de diminuir seu impacto no meio ambiente, métodos como fotocatalise, coagulação e floculação, tratamento biológico, adsorção, entre outros (Chaves *et al.*

., 2022) .

Dentre estes merece destaque no tratamento de efluentes com foco de muitos trabalhos com contaminante da indústria , a adsorção, que se caracteriza principalmente por ter uma alta eficiência na remoção de corante, removendo toda a molécula do contaminante (Chaves *et al.* , 2022). É uma técnica que não apresenta a necessidade de uma grande área física para sua aplicação, e custo reduzido de aplicação, e uma técnica relativamente rápida e a possibilidade de utilizar um resíduo já existente como material adsorvente (Singh *et al.*, 2022).

A adsorção é uma operação de transferência de massa do tipo sólido-fluido na qual se utiliza da habilidade de certos sólidos em concentrar na sua superfície de determinados materiais existentes em soluções líquidas ou gasosas, o que permite separá-los dos demais componentes dessas soluções (Mohamed *et al.*, 2016). No tratamento de águas residuais contendo corantes a adsorção possui vantagem sobre as demais operações pois é eficiente e possui fácil separação (Zhang *et al.*, 2018).

Esse estudo apresenta, pela primeira vez, o aproveitamento do bagaço de malte para produção de carvão ativado por K_2CO_3 e sua aplicação na remoção de corante reativo azul BF-5G, considerando que a utilização de subprodutos no tratamento de efluentes é promissora devido ao seu baixo custo e alta disponibilidade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Produzir carvão ativado a partir do bagaço de malte utilizando K_2CO_3 como agente ativante como um adsorvente para a remoção do corante têxtil, Azul Reativo BF-5G (C.I. Reactive Blue 203) .

2.2 Objetivos específicos

- Utilizar o bagaço de malte para produzir carvão ativado com capacidade de adsorção de efluentes da indústria têxtil;

- Efetuar o planejamento experimental para avaliar a influência dos parâmetros ((TP), razão de impregnação do ativador K_2CO_3 (RI) e tempo de ativação (TA)) na Adsorção do carvão

ativado de bagaço de malte utilizando K_2CO_3 como agente ativante.

- Avaliar o carvão ativado a partir do bagaço de malte utilizando K_2CO_3 como agente ativante para adsorção do Azul Reativo BF-5G (C.I. Reactive Blue 203);

- Caracterizar o carvão ativado produzido bagaço de malte utilizando K_2CO_3 como ativante com MEV, FTIR, DXR, com a finalidade de revelar sua estrutura e grupos funcionais presentes;

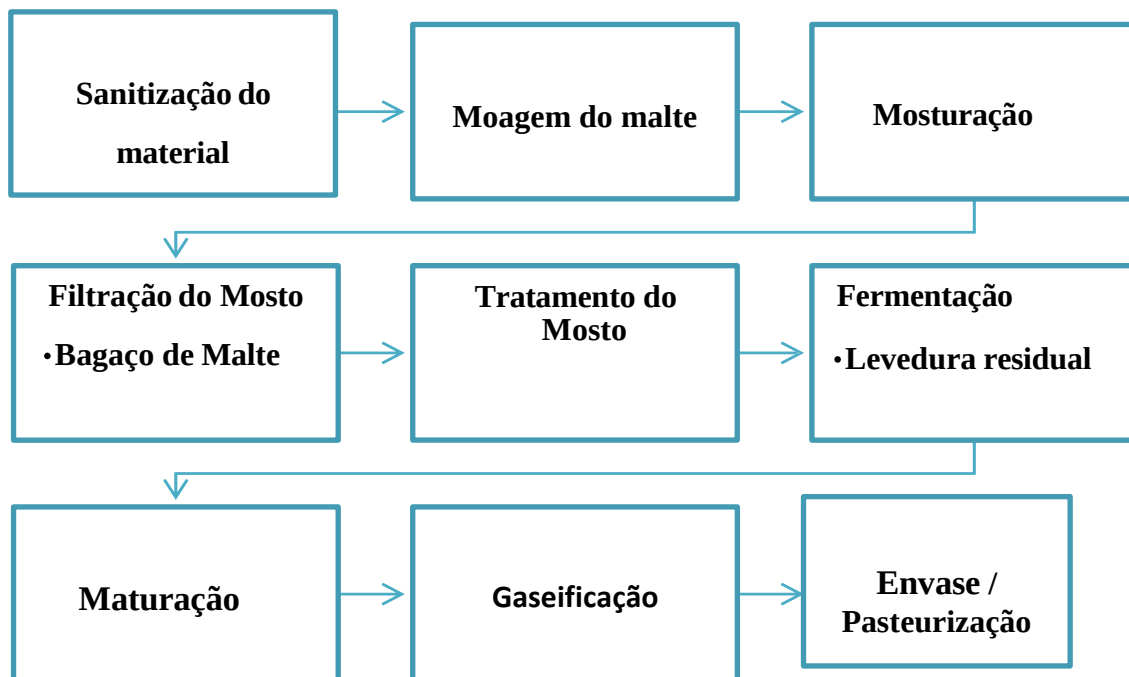
- Avaliar a capacidade de adsorção do carvão ativado de bagaço de malte utilizando K_2CO_3 com as isoterms de Langmuir, Freundlich e Temkin;

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Bagaço de Malte

A cerveja é obtida através da fermentação da cevada, podendo ser acrescida de outros cereais ou fontes de açúcares. Com adição de lúpulo, por ação de leveduras, a cerveja é uma das bebidas fermentadas mais antigas e uma das bebidas mais populares por todo o mundo (Pimenta *et al.*, 2020).

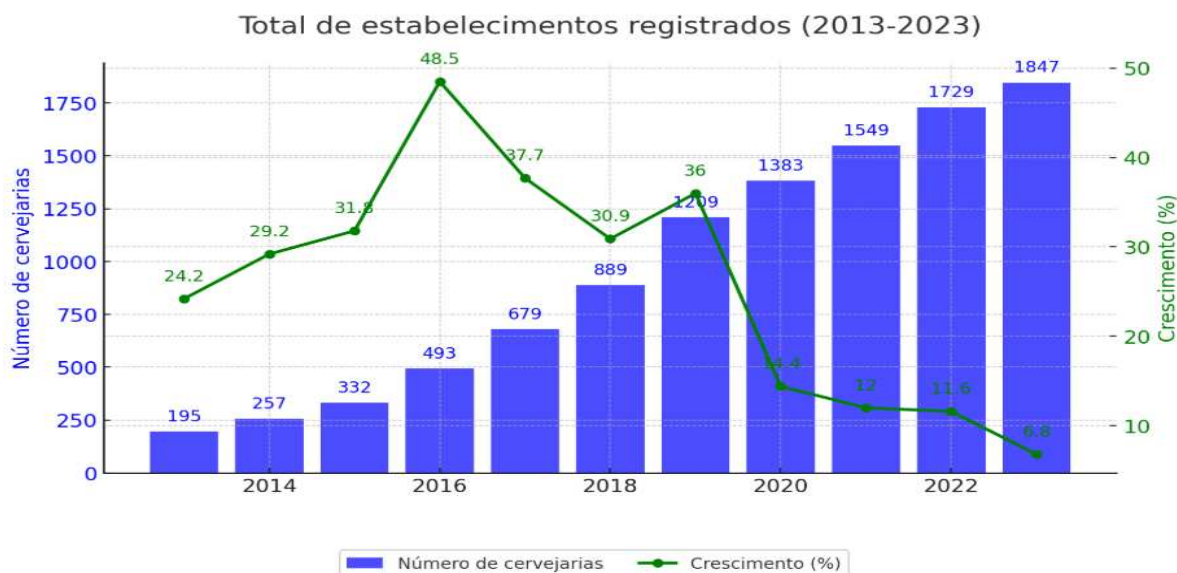
Após as etapas de mostura e esgotamento dos grãos de malte moídos para extração dos compostos solúveis constituintes do mosto doce e sua clarificação, o bagaço de malte é gerado, sendo esse o principal resíduo da indústria cervejeira, podendo representar até 85% em massa do total de subprodutos gerados (Juchen *et al.*, 2018). Com a produção de cerveja em grandes escalas, para atender a grande demanda do produto, leva à geração de grandes quantidades de resíduos como o bagaço de malte (Juchen *et al.*, 2018). O processo produtivo da cerveja, segundo Venturini *et al.* (2016), é apresentado na figura 1 que apresenta o fluxograma da produção industrial da cerveja.

FIGURA 1 - FLUXOGRAMA DA PRODUÇÃO INDUSTRIAL DA CERVEJA

Fonte: Adaptado de Venturini Filho (2016)

A da indústria cervejeira do Brasil registrou grande crescimento nos últimos anos ressaltando dados do Anuário da Cerveja 2024 (Brasil, 2024), que mostram o aumento de 195 cervejarias em 2013 para 1847 em 2023, evidenciando o aumento da produção de subprodutos como o bagaço de malte o qual a busca de um destino mais nobre a está biomassa se torna relevante. A figura 2 apresenta o gráfico do crescimento das cervejarias nos últimos dez anos.

FIGURA 2 APRESENTA O GRÁFICO DO CRESCIMENTO DAS CERVEJARIAS NOS ÚLTIMOS DEZ ANOS.



Fonte: Adaptado de (Anuário da Cerveja 2024 (Brasil ,2024))

Dessa forma, surge a necessidade de avaliar diferentes formas de reaproveitamento deste material, que contém aproximadamente 17% de celulose, 28% de hemicelulose e 28% de lignina em massa com potencial para diversas aplicações para o aproveitamento desse subproduto da indústria cervejeira (Juchen *et al.*, 2018).

Neste sentido, considerando que o destino principal é para produção de ração animal, diversificar as aplicações serão importantes diante do aumento da produção de cerveja e por consequências de bagaço de malte (Juchen *et al.*, 2018) . Uma possível aplicação desse subproduto seria o processo de adsorção de poluentes devido a um potencial para adsorvente ao passar por processos de transformação como a pirólise para formar carvão ativado (Mildenberg , 2019).

O bagaço de malte também pode ser utilizado como meio de crescimento para o cultivo de planta, do bagaço como adubo, a alimentação de minhocários , na biotecnologia em cultivo de microorganismos na produção de células protéicas únicas, bioprodutos por fermentação como antibióticos e adesivos, no suporte para a imobilização celular dentre outras (Mildenberg , 2019).

Dessa forma, um estudo de viabilidade econômica para o bagaço de malte foi realizado

por Santos *et al.*, (2023) que revelou que a implantação de uma unidade de produção de carvão vegetal do bagaço de malte em indústrias cervejeiras é viável, uma constatação importante frente a grande produção do bagaço de malte.

Dentro deste contexto, o estudo de Santos *et al.*, (2023) trouxe ainda, que a produção de 108 toneladas de carvão vegetal por ano com preço mínimo de venda de US\$ 1,78 por quilo, é possível pagar os custos, gerando retorno de 9% para a empresa, sendo esse preço de venda equiparado ao de marcas de carvão vegetal para adsorção presentes no mercado. Portanto a destinação do bagaço de malte para produção de carvão vegetal ativado é uma forma viável de agregar valor a esse subproduto.

3.1.2 Carbonização

Carvão ativado consiste em um material rico em carbono derivado da biomassa e pode ser obtido através de qualquer resíduo orgânico, incluindo resíduos vegetais e florestais, cavaco de madeira, algas, lodo de esgoto, esterco, resíduos sólidos urbanos orgânicos e agrícola, os quais passam por um processo de pré-tratamento físico que geralmente incluem secagem, trituração, peneiramento e lavagem de matéria-prima de biomassa (Yuan *et al.*, 2020).

Posteriormente passando por decomposição termoquímica para produzir o carvão e ativação para aumentar a sua porosidade interna. Os métodos de tratamento termoquímico incluem pirólise, carbonização hidrotérmica, gaseificação, torrefação e aquecimento por micro-ondas (Yuan, 2020). No Brasil temos empresas capazes de produzir em escala industrial o carvão vegetal empresas como (Termocarbo) e (Quaramex) em Guarapava no Paraná e (MV Química) em Barueri, São Paulo e (CLARIMEX MP4) São José dos Pinhais, São Paulo. Os principais processos térmicos de conversão de biomassa (carbonização) e suas características estão apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 : TIPOS DE CARBONIZAÇÃO

Carbonização térmica	Temperatura /Potência	Tempo de residência	Observações
Pirólise	300-950°C	1-3 h	Fácil aplicação, robusto e econômico Aplicável à grande variedade de matérias primas.
Hidrotérmica	120-260°C	1-16 h	Utilizada para matéria-prima com alto teor de umidade Rendimento menor que na pirólise.
Gaseificação	> 800°C	10-20 s	Processo mais complexo que a pirólise, várias interações físicas e químicas.
Assistida por micro-ondas	400-500 W	1-10 min	Aquecimento volumétrico, rápido, rendimento menor que o da pirólise.

Fonte: Zhang et al., 2019; Yuan et al., 2020

A pirólise é o processo termoquímico utilizado para decomposição de biomassa em ambiente com ou sem a presença de oxigênio para a produção de carvão ativado. Os elevados teores de cinzas e carbono no carvão estão relacionados principalmente à decomposição de celulose, hemicelulose e lignina presentes na biomassa, enquanto a taxa de aquecimento influencia as características do carvão vegetal obtido (CHO *et al.*, 2017). O tempo de residência prolongado proporciona uma decomposição mais completa da biomassa, ao mesmo tempo em que diminui o rendimento da produção de carvão. Sendo assim, cada biomassa demanda um estudo específico para a produção de um carvão ativado de boa qualidade (Mohamed *et al.*, 2016).

A pirólise assistida por micro-ondas (MAP), consiste em uma pirólise com equipamento acoplado ao micro-ondas. É considerada um método sustentável para produzir produtos bioenergéticos, incluindo carvão vegetal, bio-óleo e biogás. Em comparação com os métodos convencionais, a técnica MAP oferece menor tempo de processamento, menor gasto energético, transferência de calor mais eficaz e melhor aquecimento seletivo (Zhang *et.al*, 2017). Segundo Yang *et al* (2022), o carvão ativado obtido a partir da pinha e ativado com KHCO_3 e K_2FeO_4 por pirólise assistida por micro-ondas apresentou alta capacidade de adsorção para o cromo.

Para a conversão de matéria-prima úmida é adequada a utilização da carbonização hidrotérmica (HTC), realizada em uma faixa de temperatura de 120-260 °C. Nesta técnica, o carvão é produzido sem a necessidade de pré-secagem, pois a biomassa úmida é aquecida e pressurizada, gerando um hidrocarvão contendo abundantes grupos funcionais ácidos em sua superfície, o que pode beneficiar a capacidade de adsorção de contaminantes (Zhou *et al.*, 2017)

A gaseificação é o processo de conversão da biomassa em gásóleo combustível utilizando agentes de gaseificação. A temperatura de gaseificação é geralmente superior a 800 °C. O carvão produzido durante a gaseificação geralmente contém altos níveis de sais alcalinos e minerais alcalino-terrosos, que podem precipitar muitos contaminantes de metais (Zhang *et al.*, 2019).

A natureza do precursor carbonáceo, dependendo da porcentagem de carbono em sua composição, o método de ativação (físico ou química) e a composição química e física dos ativadores determinam as características de porosidade em carvões ativados, incluindo distribuição de tamanho de poros, formas dos poros e química de superfície (Zhao *et al.*, 2021). Na busca de melhora na qualidade do carvão vegetal, o uso de ativadores de sais de potássio vem aumentando com intuito de se obter um bom desempenho na adsorção.

3.1.3 Ativação química

A ativação química é um procedimento de longa duração para o desenvolvimento de porosidade em materiais à base de carbono, potencializando a ação de adsorção do carvão (Yuan *et al.*, 2020). A ativação pode realizada pré-tratamento térmico ou pós-tratamento térmico (Feng *et al.* 2022). Por outro lado, a ativação física consiste na reação do carvão com vapores e gases contendo oxigênio combinado com monóxido ou dióxido de carbono, comportando-se como agentes oxidantes moderados (Singh *et al.*, 2022).

A ativação química dos precursores à base de carbono geralmente ocorre com uma série de reações químicas que são dependentes do tipo do agente ativador, condições experimentais, processamento inicial, incluindo mistura sólida ou mistura líquida, parâmetros de carbonização como temperatura, taxa de aquecimento, tempo de residência e procedimento de lavagem envolvendo ácido e/ou solução aquosa (Singh *et al.*, 2022).

Uma vez ativado, o carvão ativado, espera-se obter uma porosidade interna com uma complexa estrutura porosa e significativa área superficial, sendo o carbono seu principal componente de constituição, de modo que 87 a 97% da estrutura é constituída desse elemento (Zhang *et al.*, 2019). Existe uma gama volumosa de reagentes disponíveis e testados para

ativação química e dos quais hidróxido de potássio (KOH) cloreto de zinco ($ZnCl_2$) e ácido fosfórico (H_3PO_4) e carbonato de potássio (K_2CO_3) têm precedência em termos de síntese de materiais de alta qualidade e do número de publicações que aparecem na literatura existente (Singh *et al.*, 2023).

O K_2CO_3 é o segundo composto mais relatado para a ativação química de precursores contendo carbono. Em geral, os elementos não-carbono são eliminados a altas temperaturas, resultando na condensação do carbono em uma estrutura aromática que sofre uma reação redox com K_2CO_3 formando as estruturas porosas (Arie *et al.*, 2020). Segundo Yuebin *et al.*, (2019), a ativação com K_2CO_3 origina carvões ativados de área superficial muito mais alta se comparado aos carvões ativados comerciais. Além disso, segundo Laiquan *et al.* (2023), o carvão ativado com K_2CO_3 apresenta rica estrutura de poros, área de superfície específica atrativa e grande volume total de poros.

O bicarbonato de potássio, $KHCO_3$, é outro agente ativador interessante que tem sido amplamente utilizado como agente ativador de baixo custo para a fabricação de uma série de carbonos nanoporosos com propriedades superficiais ajustáveis. Segundo Singh *et al.* (2023), o $KHCO_3$ é um dos reagentes de baixo custo com mais eficiência em produzir um bom carvão ativado, além de ser menos agressivos ambientalmente.

Os sais de potássio, com exceção do KOH e do K_2FeO_4 , decompõem-se para formar K_2CO_3 como componente principal, juntamente com outras espécies de potássio, incluindo potássio metálico, que intercala nas camadas de carbono, resultando em sua expansão e formando materiais de alta área superficial. A escolha de um sal de potássio é uma etapa fundamental para obtenção de material carbonáceo com diâmetro de poros adequado, por esse motivo o uso de outros sais de potássio, além do KOH, vem sendo ampliado (Arie *et al.*, 2020).

3.1.4 Adsorção

Na adsorção se nomeia a substância adsorvida como adsorvato e o material sólido onde ocorre a adsorção é chamado de adsorvente. Por ações de forças interfaciais as moléculas do adsorvato são transferidas para a superfície do adsorvente onde, posteriormente, ficam retidas (Almeida., 2016). A adsorção é denominada química quando há reação/interação entre o sítio ativo de adsorção do adsorvente e a molécula do adsorvato. Por outro lado, a adsorção física envolve apenas forças de Van der Waals e interações eletrostáticas entre adsorvente e adsorvato

(Calijuri *et al.*, 2013). A adsorção é um processo com crescente utilização devido ao seu custo, relativamente moderado, e por ser muito eficaz na remoção de determinados adsorvatos, geralmente poluentes de diferentes categorias. Além disso, o controle do processo é relativamente simples com poucas variáveis a serem ajustadas ao longo da operação.

A cinética de adsorção está relacionada à taxa de remoção da concentração de adsorvato do meio de acordo com o tempo de contato entre o adsorvente/adsorvato, sendo que a taxa é dependente de características físico-químicas de ambas as espécies (adsorvente/adsorvato), que pode ser influenciada pelo pH, temperatura, concentração inicial das espécies, potência de agitação, força iônica, tamanho da partícula de adsorvente e distribuição do tamanho de poros (Nascimento *et al.*, 2014). Existem modelos matemáticos que descrevem a cinética do processo de adsorção, sendo os mais frequentemente utilizados os de pseudo-primeira e segunda ordens (Rocha *et al.*, 20).

A variação da capacidade de adsorção em relação a temperatura é determinada a partir de curvas denominadas isotermas (Yuan *et al.*, 2020). Assim é possível descrever os dados de equilíbrio através de um modelo matemático (Oda *et al.*, 2021). A isoterma de adsorção consiste então na relação de equilíbrio entre a concentração residual da fase fluida e a concentração adsorvida em uma dada temperatura. Para a obtenção de uma isoterma de adsorção deve-se adicionar uma massa de adsorvente (m) em um determinado volume (V) de diferentes soluções de concentrações iniciais (C_0) conhecidas. Assim, ao atingir o equilíbrio, relacionam-se as variáveis de equilíbrio em um gráfico entre capacidade de adsorção (q_e) versus concentração de adsorvato no equilíbrio (C_e) (Viana *et al.*, 2013), conforme denotado na equação 1:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (1)$$

Em que q_e é quantidade massa do soluto adsorvido por massa de adsorvente no equilíbrio ou capacidade de adsorção, C_0 é a concentração inicial do adsorvato, C_e é a concentração de adsorvato no equilíbrio, V é o volume da solução e m é a massa de adsorvente.

A isoterma de adsorção é essencial na otimização do uso de adsorventes, pois descreve como os adsorvatos interagem com os adsorventes. Dentre os modelos principais de equilíbrio utilizados para descrever as isotermas de adsorção química estão os modelos das equações de Langmuir, Tenkin e Freundlich (Li *et al.*, 2016).

3.1.5. Modelos Cinéticos de Pseudo-Primeira e Pseudo-Segunda Ordens

Para avaliar o modelo de pseudo-primeira ordem uma análise cinética relativamente simples é realizada pela equação de Lagergren (Lagergren, 1898), baseada na capacidade dos sólidos (eq. 2).

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2)$$

Em que k_1 é constante da taxa de adsorção do modelo de pseudo-primeira ordem, q_e é a quantidade de massa adsorvida após o equilíbrio e q_t representa a quantidade de massa adsorvida em um tempo t genérico. Integrando-se a equação 5 e aplicando a condição inicial em $t=0$, chega-se na equação 3:

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

Por sua vez, o modelo de pseudo-segunda ordem é expresso pela equação 4:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (4)$$

onde k_2 é a constante da taxa de adsorção de pseudo-segunda ordem, q_e e q_t que são quantidades adsorvidas massa de adsorvente no equilíbrio; representam a mesma definição previamente definida para o modelo anterior. Integrando-se a equação 5 e aplicando a condição inicial em $t=0$, chega-se na equação:

$$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t} \quad (5)$$

3.2. Isotermas de adsorção

3.2.1 Isoterma de Langmuir

O modelo de Langmuir considera que sítios ativos do material adsorvente são ocupados por moléculas de adsorvato e essas espécies adsorvidas interagem somente com esse sítio, e não umas com as outras. Além disso, é suposto uma uniformidade da superfície do material, o que leva a hipótese de todos os sítios apresentarem a mesma probabilidade de adsorção, sendo que essa adsorção ocorre até a formação de uma monocamada (Li *et al.*, 2016). O modelo de Langmuir é uma das equações mais utilizadas para representação dos processos de adsorção e é representado pela seguinte equação 6:

$$q = \frac{q_{\text{máx}} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (6)$$

Em que q representa a capacidade de adsorção; $q_{\text{máx}}$ é a capacidade máxima de adsorção (formação de monocamada); K_L é a constante de interação adsorvato/adsorvente e C_e é a concentração de adsorvato no equilíbrio.

3.2.2 Isoterma de Freundlich

A isoterma de Freundlich revela informações a respeito da adsorção heterogênea e não se restringe à formação de uma monocamada, sendo um dos primeiros modelos propostos para correlacionar a quantidade de material adsorvido e a concentração do material em solução (KILIC *et al.*, 2012). O modelo é representado pela equação 7:

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (7)$$

Em que q_e é a capacidade de adsorção, C_e é a concentração de adsorvato em solução, n é uma constante relacionada à heterogeneidade da superfície e K_F a constante de capacidade de adsorção de Freundlich.

3.2.3. Isoterma de Temkin

A isoterma de Temkin contém um fator que leva em conta o adsorvente-adsorbato e suas interações, sendo caracterizada pela diminuição uniforme da energia de ligação. A teoria de Temkin considera que há diferença energética entre os sítios ativos (heterogeneidade) e que os sítios mais energéticos são primeiramente ocupados pelo adsorbato, sendo que a afinidade tende a decrescer com o aumento da quantidade adsorvida. O modelo é representado pela equação (8):

$$\log\left(\frac{\theta}{C}\right) = \log K + g\theta \quad (8)$$

em que θ é o recobrimento relativo, C é a concentração do inibidor, K é a constante de equilíbrio de adsorção e G representa o grau de interação lateral entre as moléculas adsorvidas.

3.3 Caracterização do Carvão Ativado

3.3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) usa um feixe de elétrons aplicado para investigar a superfície de um material (Inkson , 2016). As amostras para (MEV) são preparadas dependendo do tipo de amostra, e podem ter algumas etapas como: seleção da amostra, seguida de corte, embutimento, lixamento, polimento, metalização e ataque químico da superfície; e sempre em ambiente apropriadamente limpo, devendo passar por um rigoroso processo de limpeza e secagem antes de ser colocada dentro da câmara do (MEV) (Dedadid *et al.*, 2007). A imagem é formada pelo sinal oriundo da interação dos elétrons incidentes com essa superfície. Grande parte dos instrumentos usa como fonte de elétrons um filamento de tungstênio (W) aquecido. O feixe de elétrons é acelerado pela tensão criada entre o filamento e o ânodo e posteriormente, focalizado sobre a amostra (Inkson , 2016). Ao interagir com a amostra, o feixe pode remover elétrons e fótons que são coletadas por detectores e convertidas em um sinal e formar imagens. A profundidade máxima de detecção depende da energia com que os elétrons ou fótons atingem o detector (Galleti ., 2003).

Após adicionado a câmara, a análise inicia com um feixe de elétrons aplicado para investigar a superfície de um material. A imagem é formada pelo sinal oriundo da interação dos

elétrons incidentes com essa superfície. Grande parte dos instrumentos usa como fonte de elétrons um filamento de tungstênio (W) aquecido (Inkson, 2016). O feixe de elétrons é acelerado pela tensão criada entre o filamento e o ânodo e posteriormente, focalizado sobre a amostra. Ao interagir com a amostra, o feixe pode remover elétrons e fótons que são coletadas por detectores e convertidas em um sinal e formar imagens (Dedavid *et al.*, 2007).

A análise de MEV é implementada para revelar a morfologia dos carbonos, e de grande valor para revelar a microestrutura superficial das amostras de carvão vegetal uma vez que pode fornecer mais informações sobre a formação de poros importante para ter uma caracterização abrangente da estrutura e analisar qualitativamente a morfologia dos carvões preparados (Sevilla *et al.*, 2023).

3.3.2 Difractometria de Raios X (DRX)

Uma das técnicas mais utilizadas na área da ciência e tecnologia é a difratometria de Raios-X (DRX), para obter informações estruturais de amostras. Essa técnica gera dados a partir de uma matriz cristalográfica, permitindo a identificação dos diferentes componentes. A técnica de DRX remonta a 1894, quando o físico alemão Wilhelm Conrad Roentgen observou experimentalmente a geração de uma radiação por meio dos raios catódicos. Essa radiação foi denominada raios X devido à sua natureza desconhecida deste tipo de onda (Nascimento, 2020).

É necessário preparar previamente a amostra para realizar uma análise por DRX, convertendo a amostra em um pó fino e homogêneo da substância a ser analisada, que é colocada em um suporte. É necessário moer e peneirar o pó, como deve se com o carvão vegetal, e preparar o suporte, adicionar o pó ao suporte e alinhá-lo com o feixe de raios X (Nascimento, 2020).

A análise da amostra é realizada através da rotação da parte móvel, enquanto o feixe de raios X é direcionado para a amostra. A grade de difração é um cristal de algum composto químico, e os componentes da rede são átomos ou moléculas do composto. Cada átomo ou molécula ocupa um ponto da rede, e a menor unidade do cristal que mantém sua simetria é denominada célula unitária (Patil, *et al.*, 2010).

Esta, por sua vez, contém toda a informação sobre a geometria do cristal, que pode ser construído a partir de múltiplas cópias desta célula unitária transladadas tridimensionalmente. Os resultados são processados e interpretados para obter informações sobre a estrutura da amostra. É importante executar cuidadosamente cada etapa da preparação da amostra, sendo necessário moer e peneirar o pó, preparar o suporte, adicionar o pó ao suporte e alinhá-lo com o feixe de raios X para garantir resultados precisos e confiáveis na difração de raios X (Patil, *et al.*, 2010).

A difração de raios X (DRX) é utilizada para analisar a estrutura cristalina e a composição elementar como em grupos funcionais de carvões vegetais, importante para uma análise quantitativa destas amostras, pois pode penetrar nas partículas e identificá-las mesmo se elas estiverem mascaradas por cinzas, uma propriedade valiosa para a análise de carvões vegetais, podendo também identificar partículas da ordem de nanômetros, enquanto que a microscopia ótica identifica somente as maiores que um micron (Patil, *et al.*, 2010).

3.3.3 Espectroscopia no Infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR)

A espectroscopia no infravermelho possui um campo de aplicação que abrange a investigação da estrutura de uma gama de materiais e produtos como polímeros, misturas complexas, moléculas bioativas, dentre outros (Barbosa, 2007). Com o espectro no infravermelho, podemos obter as informações de uma molécula, visto que duas moléculas diferentes jamais terão o mesmo espectro. Além disso é possível ter informações acerca de sua estrutura molecular (Barbosa, 2007).

A espectroscopia por infravermelho é uma técnica associada a mudanças nos modos vibracionais e rotacionais de uma molécula quando uma energia é incidida sobre determinada molécula. O espectro de infravermelho está situado principalmente na região de 4000 a 400 cm^{-1} e normalmente apresenta bandas de absorção visto que para cada mudança de nível vibracional, está associada uma série de transições rotacionais. As vibrações podem ocorrer devido a mudança no comprimento de ligação (alongamento) ou no ângulo de ligação (flexão). Além disso, os alongamentos podem ser em fase (simétrico) ou fora de fase (assimétrico). Os principais fatores que afetam a intensidade desses eventos são a rigidez da ligação e a massa dos átomos envolvidos na ligação (Barbosa, 2007).

Na técnica de Espectrometria por Transformada de Fourier, o traçado do caminho óptico produz um padrão chamado interferograma, que é essencialmente um gráfico de intensidade versus tempo. No interferômetro, a energia da fonte atravessa um divisor de feixes, fazendo com que os dois feixes gerados pela divisão percorram caminhos diferentes. Ao se encontrarem novamente, no divisor de feixes, eles se recombinam, podendo ser de forma construtiva gerando um máximo ou destrutiva gerando um mínimo. O feixe gerado passa então pela amostra, que absorve de forma simultânea todas as frequências do espectro infravermelho (Pavia , 2015). A estrutura química dos materiais carbonáceos ativado através da identificação dos grupos funcionais presente na estrutura do material analisado , como em carvão ativado evidenciando grupos funcionais que podem interferir na adsorção. Os resultados foram avaliados por meio do software Origin 9 ®.

3.3.4 Isotermas de BET

A equação BET (Brunauer-Emmett-Teller) se baseia em isotermas de adsorção/dessorção de nitrogênio para a determinação de propriedades texturais de um sólido, tais como a área específica (S_{BET}), expressa em unidades de área por massa de material, e distribuição do tamanho de poros. A técnica usa o princípio da adsorção física em multicamadas de moléculas de nitrogênio dentro da estrutura interna porosa do material. A área S_{BET} pode então ser calculada pelas equações 9 e 10, onde V_m representa o volume da monocamada através do volume de gás adsorvido (V) a uma determinada pressão relativa do adsorbato (P/P_0). Os termos C e N , respectivamente, correspondem à constante de adsorção e o número de Avogadro.

$$S_{BET} = \frac{V_m N}{22,414} \quad (9)$$

$$\frac{1}{V[(\frac{P_0}{P} - 1)]} = \frac{1}{V_m C} + \frac{C - 1}{V_m C} \frac{P}{P_0} \quad (10)$$

Em que V = volume de gás adsorvido a pressão P ; V_m = volume de gás requerido para formar a monocamada; P/P_0 = pressão relativa do adsorbato; C = constante de adsorção; N =

número de Avogadro; SBET = área BET.

3.4 Efluentes da Indústria Têxtil

Nas indústrias os efluentes provenientes de operações e processos em que se faz o uso de água sem que esta fique incorporada ao produto, promovem o descarte da água com substâncias químicas oriundas dos processos aos quais foi submetido o produto. O grau de contaminação e as características das águas residuárias de processos variam muito de acordo com o tipo de indústria e matérias-primas empregadas, evidenciando a importância do tratamento desses efluentes (Calijuri *et al.*, 2013). O carvão ativado oriundo do bagaço do malte obtendo um potencial para o tratamento dos poluentes da indústria têxtil, visto a abundância de matéria prima de malte oriundo da indústria cervejeira do Brasil (Barcellos *et al.*, 2009).

A indústria têxtil gera uma grande quantidade de poluentes em seus processos produtivos. Dentre os poluentes estão os corantes que possuem difícil degradação e são tóxicos para o meio ambiente (Calijuri *et al.*, 2013). Os corantes sintéticos e produtos químicos, chamados auxiliares nos processos de beneficiamento e acabamento, são gerados de grandes volumes de efluentes complexos, com elevada carga orgânica aliada ao elevado teor de sais inorgânicos e fortemente coloridos, devido à presença de corantes não fixados à fibra durante o processo de tingimento. Somados aos riscos ao meio ambiente tem-se os riscos contra a saúde humana, pois são mutagênicos e têm potencial cancerígeno. Além disso, podem levar a irritações na pele, dermatite, cegueira, vômito, gastrite, hipertensão, edema da face, pescoço, língua, laringe e faringe (Barcellos *et al.*, 2009).

No Brasil a indústria têxtil segundo a ABIT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO, 2024), possui 25,3 mil unidades produtivas formais em todo o país, com um volume da produção têxtil 2 milhões de toneladas em 2023; considerando segundo Chaves *et al.*, (2022) indústrias têxteis geração de 50 a 100 L de água residual por quilo de tecido produzido, evidenciando a importância de desenvolver meios de tratamento dessas águas residuais, meios como o carvão vegetal ativado pode ser utilizado, como Bazarin *et al* (2024) utilizou carvão ativado oriundo de osso de tilápia, para adsorção de corante têxtil.

3.4.1 Corantes têxteis

Os corantes são substâncias aromáticas e heterocíclicas complexas que possuem a

finalidade básica de fornecer coloração para diferentes materiais e são amplamente empregadas nas indústrias de papel, cosméticos, têxtil, farmacêuticas e alimentícias, sendo que suas características de coloração não devem ser alteradas quando expostas à diferentes condições, tais como lavagem, calor intenso ou luz (Raja *et al.* , 2019).

A grande diversidade estrutural provém de diferentes grupos cromóforos e são, em sua grande maioria, de difícil degradação ou recalcitrantes. Além disso, alguns grupamentos podem gerar subprodutos carcinogênicos ou mutagênicos sendo, dessa forma, imprescindível sua remoção de determinados efluentes industriais (Barcellos *et al.*, 2009). Dessa forma, a adsorção se mostra extremamente importante nesse contexto, visto que é uma aplicação relativamente barata e muito eficiente em determinadas condições para remover moléculas de corante em soluções aquosas Chaves *et al* (2022).

Os corantes podem ser classificados de acordo com a sua estrutura química ou de acordo com a fixação do corante à fibra têxtil (Cervellin , 2010). Os principais grupos referentes à classe química são: antraquinona, enxofre, azo, ftalocianina, nitro, nitroso, tiazina e triarilmetano (Gonçalves *et al*, 2007). Segundo Chaves *et al* (2022), em relação ao método de aplicação, os corantes podem ser classificados em diversas categorias, tais como: básicos, dispersos ou plastosolúveis, diretos, ácidos, azóicos, pré-metalizados, reativo, dentre outros mais específicos.

Os corantes que reagem quimicamente, durante a etapa de tingimento do tecido para formar uma ligação covalente com a fibra , são os chamados corantes reativos, que reagem formando uma ligação que ocorre entre um átomo de carbono da molécula de um átomo de nitrogênio oxigênio ou enxofre da fibra, possuindo em geral um grupo cromóforo, grupo ponte, grupo reativo à fibra e grupo de solubilização, que reagem por substituição nucleofílica aromática ou por adição nucleofílica sobre alquenos (Marin,2015).

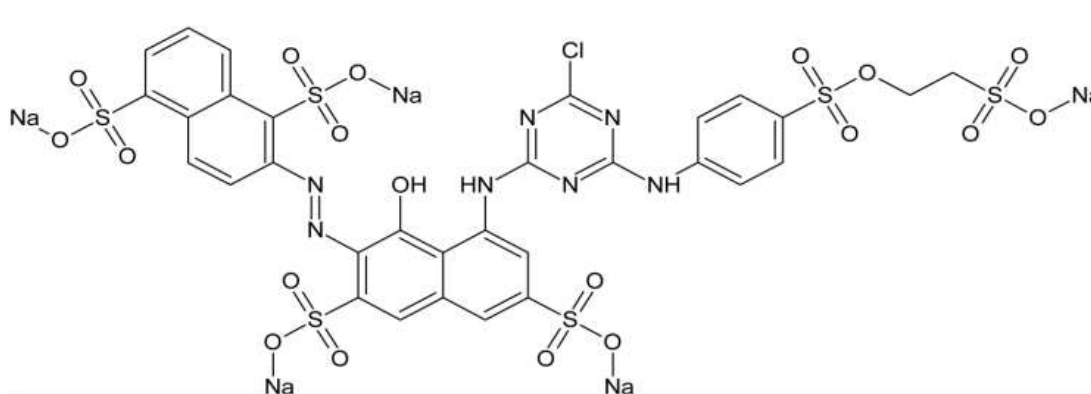
3.4.2 Corante BF-5G (C.I Reactive Blue 203)

O corante têxtil Azul Reativo BF-5G (C.I Reactive Blue 203) é um corante de cor escura, não inflamável, com solubilidade de $100 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (a $25 \text{ }^\circ\text{C}$) , produzido pela indústria Texpal Química Ltda., situada em Valinhos, interior de São Paulo. Possui como principais grupos o azo, vinilsulfona e clorotriazina, ligados em a dois sistemas reativos (Texpal, 2016). A Figura 3 apresenta a representação visual do corante fornecido pela indústria Texpal Química Ltda.

FIGURA 3 - ESTRUTURA CORANTE FORNECIDO PELA INDÚSTRIA TEXPAL QUÍMICA LTDA

Fonte: O AUTOR, 2025

O corante azul reativo BF-5G é com moléculas formadas por ligações do tipo azo (N = N) com anéis aromáticos cujo a bifuncionalidade resulta da ligação do sistema cromóforo a dois grupos vinil sulfona (Marin.,2015) . Possui um peso molecular de $1,051 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$, apresentando duas constantes de dissociação ($\text{pK}_{a1} = 4,602$ e $\text{pK}_{a2} = 7,031$) relacionados ao NH_2 e OH , sendo um corante aniônico (Texpal, 2016) . A Figura 4 apresenta a representação visual da estrutura molecular do corante reativo BF -5G.

FIGURA 4 - ESTRUTURA MOLECULAR DO CORANTE AZUL REATIVO BF 5G

Fonte: Texpal indústria química S/A

Os corantes reativos, com o azul reativo BF-5G, têm baixas taxas de fixação e por esse motivo são frequentemente aplicados em altas concentrações para atingir os padrões de

tingimento esperado, levando a uma produção de uma grande quantidade de efluentes líquidos contaminados, com cor intensa causando turbidez e, mesmo em pequenas concentrações, são tóxicos, cancerígenos e mutagênicos (Silva et al 2022).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Obtenção e preparo do bagaço de malte e do corante

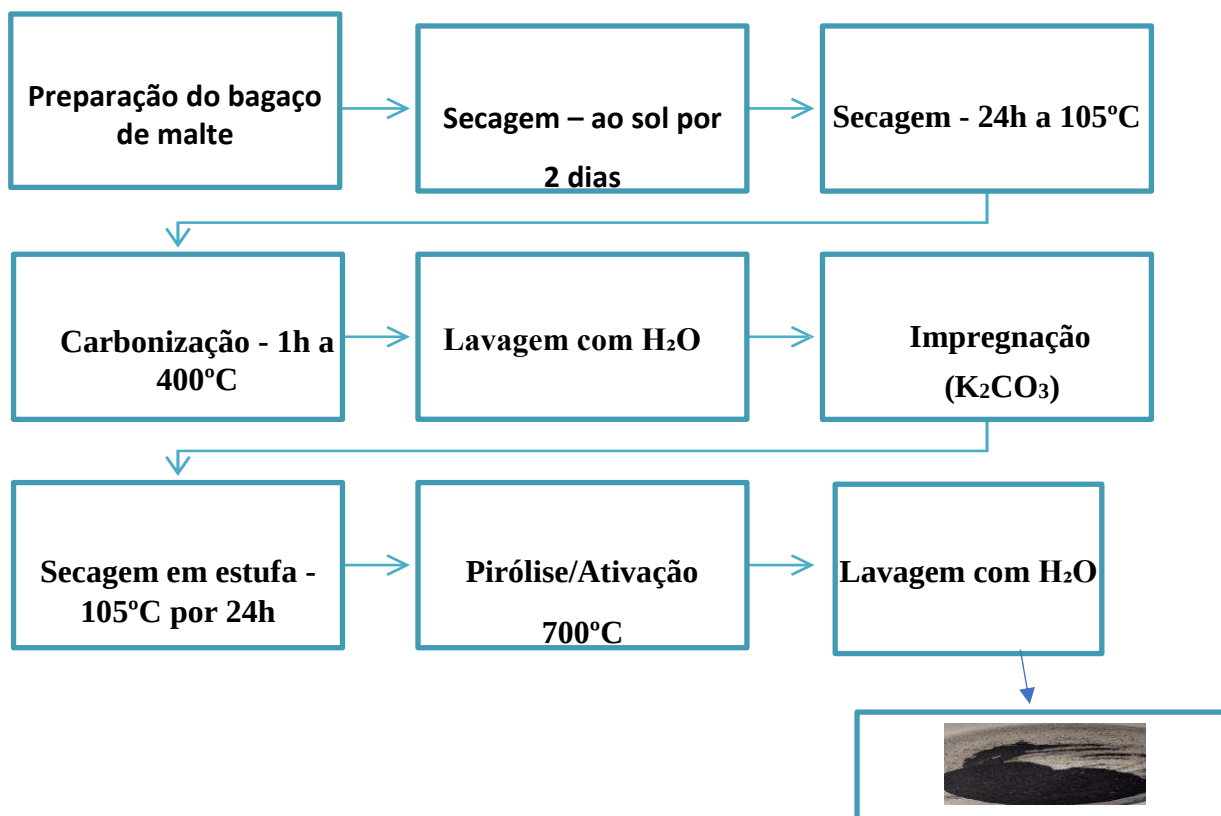
O bagaço de malte carapilsen foi obtido a partir do resíduo de uma produção da Cervejaria Wegas de Viçosa Minas Gerais ,Brasil.

Na coleta, o material foi acondicionado em sacos plásticos sob refrigeração a temperatura de aproximadamente 3 °C. Em torno de 20 kg de bagaço de malte úmido foi coletado para a realização do estudo, sendo verificadas as características de coloração e odor do material. Após a coleta passou pelo processo de secagem ao sol sob uma lona plástica por dois dias, e posteriormente 4 horas em uma estufa a 105°C e padronizado de acordo com sua granulometria, em peneiras de 12 (1,68 mm) e 14 (1,41 mm) mesh . Estas partículas foram acondicionadas em frascos plásticos hermeticamente fechados e escuros para a proteção da luz, evitando também a contaminação do material a ser utilizado nas etapas seguintes.

O corante azul reativo BF-5 G foi doado pela Texpal Química Ltda. A solução corante foi preparada com água destilada. Todos os reagentes utilizados eram de grau analítico. O valor do pH da solução corante foi ajustado usando 0,1 mol L⁻¹ de HCl e NaOH .

4.2 Etapas de Produção do Carvão Ativado

A produção do carvão ativado consistiu em três etapas, são preparo do bagaço de malte, carbonização e a ativação química com sais de potássio de acordo com o planejamento fatorial e a pirólise também de acordo com o planejamento fatorial (Singh *et al.*,2023). A figura 5 apresenta o Fluxograma de produção de carvão ativado.



Fonte: O AUTOR, 2025

Após seco, o bagaço de malte foi submetida à carbonização a uma temperatura 400 °C durante uma hora, que foi realizada no Laboratório de Qualidade Ambiental – LQA (DEA), em uma mulfla , com um controle de temperatura interna realizado com o auxílio de um sensor termopar a um aquecimento de 10 °C /min (Rocha *et al.*, 2020) . Posteriormente seguindo para a lavagem com água deionizada para retirada de impurezas e cinzas, em tubos Falcon de 50 ml e submetida à centrifugação de 3000 rpm por 30 minutos retirou-se se então o sobrenadante seguindo para secagem (Melo *et al.*, 2017). Após secagem foi impregnado o carbonato de potássio (K₂CO₃) na proporção mássica de acordo com planejamento experimental, adicionou-se água deionizada na proporção de 10:1 (ml de água / g de carvão). A mistura foi mantida em agitação constante por 1 hora e secada em estufa à 105°C por 24h .

Partindo pós secagem para a etapa de pirólise que foi realizada no Laboratório de Qualidade Ambiental – LQA (DEA), em uma mulfla , com um controle de temperatura interna realizado com o auxílio de um sensor termopar de acordo com cada pondo do planejamento com um aquecimento de 10 °C (Rocha *et al.*, 2020).

Posteriormente a pirólise o carvão passou lavagem com água deionizada até a

neutralização, que a mistura foi dividida em tubos Falcon de 50 ml e submetida à centrifugação de 3000 rpm por 10 minutos. Retirou-se se então o sobrenadante e mediu-se o pH de modo que: caso o resultado fosse ácido adicionava-se água deionizada ao precipitado, colocava sobre agitação por 15 minutos e levava novamente para a centrífuga para repetir o processo; se o resultado fosse neutro, finalizava-se a etapa de lavagem prosseguindo para secagem que foi em estufa 105 °C por 24h (Melo *et al.*, 2017).

O carvão ativado deste estudo foi ativado em duas etapas que sem dúvida, o processo convencional de duas etapas é uma abordagem bem-sucedida para converter o precursor carbonáceo em carbonos altamente porosos (Singh *et al.*,2023). Sendo a primeira etapa a carbonização a 400°C e posteriormente a ativação e a pirólise de acordo com os pontos do planejamento experimental.

4.3 Curva de Analítica do corante

Para obter a Curva de Analítica para o azul reativo BF-5 corante foi realizado um experimento em batelada utilizando frascos de erlenmeyers de 250 mL em duplicata com 50 ml de solução contendo o corante Azul Reativo BF-5G na concentração de 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,20,30,40 mg/L utilizando o pH = 2 por 4horas (Juchen *et al.*,2018). Ultravioleta-visível (UV-Vis, Modelo Shimadzu UV-1800), no comprimento de onda de 610 (nm), onde foi observada a absorbância máxima (Juchen *et al.* ,2018). A capacidade de adsorção foi calculada de acordo com equação 1.

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (1)$$

4.4 Ensaios de Adsorção

Para a eficiência da adsorção do carvão ativado de cada ponto do planejamento, experimentos em batelada foram conduzidos em frascos Erlenmeyers de 250 mL, em duplicata, contendo 50 mg de carvão ativado e 50 ml de solução contendo o corante Azul Reativo BF-5G na concentração de 40 mg/L utilizando o pH = 2 por 4 horas, essas condições para todos (Wang *et al.*, 2020) . Após esse tempo, a concentração de corante no sobrenadante foi medida pela leitura da absorvância, em espectrofotômetro (UV-Vis, Modelo Shimadzu UV-1800), no comprimento de onda de 610 nm (Melo *et al.*, 2017) . Os resultados foram obtidos para cada ponto possibilitando a avaliação no *softwer* Statistica . Também foram realizadas as mesmas

análises para o bagaço de malte seco e para o carbonizado a 400 °C nas mesmas condições, para efeito de comparação. A capacidade de adsorção foi calculada de acordo com equação 1.

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (1)$$

4.5 Planejamento Fatorial

Para otimizar os resultados da adsorção foram realizados ensaios para o carvão vegetal utilizando um método de superfície de resposta com planejamento composto central rotacional (DCCR 2³), com 3 variáveis, utilizando os seguintes fatores: temperatura de pirólise (TP), razão de impregnação do ativador K₂CO₃ (RI) e tempo de ativação (TA).

Dessa forma, a variação desses fatores (: temperatura de pirólise (TP), razão de impregnação do ativador K₂CO₃ (RI) e tempo de ativação (TA)), foram baseado em trabalhos como de Mildenberg , (2019), que em seu trabalho variou a temperatura de ativação de 500 a 700 °C e a razão de impregnação de 1:1 a 1:3; já na revisão de Sing *et al* (2023) apresentou trabalhos que utilizaram compostos químicos com potássio para ativação de carvão ativado, com várias taxas de impregnação (1:1, 2:1, 3:1 e 4:1), temperaturas de carbonização (600 – 900 °C) e tempos de carbonização (0,5, 1,0, 2,0 e 3,0 horas) .

Foram realizados 17 experimentos, sendo 8 pontos fatoriais (+1 e -1), 6 pontos axiais (+ α e - α) e 3 repetições no ponto central. A variável resposta foi a porcentagem de remoção do Azul Reativo BF-5G. Nesse tipo de planejamento, as interações lineares e quadráticas de uma determinada variável são avaliadas, assim como as interações lineares entre diferentes variáveis. As Tabelas 2 e 3 apresentam o planejamento fatorial de forma detalhada, considerando que a matriz de contraste dos coeficientes codificados e decodificados do delineamento proposto, que são as condições experimentais dos ensaios. Essa análise considerou o efeito multifatorial das variáveis.

TABELA 2 - NÍVEIS E VARIÁVEIS DOS FATORES

Variáveis	Níveis				
	-1,68	-1	0	1	1,68
Temperatura de pirólise (°C)	532	600	700	800	868
Razão de impregnação do ativador (g/g carvão)	0,32	1:1	2:1	3:1	3,68
Tempo de ativação (h)	0,32	1,0	2,0	3,0	3,68

Tabela 3 - Ensaios para o planejamento fatorial

TABELA 3 - ENSAIOS PARA O PLANEJAMENTO FATORIAL

ENSAIOS	Variáveis codificadas			Variáveis não-codificadas		
	TP	RI	TA	TP (°C)	RI (g/g carvão)	TA (h)
1	-1	-1	-1	600	1:1	1,0
2	-1	-1	1	600	1:1	3,0
3	-1	1	-1	600	3:1	1,0
4	-1	1	1	600	3:1	3,0
5	1	-1	-1	800	1:1	1,0
6	1	-1	1	800	1:1	3,0
7	1	1	-1	800	3:1	1,0
8	1	1	1	800	3:1	3,0
9	1,68	0	0	868	2:1	2,0
10	-1,68	0	0	532	2:1	2,0
11	0	1,68	0	700	3,68:1	2,0
12	0	-1,68	0	700	0,32:1	2,0
13	0	0	1,68	700	2:1	3,68
14	0	0	-1,68	700	2:1	0,32
15	0	0	0	700	2:1	2,0
16	0	0	0	700	2:1	2,0
17	0	0	0	700	2:1	2,0

Fonte: Próprio autor, 2025

Os resultados foram analisados estatisticamente no software Statistica. O carvão ativado que obteve a melhor performance na remoção de corante foi utilizado para as análises posteriores.

4.6 Ensaio do pH

Alguns materiais adsorventes orgânicos já foram testados para remover o corante azul

reativo BF 5G. Foi observado que o pH tem forte influência no processo de adsorção. Em geral se utiliza meio ácido para melhor adsorção de um corante aniônico. Essa eficiência de adsorção foi superior a 80% na maioria dos trabalhos e o equilíbrio variou de acordo com o adsorvente utilizado e a concentração de adsorbato (Nascimento, 2020).

As soluções contendo o corante foram preparadas com os pH's 1, 2, 5,7 e 10, de modo que os ajustes foram realizados gotejando-se soluções de 0,1 mol/L de NaOH ou HCl. A concentração final de cada uma das soluções de corante foi ajustada para aproximadamente 40 mg/L. Foram preparados erlenmeyers de 250 ml com uma massa de 50 mg de carvão ativado e 50 ml de solução, sendo realizado em duplicata para cada pH analisado (Melo *et al.*, 2017). Essa mistura foi mantida em agitação por 24 horas e, posteriormente filtrada e feita a leitura de absorbância do sobrenadante em um espectrofotômetro no comprimento de onda de 610 nanômetros(Wang *et al.*, 2020). A capacidade de adsorção foi calculada de acordo com equação 1.

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (1)$$

4.7 Caracterização do Carvão Ativado

Os métodos que serão utilizados para caracterização, são de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difratomia de Raios X (DRX), Espectroscopia no Infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR), Ponto de Carga Zero e método de área superficial de *Brunauer-Emmet-Teller* (BET).

4.7.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O procedimento para análise da microscopia eletrônica de varredura foi realizada no Laboratório de Microscopia de Eletrônica de Varredura, utilizando equipamento da marca JEOL, modelo JSM-6010LA, com resolução de 4 nm (com feixe a 20 kV). Para a análise de MEV, o carvão passa por um rigoroso processo de limpeza, estando as amostras 99% desidratadas, antes de serem introduzidas na câmara para análise, visto que amostras parcialmente hidratadas podem se desidratar e entrar em colapso dentro da câmara do MEV (Kirk *et al.* , 2009). As amostras de

carvões ativados foram depositadas em uma fina camada em fita dupla face de carbono que estavam coladas em uma porta amostra de alumínio. Foi realizado o pré-tratamento com a metalização das amostra, com ouro em um metalizador (Metalizador Quorum Q150R S) sendo necessária essa etapa devido os carvões ativados não serem um material condutor.

4.7.2 Difratomia de Raios X (DRX)

A análise da Difratomia de raios-X foi realizada no Laboratório de Difratomia de Raios-X (DPF), do Departamento de Física da Universidade Federal de Viçosa, com equipamento da marca D8 Discover, o carvão em forma de pó é colocado em uma câmara de difração, e os raios-X são direcionados para a amostra por meio de um feixe colimado. Os raios-X difratados são então coletados em um detector, que registra a intensidade e o ângulo de difração dos raios-X. partir dos dados obtidos na difratometria, é possível determinar parâmetros estruturais do carvão. O princípio de funcionamento da difração de pó baseia-se na lei de Bragg, para análise de uma amostra, permitindo determinar a estrutura cristalina de um material, ou seja, a disposição dos átomos na rede cristalina (Marín, 2020). A de bagaço de malte. Os parâmetros da Difração de Raios-X (DRX) foram radiação $\text{CuK}\alpha$ de $\kappa\alpha_1 = 1,5405 \text{ \AA}$ e $\kappa\alpha_2 = 1,5443 \text{ \AA}$, a 40 kV e 30 mA de corrente. As amostras foram moídas em gral a fim de que as partículas estivessem numa granulometria de 20 mesh. As medições foram realizadas em uma varredura angular de 2θ , faixa de 10° - 90° , com velocidade de varredura de $10^\circ \cdot \text{min}^{-1}$ e passo de $0,02^\circ$. As fases dos picos foram identificadas com o *software Crystallographica Search-Match*, versão 2.1, por um método comparativo direto utilizando o banco de dados cristalográfico JCPDS-ICDD (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards - International Center for Diffraction Data*). Os resultados foram avaliados por meio do software Origin 9®.

4.7.3 Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR)

A espectroscopia no infravermelho será realizada em equipamento FTIR VARIAN 660, equipado com GladiATR (Laboratório Nanomateriais & Química Ambiental – (LaNaQuA)). A amostra de carvão foi adicionada ao cristal de diamante do GladiATR e foi realizada leitura espectral para a faixa de 4000 a 400 cm^{-1} . Os valores de absorvância foram obtidos em relação ao número de onda e plotados no Excel para se obter a região selecionada do espectro. Os

resultados foram avaliados por meio do software Origin 9[®].

4.7.4 Área superficial BET

As propriedades superficiais dos materiais foram analisadas por adsorção/dessorção física de N₂. Para tanto, foi utilizado o aparelho NOVA 1200, da marca Quantachrome do Laboratório de Catálise no DEQ-UFV. As amostras analisadas foram primeiramente degaseificadas a vácuo por 4 horas à 100°C. A área superficial BET foi então determinada por meio da equação de Brunauer-Emmett-Teller com adsorção de nitrogênio líquido.

4.7.5 Ponto de Carga Zero

O ponto de Carga Zero (pHPCZ) foi determinado de acordo com a metodologia proposta por Regalbuto e Robles (2004) para indicar o comportamento do material de acordo com a variação do pH do meio. A análise consiste em inserir 50 mg de adsorvente em 50 ml de solução aquosa de NaCl (0,1 mol/L), sob diferentes condições de pH inicial (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11,12), ajustados com soluções de HCl ou NaOH (0,01 mol/L) (Bazarin *et al.*, 2024). As amostras são deixadas sob agitação a 180 rpm, à temperatura ambiente por 24 horas, filtradas e, finalmente, é mensurado o pH do filtrado. Construiu-se então um gráfico de pH final versus pH inicial. O pHPCZ é determinado observando-se o gráfico, correspondente à faixa onde o pH final tende a se manter constante, independente do pH inicial (Bazarin *et al.*, 2024). Quando o pH > pH_{PZC}, a superfície do adsorvente tem uma carga líquida negativa e, quando o pH < o pH_{PZC} apresenta uma carga líquida positiva, que favorece a adsorção de corantes aniônicos.

4.7.6 Cinética de Adsorção

O ensaio cinético foi realizado com o carvão ativado que obteve melhor resultado para o ensaio de adsorção analisado pelo planejamento experimental. Os experimentos foram realizados por batelada utilizando erlenmeyers de 250 mL, contendo 50 mg de adsorvente e 50 ml de solução contendo o corante azul reativo BF-5G na concentração de 40 mg/L, pH= 2,00, utilizando os frascos foram agitados em uma mesa agitadora e alíquotas de 2 ml foram retiradas de cada um dos frascos em intervalos de tempo de: 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 480, 600, 720, 1200, 1440 e 1800min (Bazarin *et al.*, 2024). Os modelos cinéticos de pseudo primeira e segunda ordem foram ajustados aos dados experimentais, por meio do software Origin 9Pro. A capacidade de adsorção foi calculada de acordo com equação 1.

4.7.7 Isotermas de Adsorção

A isoterma do carvão ativado, foi realizada em Erlenmeyers de 250 ml. A cada um dos frascos foram adicionado uma massa de adsorvente próxima de 50 mg e 50 ml de solução concentrada de azul Reativo BF-5G, em pH = 2, com concentrações que variaram entre 20 mg/L e 500 mg/L (Wang *et al.*, 2020). Os frascos foram mantidos sob agitação até o tempo de equilíbrio de adsorção determinado no ensaio cinético. As concentrações de equilíbrio foram medidas utilizando-se de um espectrofotômetro (Shimadzu, modelo UVmini-1240) no comprimento de onda de 610 nm (Boina *et al.*, 2024). As absorbâncias lidas foram convertidas em concentração através da curva de calibração para do Azul Reativo BF-5G (Bazarin *et al.*, 2024). Os modelos matemáticos de isotermas (Langmuir, Freundlich e Tenkim) Os modelos das isotermas foram ajustados aos dados experimentais, por meio do software Origin 9Pro.

4.7.8 Cálculo do rendimento do bagaço de Malte

O rendimento final do carvão ativado pode ser calculado através da Equação 5, que relaciona as massas do precursor com a massa resultante dos processos, De acordo com De acordo com Dutra (2023).

$$n = \frac{(mF)}{mP} \cdot 100 \quad (11)$$

Sendo:

MF: Massa final do carvão obtido (g)

MP: Massa do material precursor utilizado (g)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Bagaço de Malte e Carvão Vegetal Produzido

A Figura 6 apresenta o bagaço de malte seco utilizado nesta pesquisa após o processo de padronização do tamanho das partículas a uma faixa de 11 a 12 mesh.

FIGURA 6 - BAGAÇO DE MALTE SECO

Fonte: O AUTOR, 2025

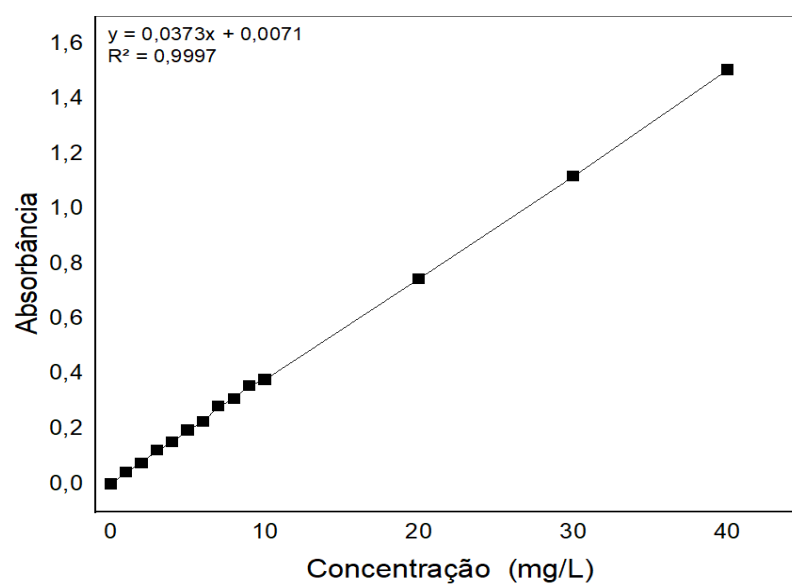
O rendimento total do bagaço desde o início do processo até o final com a produção do carvão foi de 19,1 % , Lopes *et al.* (2021), Nadolny *et al.* (2020) , também determinaram o rendimento de carvões proveniente de bagaço de malte de diferentes procedências, estando na faixa entre 9,45 % e 18,9 %). A Figura 6 representa o carvão produzido após a carbonização de 1 h à 400°C realizada no Laboratório de Qualidade Ambiental – LQA (DEA-UFV). A partir desse carvão produzido foi realizada a ativação com K_2CO_3 de acordo com cada ponto do planejamento experimental. A figura 7 apresenta o Resultado da Carbonização .

FIGURA 7 - RESULTADO DA CARBONIZAÇÃO

Fonte: O AUTOR, 2025

5.2 Ensaio de Adsorção

A curva de analítica para o azul reativo BF-5 foi feita , variando de 1 a 40 mg. L⁻¹ , no Laboratório Protec (DEQ-UFV) (Figura 8) . As absorvâncias foram medidas em u espectrofotômetro no comprimento de onda de 610 nm.

FIGURA 8 - CURVA DE ANALÍTICA PARA O AZUL REATIVO BF-5

Fonte: O AUTOR, 2025

A partir da Curva de Analítica para o azul reativo BF-5, foi realizado o ensaio de adsorção

para cada ponto do planejamento fatorial, com o objetivo de revelar o melhor carvão vegetal produzido de acordo com as variáveis do planejamento fatorial.

Para maximizar o potencial da adsorção do carvão vegetal, é fundamental analisar as variáveis envolvidas no processo, como temperatura de pirólise (TP), razão de impregnação do ativador K_2CO_3 (RI) e tempo de ativação (TA). Nesse estudo, a análise dessas variáveis possibilitou uma avaliação mais profunda da capacidade de adsorção do carvão vegetal, permitindo identificar a influência individual de cada uma delas e das suas interações no processo adsorptivo (Novaes *et al.*, 2017). A tabela 4 apresenta o resultado do ensaio de adsorção em cada ponto do planejamento fatorial.

TABELA 4 . RENDIMENTOS DE ADSORÇÃO EM CADA PONTO DO PLANEJAMENTO FATORIAL

ENSAIOS	Variáveis codificadas			Variáveis não-codificadas			Rendimento da
	TP	RI	TA	TP (°C)	RI (g/g carvão)	TA (h)	Adsorção
							%
1	-1	-1	-1	600	1:1	1,0	68,24
2	-1	-1	1	600	1:1	3,0	78,90
3	-1	1	-1	600	3:1	1,0	71,60
4	-1	1	1	600	3:1	3,0	76,90
5	1	-1	-1	800	1:1	1,0	72,80
6	1	-1	1	800	1:1	3,0	79,30
7	1	1	-1	800	3:1	1,0	73,20
8	1	1	1	800	3:1	3,0	76,12
9	1,68	0	0	868	2:1	2,0	72,92
10	-1,68	0	0	532	2:1	2,0	76,02
11	0	1,68	0	700	3,68:1	2,0	72,94
12	0	-1,68	0	700	0,32:1	2,0	85,80
13	0	0	1,68	700	2:1	3,68	71,46
14	0	0	-1,68	700	2:1	0,32	69,50
15	0	0	0	700	2:1	2,0	74,41
16	0	0	0	700	2:1	2,0	74,28
17	0	0	0	700	2:1	2,0	74,54

Fonte: O AUTOR, 2025

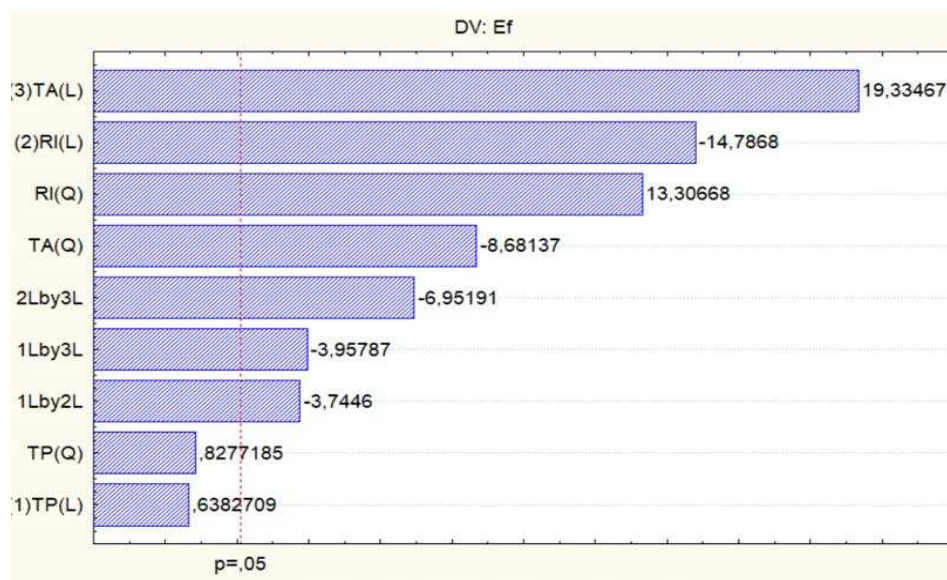
Esse modelo permitiu visualizar o comportamento e identificar a combinação ideal das variáveis independentes para otimizar a resposta (Novaes *et al.*, 2017). Com base nesses resultados do planejamento fatorial, foi possível determinar a tendência para a otimização das

variáveis independentes que resultará na resposta desejada, assim o melhor ponto para a adsorção o ponto 12 com a ativação de 0:32 para 1, em 2h de pirólise a 700 °C, que obteve maior porcentagem de adsorção do corante . Portanto, seguindo-se as próximas análises com o carvão ativado do ponto 12 do planejamento fatorial (ativação de 0:32 para 1, em 2h de pirólise a 700 (°C)).

Adicionalmente, para além dos pontos do desenho experimental, realizou-se uma avaliação da adsorção do carvão produzido após a carbonização e do bagaço de malte, obtendo-se resultados de 64,90% para o carbonizado a 400 °C de 60,80% para o bagaço de malte, de capacidade de adsorção , evidenciando a melhoria da adsorção após ativação com K_2CO_3 , ressaltando que os resultados da adsorção dos 17 pontos foram maiores em comparação com o bagaço de malte e o carbonizado .

A influência da relação entre a variável dependente (porcentagem de remoção do Azul Reativo BF-5G) com as variáveis independentes (temperatura de pirólise (TP), (razão de impregnação do ativador K_2CO_3 (RI) e (tempo de ativação (TA) é apresentada no diagrama de Pareto da Figura 9.

FIGURA 9 – DIAGRAMA DE PARETO: INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS E DE SUAS INTERAÇÕES SOBRE AS VARIÁVEIS DE RESPOSTA



(razão de impregnação do ativador K_2CO_3 (RI) e (tempo de ativação (TA))

Fonte: O AUTOR, 2025

Os valores absolutos dos efeitos padronizados desde o maior até o menor efeito são evidenciados pelo diagrama de Pareto, em que a linha tracejada de referência é utilizada para identificar quais efeitos foram estatisticamente significativos ($p=0,05$). Portanto todos os fatores que ultrapassam esta linha interferem no rendimento de adsorção do composto em estudo. Considerando o resultado do diagrama de Pareto, a temperatura de pirólise não foi significativa. A razão de impregnação e o tempo de ativação foram significativos interferindo nos resultados do experimento, inclusive com relação significativa quadrática de cada uma delas e relação significativa linear entre as duas variáveis. A tabela 5 apresenta estimativa dos coeficientes de regressão do modelo para as variável resposta, as variáveis destacadas em vermelho são significativas , já a em negrito não significava.

TABELA 5 – ESTIMATIVA DOS COEFICIENTES DE REGRESSÃO DO MODELO PARA AS VARIÁVEL RESPOSTA

Fatores	Efeito	Erro Puro	t (19)	p	Intervalo de confiança (-)	Intervalo de confiança (+)
Intercepto	74,421	0,0243	3062,58	0,000	74,370	74,4711
(1) TP (L)	0,098	0,2280	4,313	0,0003	-0,05070	0,1463
TP (Q)	-0,031	0,0225	-1,243	0,2289	-0,0839	0,0213
(2) RI (L)	-3,389	0,0228	-148,42	0,000	-3,4370	-3,3417
RI (Q)	-3,440	0,0251	136,77	0,000	3,3880	3,4930
(3) TA (L)	4,188	0,0228	183,43	0,000	4,1410	4,2360
TA (Q)	-2,830	0,0251	-112,50	0,000	-2,8820	-2,7770
1L e 2L	-1,060	0,0298	-35,54	0,000	-1,1220	-0,9970
1L e 3L	-1,625	0,029	-54,48	0,000	-1,1687	-1,5620
2L e 3L	-2,245	0,0298	-75,27	0,000	-2,3070	-2,1820

t (19) teste t com 19 graus de liberdade; valor p (*p-value*); razão de impregnação do ativador K_2CO_3 (RI) e (tempo de ativação (TA))

Fonte: O AUTOR, 2025.

A Tabela 5 mostra que o efeito quadrático da temperatura de pirólise não foi variável significativa. Os coeficientes de determinação alcançado $R^2 = 0,982$ para variável resposta demonstram um bom valor de ajuste do modelo aos dados, a um nível de confiança de 95%,

indicando que o modelo é capaz de explicar grande parte da variabilidade apresentada pelas respostas. A tabela 6 apresenta a Anova gerada pelo software Statistica7 as variáveis destacadas em vermelho são significativas, já as em negrito são não significava.

TABELA 6 – ANOVA GERADA PELO SOFTWARE STATISTICA7

Fatores	ss	df	Ms	F	p
(1) TP (L)	0,066	1	0,0662	18,60	0,000375
TP (Q)	0,005	1	0,005	1,55	0,2289
(2) RI	78,382	1	78,383	22030	0,000
RI (Q)	66,550	1	66,555	18706	0,000
(3) TA (L)	119,7	1	119,700	33646	0,000
TA (Q)	45,029	1	45,029	12656	0,000
1L e 2L	4,494	1	4,494	12632	0,000
1L e 3L	10,562	1	10,562	56665	0,000
2L e 3L	20,160	1	20,160	56665	0,000
Lack of Fit	152,050	5	0,002	1,6611	0,211
Pure Erro	0,0676	19	0,003		
Total SS	543,140	33			

SS = Soma dos Quadrados, df = Graus de Liberdade; Ms = Quadrado Médio; F = F calculado; p (*p-value*).

Fonte: O AUTOR, 2025.

A Análise de variância (ANOVA) indicou que o modelo linear é adequado para a descrição da região experimental estudada, pois o modelo apresenta falta de ajuste não significativa, a falta de ajuste obteve valor maior do que o p ($p = 0,05 < 0,211$). Como $p > 0,05$, não há evidências estatísticas suficientes para afirmar que há falta de ajuste significativa no modelo, portanto o modelo não apresenta uma falta de ajuste estatisticamente significativa, ou seja, ele consegue representar bem os dados dentro do nível de confiança adotado (geralmente 95%). Isso sugere que não há necessidade de modificar o modelo, pois os desvios entre os valores

previstos e os observados podem ser atribuídos ao acaso e não a uma deficiência estrutural do modelo.

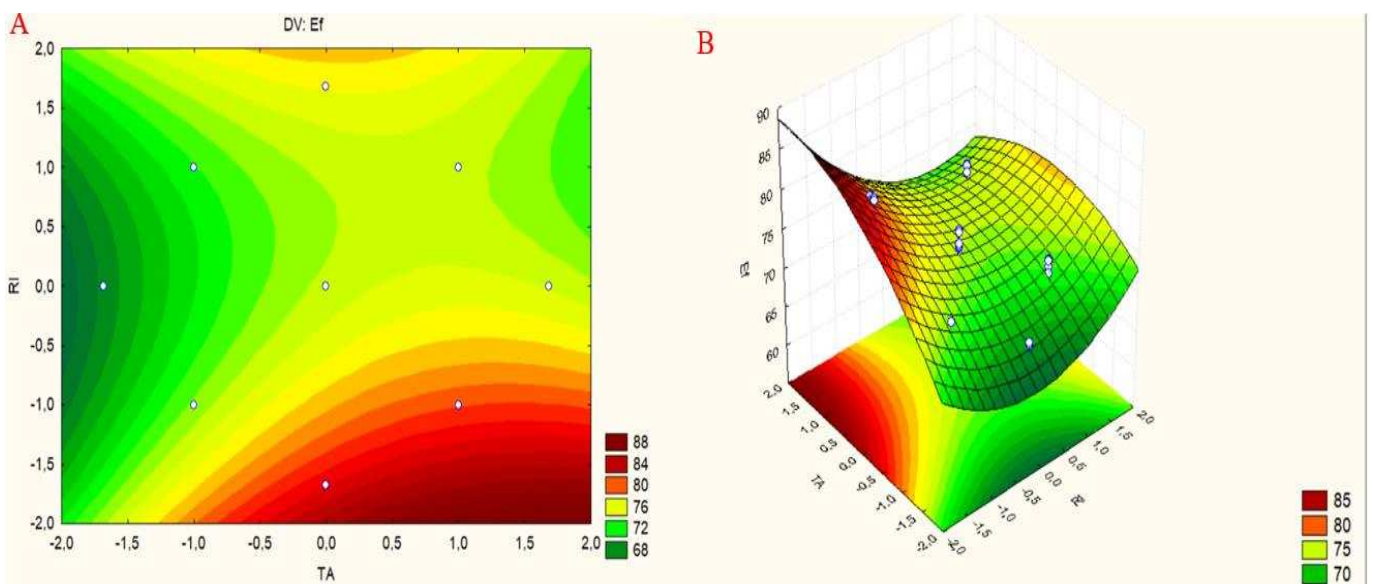
Os fatores com $p \leq 0,05$ são estatisticamente significantes, de acordo com o teste F da Análise de Variância (ANOVA), que ressalta que como TP(Q) o valor p foi $0,2289 > 0,05$, o efeito do termo TP(Q) não é estatisticamente significativo.

O método de superfícies de resposta (MRS) se baseia na criação de um modelo de regressão que descreve a relação entre as variáveis independentes e a variável de resposta, que permite visualizar o comportamento e identificar a combinação ideal das variáveis independentes para otimizar a resposta (Novaes *et al.*, 2017).

As superfícies de resposta do planejamento (Figuras 10 A e 10 B), que representam graficamente a relação entre a resposta e pares de variáveis significativas de forma tridimensional, são utilizadas para a otimização de processos.

Esses gráficos também são recursos úteis para avaliação e permitem a visualização da região com melhor resultado tendendo a um ponto do sistema para maximização da resposta de um planejamento fatorial representado pela (área vermelha).

FIGURA 10 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA



a) Superfície de resposta e (b) Gráfico de contorno, obtidos a partir dos resultados do planejamento fatorial, razão de impregnação (RI) versus tempo de ativação (TA).

Fonte: O AUTOR, 2024.

Ao examinar as superfícies de resposta pode-se observar que os rendimentos com melhor eficiência são obtidos com maiores valores de tempo de ativação e menores valores de razão de ativação, a partir desse resultado que valida o ensaio de adsorção, assim pode-se selecionar um ponto dentro do planejamento fatorial, escolhendo o que obteve melhor resultado para adsorção o ponto 12 do planejamento experimental. Assim, as análises de cinética, isoterma e as caracterizações dos carvões obtidos foram realizadas com ponto 12 do planejamento fatorial, que obteve a (razão de ativação de 0:32 para 1 em 2h de pirólise a 700 °C). A Figura 11 apresenta o carvão vegetal ativado do ponto 12 do planejamento fatorial.

FIGURA 11 - CARVÃO ATIVADO DO PONTO 12 DO PLANEJAMENTO FATORIAL



Fonte: O AUTOR, 2025.

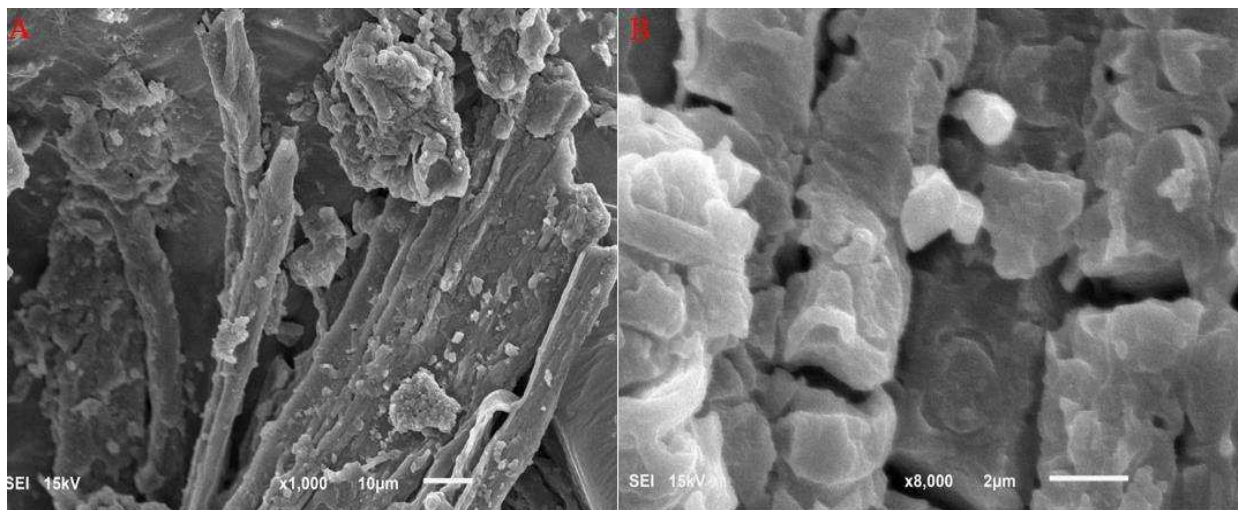
5.3. Caracterização do Carvão Ativado

5.3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As imagens MEV das amostras do bagaço de malte foi realizada no Laboratório de Microscopia de Eletrônica de Varredura (DPF-UFV), carvão não ativado e o carvão ativado no ponto 12 do planejamento experimental são exibidas permitindo avaliar a formação de poros no carvão ativado, visível quando comparamos com as imagem do MEV do bagaço e do carvão não

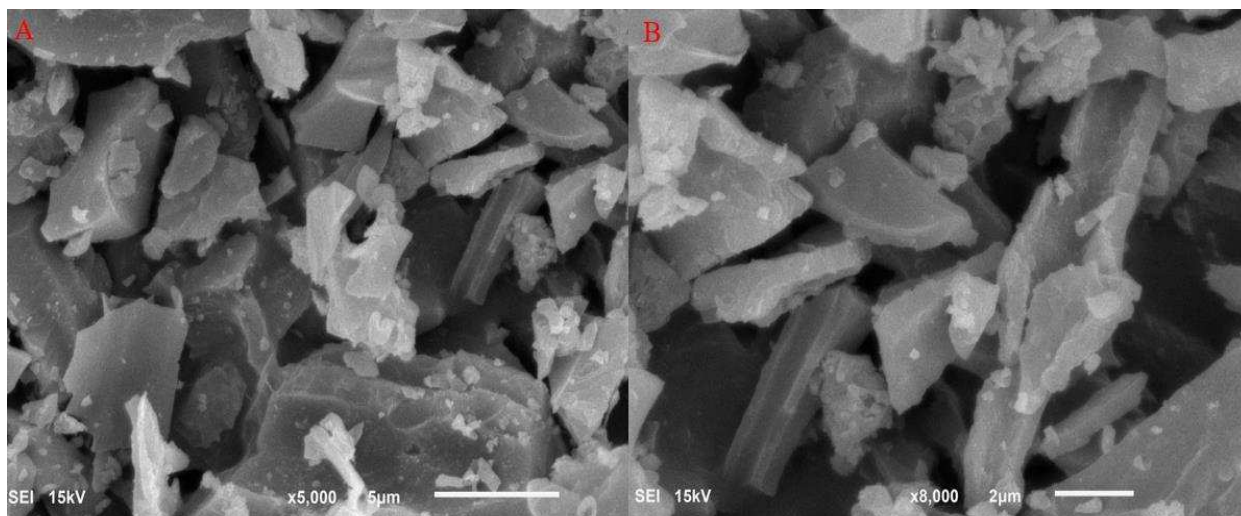
ativado. A Figura 12 apresenta o MEV do bagaço de malte.

FIGURA 12 - MEV DO BAGAÇO DE MALTE EM: A) EM 1.000X; B) EM 8.000X



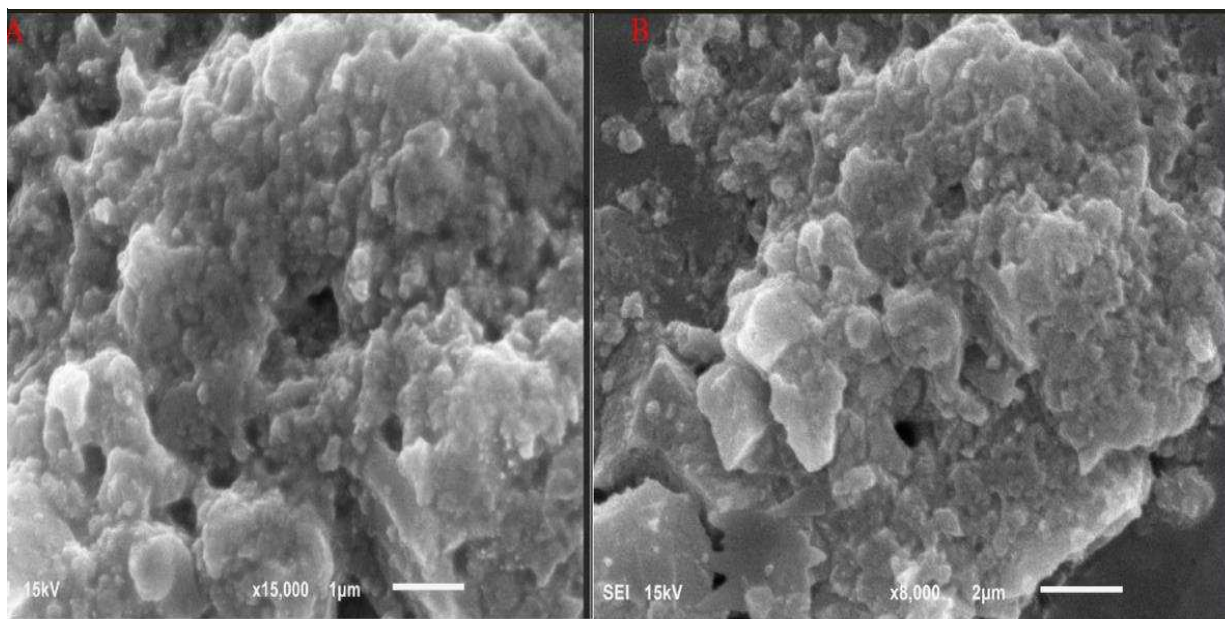
Fonte: O AUTOR, 2025.

Na imagem da MEV do bagaço de malte (Figura 12) foi possível verificar a sua morfologia evidenciando as fibras vegetais presentes. Tanto na Figura A, quanto na Figura B (maior aumento), não se evidencia a presença de poros na superfície do bagaço de malte. A figura 13 apresenta a MEV do carvão antes da ativação, a MEV foi realizada no Laboratório de Microscopia de Eletrônica de Varredura (DPF-UFV).

FIGURA 13 - MEV DO CARVÃO NÃO ATIVADO EM: 8000X

Fonte: O AUTOR, 2025.

Na MEV do carvão não ativado (Figura 13) foi possível notar que não se evidencia a presença de poros na estrutura do carvão, nem na Figura A nem na Figura B com maior aumento. A figura 13 apresenta o MEV do carvão ativado no ponto 14 do planejamento central, a MEV no Laboratório de Microscopia de Eletrônica de Varredura (DPF-UFV).

FIGURA 14 - MEV DO CARVÃO ATIVADO NO PONTO 12 EM : A) EM 15.000X ; B) EM 8.000X

Fonte: O AUTOR, 2025.

Nota-se na Figura 14 que o carvão ativado no ponto 12, revelaram uma infinidade de pequenos poros e canais, representando uma diversificada em vários níveis, segundo Singh *et al.*, (2023) a ativação com K_2CO_3 promove alta formação de poros, que podem ser vistos no MEV. Esses poros exibiam formas irregulares com uma vasta distribuição (Ullah *et al.*, 2022). Essas imagens revelam a formação de estruturas altamente porosas de tamanhos variados no carvão ativado que indicam o desenvolvimento de uma matriz de carbono de alta porosidade, característico da ativação com K_2CO_3 (Sing *et al.*, 2023).

Além disso, a superfície da amostra do carvão ativado exibiu texturas intrincadas e características microscópicas, indicando a presença abundante de grupos funcionais e a formação de estruturas altamente porosas de tamanhos variados na amostra de carvão ativado e indicam o desenvolvimento de uma matriz de carbono de alta porosidade essas características coletivas contribuíram para capacidade de adsorção do carvão ativado (Laiquan *et al.*, 2023).

5.3.2 Difractometria de Raios X (DRX)

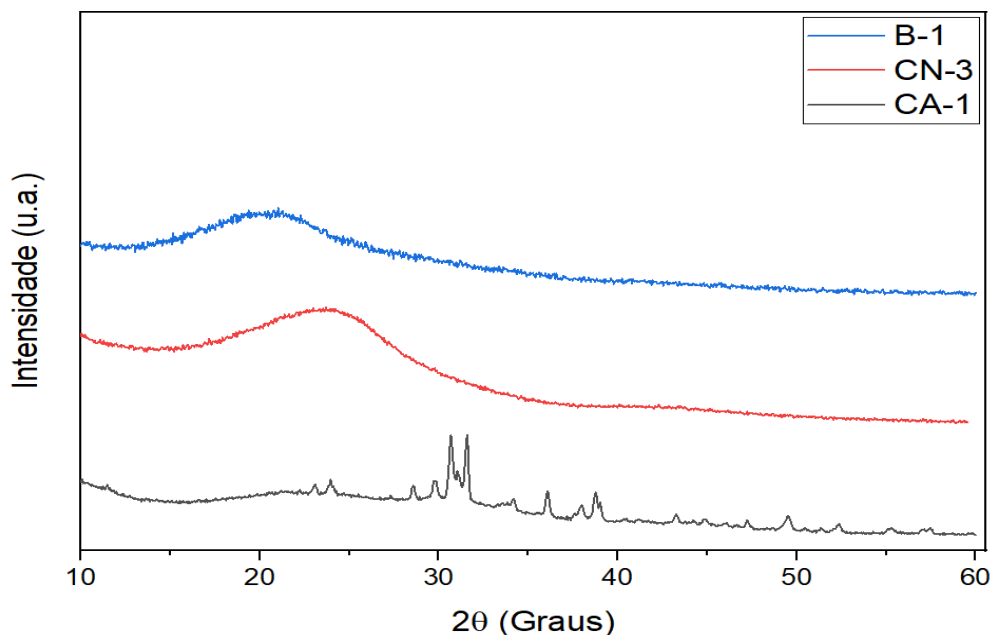
A difratometria de Raios-X (DRX) é de grande valia para carvões ativados com o

objetivo de obter informações estruturais de amostras. Essa técnica gera dados a partir de uma matriz cristalográfica, permitindo a identificação dos diferentes componentes mineralógicos.

A amostra de bagaço de malte e do carvão não ativado (carbonizado) apresentou comportamento típico de estrutura amorfa com uma banda amorfa entre os ângulos 15° e 30° com diferença do carbonizado com aís próximo do 30° (Saravanakumar *et al.*, 2019).

Já o CA-1: Carvão ativado no ponto 12 do planejamento experimental, apresentou mostra característicos em 25° , 30° , 39° , indicativos de características associadas ao grafite, correspondendo aos planos cristalinos, resultado do acréscimo da temperatura, há aumento da formação de cristais gráfiticos resultantes de mudanças na matriz carbonácea, durante o processo de produção do carvão e da ativação, modificações que contribuem para adsorção (Saravanakumar *et al.*, 2019). A Figura 15 apresenta DXR Laboratório de Difratomia de Raios-X (DPF-UFV), onde foi realizada a análise carvão ativado, bagaço de malte e do carbonizado.

FIGURA 15 - DXR DO CARVÃO ATIVADO, BAGAÇO DE MALTE E DO CARBONIZADO



B-1 : bagaço de Malte . CN-3 :Carvão não ativado (carbonizado): CA-1: Carvão ativado no ponto 12 do planejamento experimental.

Fonte: O AUTOR, 2025.

Os picos no CA-1 de 39° a 60° , indicativos de características associadas a presença de

átomos derivados do ativante K_2CO_3 (Saravanakumar *et al.*, 2019).

5.3.3 Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR)

Para carvões ativados, avaliar os grupos funcionais e suas características é muito importantes para determinar propriedades superficiais dos carvões e sua qualidade. A espectroscopia FT-IR que foi realizada no Laboratório Nanomateriais & Química Ambiental – (LaNaQuA), é uma técnica muito utilizada por ser muito clara para fornecer informações úteis sobre estruturas na determinação de tipos e intensidades de seus grupos funcionais de superfície. Os resultados do infravermelho por transformada de Fourier foram representados graficamente na Figura 16.

FIGURA 16 - FTIR DO CARVÃO ATIVADO, BAGAÇO DE MALTE E DO CARBONIZADO

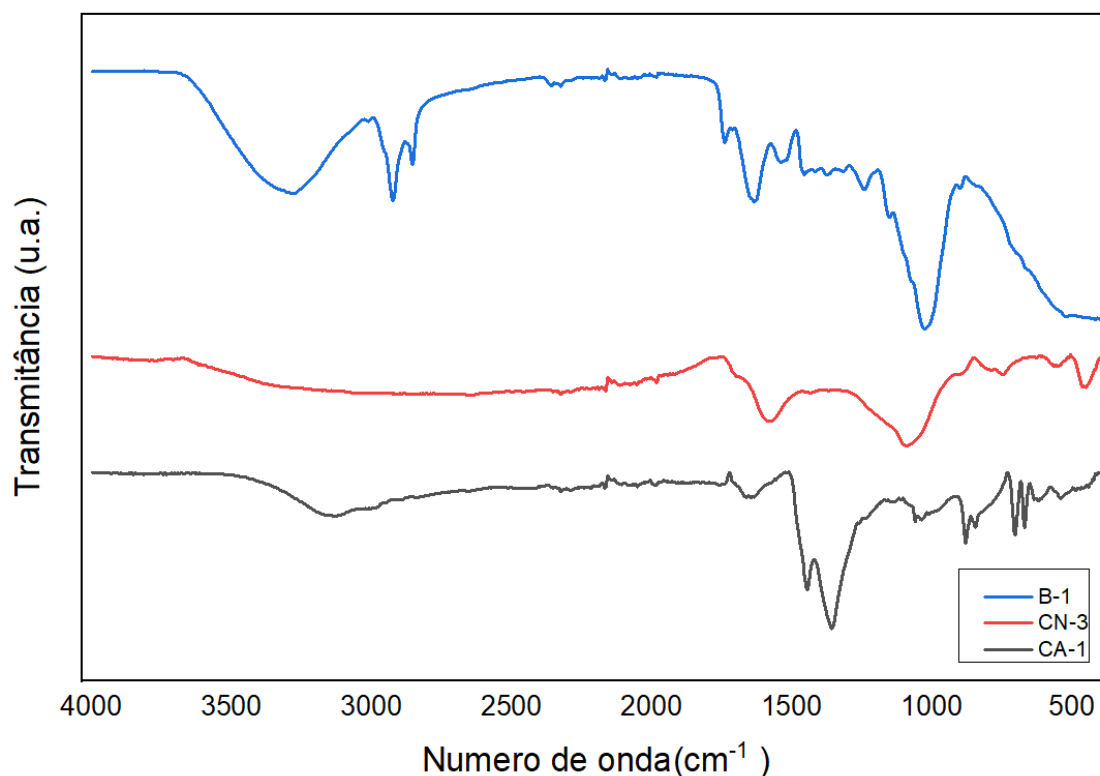


Figura 16 - FTIR do carvão ativado, bagaço de malte e do carbonizado.

B-1 : bagaço de Malte . CN-3 :Carvão não ativado (carbonizado): CA-1: Carvãoativado no ponto 12 do planejamento experimental.

Fonte: O AUTOR, 2025.

No espectro FT-IR do bagaço de malte (B1) destacam-se bandas em 2900 e 3000 cm^{-1} que são provavelmente referentes aos estiramentos das ligações C-H de alcanos. Nota-se que estas bandas, presente no (B1) não estão presentes em CA-1 e nem em CN-3, provavelmente foram retirados pelo aquecimento na carbonização e pirólise (Pavia *et al.* , 2015) .

Já a banda em 900–1000 cm^{-1} é atribuído a vibrações de flexão CH em CH_3 em grupos para o bagaço de mate (B1), uma banda não vista após a pirólise. Observamos pico menores das bandas entre 1000 e 500 cm^{-1} , presente em para o (CA- 1) , provável presença da vibração da ligação do potássio utilizado na ativação (Pavia *et al.* , 2015) .

A banda no comprimento de onda de 1000 - 1100 cm^{-1} é referente às ligações glicosídicas dos grupos carboxílicos formados por ligações simples entre carbono e oxigênio em B-1. Essas ligações são relativamente fracas e tendem a se romper com o incremento da temperatura final de carbonização motivo de estar presente com uma banda maior no (B-1) (Pavia *et al.* , 2015). .

As degradações das hemiceluloses e celulose foram as principais alterações químicas observadas, expressas pelo decréscimo nas intensidades dos picos nos comprimentos de entre 2500 - 3000 cm^{-1} presente no bagaço de mate e ausente no carvão ativado. Na faixa de 1700 cm^{-1} e 1400 cm^{-1} , correspondentes às vibrações de grupos O-H e C=O e C-O, respectivamente para o bagaço de malte, diminuindo após a carbonização e retornando após a ativação esses grupos atuam positivamente na adsorção (Pavia *et al.* ,2015). Nessa análise foi possível observar que os espectros analisados demonstram a capacidade do agente ativante em alterar a superfície química do carvão ativado.

5.3.4 Área superficial BET

A análise BET que foi realizada no Laboratório de Catálise Homogênea e Heterogênea (DEQ-UFV), sendo aplicada ao bagaço de malte seco, o carvão não ativado e ao carvão ativado no ponto central e no ponto de melhor adsorção (ponto 12 do planejamento experimental), construiu-se a Tabela 7.

TABELA 7 - PROPRIEDADES TEXTURAIAS DO BAGAÇO DE MALTE SECO, DO CARVÃO NEUTRO E DO CARVÃO APÓS A ATIVAÇÃO.

Amostra	Área superficial (BET) (m²/g)	Volume total de poros (cm³/g)	Diâmetro médio do poro (nm)
Bagaço de malte seco	1,350	--	--
carvão não ativado	2,898	0,0016	0,0001
Carvão Ativado (Ponto 12)	3,503	0,5930	0,0280
Carvão Ativado (Ponto Central)	2,890	0,1269	0,0183

Fonte: O AUTOR, 2025

Podemos verificar pelo BET que a área superficial expandiu após as etapas de carbonização e ativação do carvão. Além disso, percebe-se que a ativação química com carbonato de potássio promoveu um aumento no volume total de poros e o diâmetro médio desses poros, melhorando assim a adsorção do corante.

5.3.5 Ponto de Carga Zero.

O pH_{PZC} que foi realizado no Laboratório Protec (DEQ-UFV), pode ser usado para entender as interações eletrostáticas entre a superfície do material adsorvente e o corante e indica o pH do meio no qual a superfície do material terá um somatório de cargas neutro, ou seja, igual à zero . Construiu-se a Tabela 8 onde podemos visualizar o resultado do experimento de Ponto de Carga Zero do Carvão Ativado.

TABELA 8 - RESULTADO DO EXPERIMENTO DE PONTO DE CARGA ZERO DO CARVÃO ATIVADO

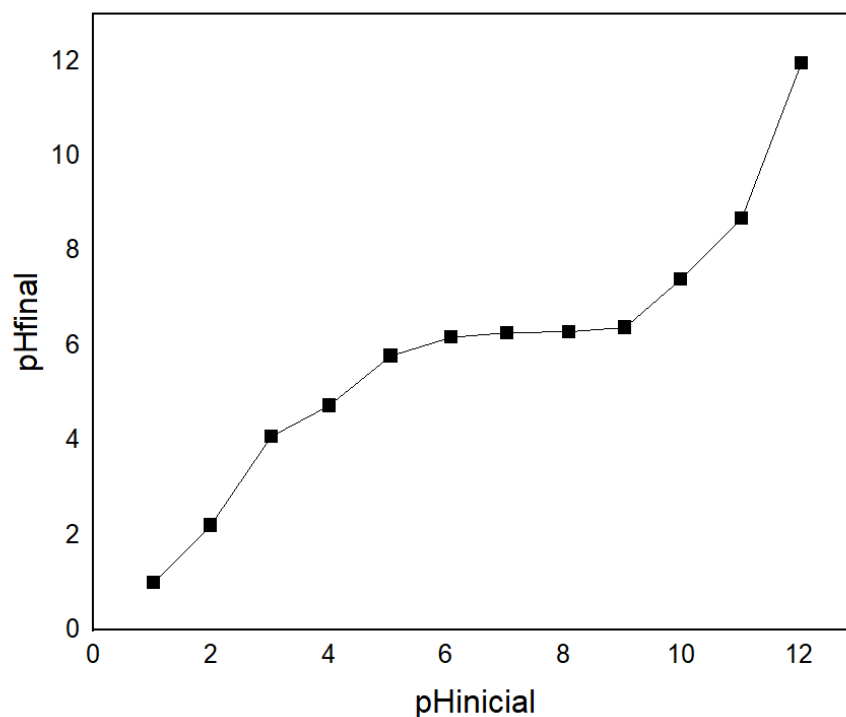
Amostra	pH_{inicial}	pH_{final}
1	1,03	1,01
2	2,00	2,22
3	3,03	4,09
4	4,01	4,74
5	5,06	5,79
6	6,08	6,18
7	7,04	6,28
8	8,09	6,30
9	9,04	6,39
10	9,98	7,40
11	11,02	8,69
12	12,03	11,96

Fonte: O AUTOR, 2025

Considerando os valores de pH_{final} observados na tabela 8, percebe-se uma forte região de tamponamento nas amostras 6,7,8,9, a partir dos valores obtidos nesses pontos calculou-se a média aritmética de mesmo e definiu-se o pH_{PCZ} igual a 6,28.

Para evidenciar o comportamento do experimento e a região de tamponamento construiu-se o gráfico representado na Figura 17.

FIGURA 17 – PONTO DE CARGA ZERO DO CARVÃO ATIVADO



Fonte: O AUTOR, 2025

Pelo gráfico pode-se perceber o comportamento do experimento e a região de tamponamento para o carvão ativado no ponto central.

5.4. Ensaio de pH

Foi realizado o experimento para avaliar o efeito do pH na adsorção do corante e os resultados foram explicitados na tabela 9 a análise do pH foi realizada no Laboratório Protec (DEQ-UFV).

TABELA 9 - RESULTADO DO ENSAIO DE pH REALIZADO

pH	qe (mg/gcarvão)	E(%)
1	50,12	60,15
2	50,17	73,18
4	50,21	50,25
7	50,19	33,59
10	50,12	25,39

Fonte: O AUTOR, 2025

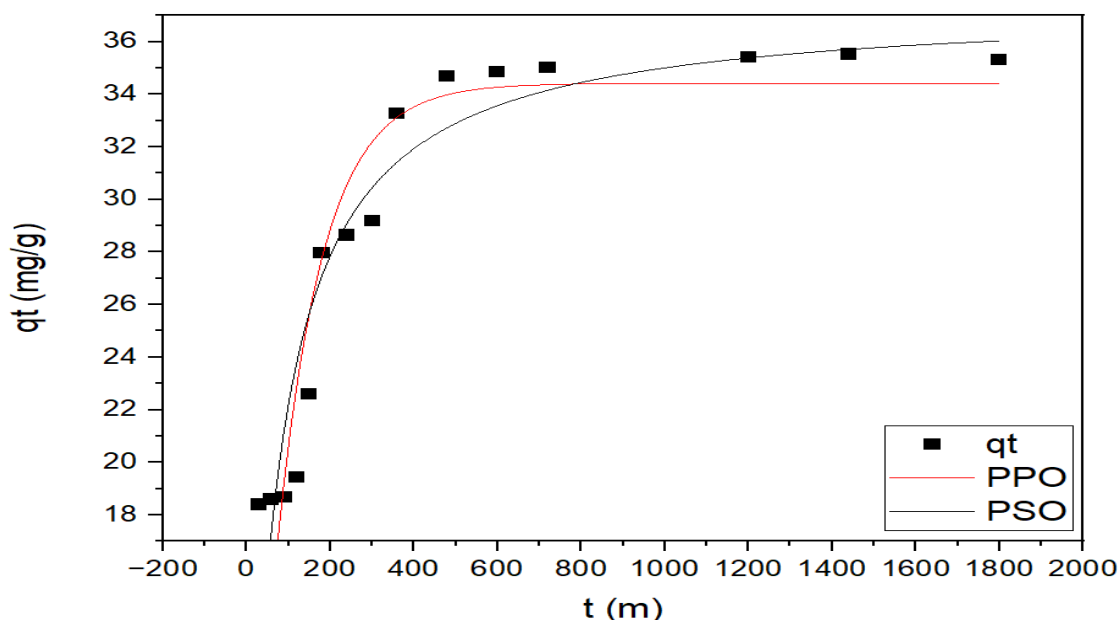
A partir da tabela 9 é possível se perceber que, a eficiência da adsorção diminui a medida em que o pH vai ficando mais básico. Ainda pode-se observar que com a mudança do pH = 1 para o pH = 2 houve aumento da eficiência, enquanto do pH = 2 a partir do pH = 4 houve diminuição da eficiência. Esse resultado pode ser explicado pelo pHPCZ visto que o ponto se encontra na região abaixo da região tamponamento e, portanto, com carga positiva, apropriada para adsorver corantes aniônico como o azul reativo BF-5G, utilizado no experimento.

5.4.1 Cinética de Adsorção

Para obter o tempo necessário para atingir o equilíbrio de adsorção, realizou-se o experimento da cinética de adsorção. Dessa forma, foi possível observar que o tempo de equilíbrio foi aproximadamente superior a 600 segundos. Os modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem foram ajustados aos dados e representados na figura 18 figura. A análise de cinética foi realizada no Laboratório Protec (DEQ-UFV).

18 - Modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem (PPO), pseudo-segunda ordem (PSO) ajustados aos dados experimentais obtidos para adsorção do azul reativo BF-5G com o carvão.

FIGURA 18 - MODELOS CINÉTICOS DE PSEUDO-PRIMEIRA ORDEM (PPO), PSEUDO-SEGUNDA ORDEM (PSO) AJUSTADOS AOS DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS PARA ADSORÇÃO DO AZUL REATIVO BF-5G COM O CARVÃO.



Fonte: O AUTOR, 2025.

Pode-se perceber, pelos resultados obtidos, que o modelo que melhor se ajustou foi o de pseudo-segunda ordem ($R^2 = 0,907$), dando uma boa correlação dos dados cinéticos que revela o mecanismo de adsorção, indicando que as interações químicas entre adsorvente e adsorbato e os sítios de adsorção da superfície do carvão ativado ocorreram durante o processo de adsorção (Feng *et al.* (2022)). A tabela 10 modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem ajustados aos dados experimentais obtidos para adsorção do azul reativo BF-5G com o carvão ativado 0:32 para 1 em 2h de pirólise a 700 °C.

TABELA 10 . PARÂMETROS CINÉTICOS DA ADSORÇÃO DO CORANTE AZUL REATIVO BF-5G

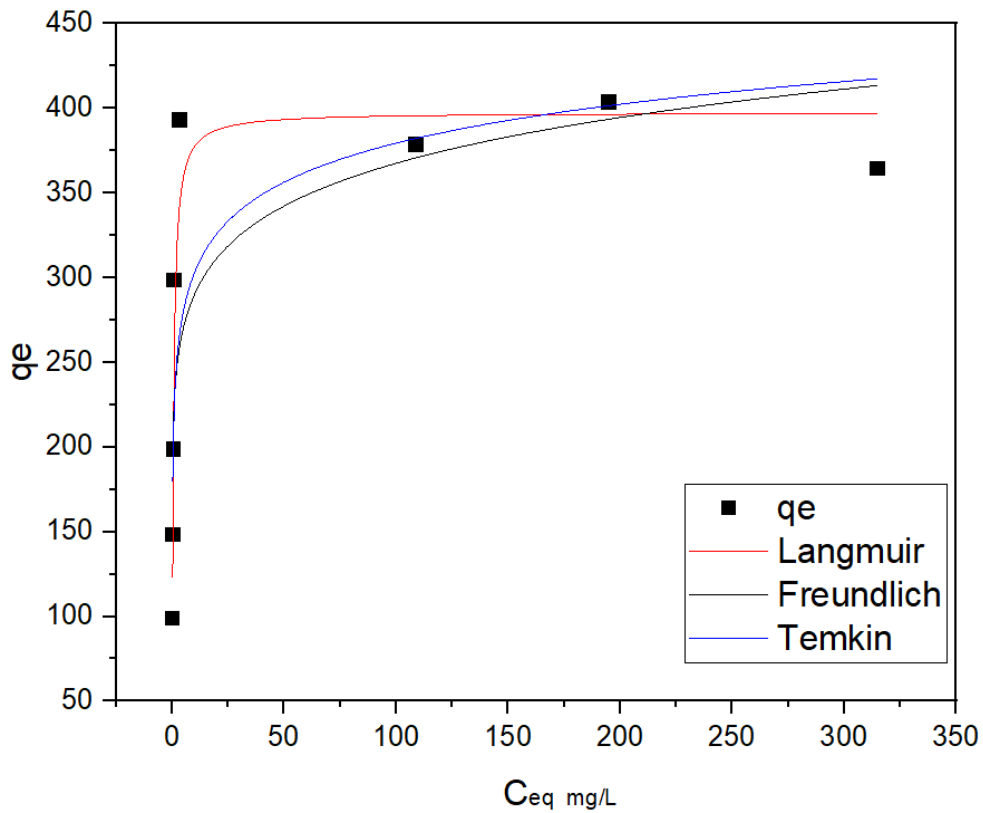
Modelo	Parâmetro	Valor
Pseudo-primeira ordem (PPO)	$q_{e,cal}$ (mg/g)	344,5
	k_1 (min^{-1})	$3,040 \cdot 10^{-4}$
	R^2	0,889
Pseudo-segunda ordem (PSO)	$q_{e,cal}$ (mg/g)	397,4
	k_2 (g/mg.min)	$8,340 \cdot 10^{-7}$
	R^2	0,907

Fonte: O AUTOR, 2025.

5.4.2 Isotermas de adsorção

Os modelos de isoterma Langmuir, Freundlich e Temkin foram realizadas as análises no Laboratório Protec (DEQ-UFV) , sendo foram ajustados aos dados experimentais de adsorção, cujos adsorventes foi o carvão correspondente às condições do ponto 12 do planejamento experimental. Os resultados das isotermas foram representados graficamente na Figura 19 gerada por meio do software Origin 9 ®.

FIGURA 19 – ISOTERMAS DE ADSORÇÃO DO CORANTE NO CARVÃO ATIVADO



Fonte: O AUTOR, 2025.

As equações ajustadas para cada modelo foram registradas na tabela 11. O modelo de Langmuir apresentou maior valor R^2 , sendo igual a 0,92624. Para o modelo de Freundlich, o R^2 foi de 0,7155 e para Temkin R^2 foi 0,6748. O modelo de Langmuir sugere que o processo de adsorção ocorre em uma superfície homogênea, adsorção em monocamada onde o adsorvente é ligado a superfície em sítios definidos (Feng *et al.* (2022)). A tabela 11 parâmetros dos modelos de Langmuir, Freundlich e Temkin para o equilíbrio de adsorção do corante azul reativo BF-5G em carvão ativado com K_2CO_3 .

TABELA 11 . PARÂMETROS DOS MODELOS DE LANGMUIR, FREUNDLICH E TEMKIM

Modelo	Parâmetro	Valor
Langmuir	q_m (mg/g)	397,4
	k_l (L/mg)	1,874
	R^2	0,926
Freundlich	k_f ($\text{mg}^{1-(1/n)} \text{g}^{-1} \text{L}^{1/n}$)	229,2
	n	9,750
	R^2	0,715
Temkim	A	940,0
	B	33,1
	R^2	0,674

Fonte: O AUTOR, 2025.

A capacidade máxima (q_m) de adsorção do carvão ativado no ponto 12 do panejamento fatorial (razão de ativação de 0:32 para 1 em 2h de pirólise a 700 °C), resultantes do modelo de Langmuir foi igual a 397, 4 mg/g, uma capacidade de adsorção eficiente considerando trabalhos já realizados utilizando o corante azul reativo BF-5G apresentados na tabela 12 .

TABELA 12 . CAPACIDADE MÁXIMA DE ADSORÇÃO DE CORANTES REATIVOS BF-5G COM DIFERENTES ADSORVENTES

Corante reativo	Adsorção máxima (mg/ g)	Tipo de adsorvente	Ativador	Referência
BF-5 G azul	253,80	Escamas de peixe (<i>Oreochromis niloticus</i>)	---	Ribeiro <i>et al</i> (2015)
BF-5 G azul	72,43	Casca de soja	---	Honório <i>et al</i> (2016)
BF-5 G azul	52,30	Casca de Manihot Esculenta Crantz	---	Silva <i>et al</i> (2022)
BF-5 G azul	42,58	Bagaço de malte	---	Juchen <i>et al</i> (2018)
BF-5 G azul	31,10	Carvão vegetal à base de osso de tilápia	NaOH ,HCL	Bazarin <i>et al</i> (2024)
BF-5 G azul	82,83	Ossos de boi	KOH	Melo <i>et al</i> (2017)

Fonte: O AUTOR, 2025.

Comparando com outros trabalhos expostos na tabela 12 o carvão ativado (razão de ativação de 0:32 para 1 em 2h de pirólise a 700 °C) obteve resultados satisfatórios para capacidade máxima (q_m) igual a 397, 4 mg/g , como esperado nos resultados demonstrados nesse trabalho para adsorção do corante reativo azul BF-5G .

Quando comparamos o carvão ativado (razão de ativação de 0:32 para 1 em 2h de pirólise a 700 °C) com outro carvão ativado derivado de outro material e adsorvendo o corante azul de metileno , o trabalho de Ullah *et al.* (2022) que produziu carvão ativado a partir da pirólise de derivados de resíduos hospitalares e ativado com KOH e, posteriormente, utilizado para adsorção de azul de metileno com (q_m) igual a 343,4 mg/g , e o trabalho de Wang *et al* (2020) obteve (q_m) da isoterma de Langmuir para carvão vegetal modificado com sílica , na de esterco suíno e palha de arroz com (q_m) de 143,76 mg/g e 131,58 mg/g, respectivamente para adsorção de azul de metileno e Mildenberg (2019) (q_m) utilizando carvão ativado de bagaço de

malte ativado com H_3PO_4 para adsorção de azul de metileno obteve um (q_m) de 336,2 mg/g e comparou com o carvão ativado de uso comercial (CLARIMEX MP4) que obteve o (q_m) de 390,0 mg/g . Portanto comparando com resultados desses trabalhos o carvão ativado (razão de ativação de 0:32 para 1 em 2h de pirólise a 700 °C) com resultado de (q_m) de 397, 4 mg/g , obteve resultado satisfatório .

6. CONCLUSÃO

O presente estudo, demonstrou-se a viabilidade técnica do uso do carvão ativado com K_2CO_3 , obtido a partir do bagaço de malte seco, com os resultados obtidos se mostrando promissores na remoção de corante reativo azul BF-5G e evidenciando o potencial desse material para aplicações adsorptivas de outros poluentes. Esses resultados reforçam que o bagaço de malte seco é um material precursor para produzir um carvão ativado a partir de uma fonte alternativa e de baixo, oferecendo uma alternativa sustentável e eficiente para aproveitar esse abundante resíduo agrícola na indústria cervejeira.

As análises realizadas a partir de um planejamento experimental permitiram a otimização dos fatores para obtenção do carvão ativado por meio da metodologia de superfície de resposta. O tempo de ativação e a razão de impregnação foram significativos para aumento da eficiência de adsorção do corante pelo carvão ativado. Os resultados do planejamento experimental demonstraram também que a adsorção do carvão ativado em todos os pontos testados foi maior que a do carvão produzido após a carbonização e também do bagaço de malte obtendo um resultado de 64,90 % para o carvão não ativado e 60,80 %, em comparação da adsorção após a carbonização e pirólise o que menos adsorveu teve um resultado de 68,24 %. O maior valor de eficiência foi de 85,0 % com o ponto 12 do planejamento experimental (razão de ativação de 0:32 para 1 em 2h de pirólise a 700 °C).

A partir do carvão ativado que obteve melhor resultado para o ensaio de adsorção analisado pelo planejamento experimental foram realizados os ensaios de cinética e de isoterma de adsorção. No ensaio cinético, o modelo de pseudo-segunda ordem foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, indicando as interações químicas entre adsorvente e adsorbato, e dentre os modelos de isoterma, o modelo de Langmuir apresentou o melhor ajuste e indicou uma capacidade máxima de adsorção (q_m) de 397, 4 mg/ g evidenciando a eficiência da adsorção do carvão ativado no ponto 12 do planejamento fatorial (razão de ativação de 0:32 para 1 em 2h de pirólise a 700 °C) .

Em relação à caracterização do carvão ativado, as análises no MEV comparando-se o

bagaço de malte com o carvão ativado evidenciam que a formação de poros foi realizada pela ativação. A difratometria de Raios-X (DRX) foi realizada evidenciando mudanças estruturais das amostras depois da ativação do carvão vegetal, com formação de picos na análise do carvão ativado, diferente dos espectros do bagaço do malte e do carbonizado que tiveram comportamento amorfo. Pelos resultados obtidos no FTIR, foi possível notar as mudanças estruturais e a determinação de tipos e intensidades de seus grupos funcionais de superfície modificado pela carbonização e ativação, tanto a DXR e a FT-IR .

A produção do carvão desde o bagaço ao carvão ativado forneceu um aumento gradativo da área superficial BET, assim como o aumento da capacidade adsorptiva, salientando a importância de cada uma dessas etapas. A produção do carvão ativado em duas etapas foi eficiente na remoção do corante reativo azul BF-5G, com a impregnação do carvão neutro com carbonato de potássio demonstrou-se uma etapa crucial para todo o processo, pois elevou significativamente a eficiência na adsorção, bem como o potencial de aumento da porosidade e área superficial do carvão ativado no ponto 12 do planejamento fatorial e 3,503 (m²/g) porosidade de 0,593 cm²/g, partindo da biomassa com 1,35 (m²/g) e porosidade praticamente nula , e do carvão neutro com 2,898) (m²/g) e porosidade de 0,00163 cm²/g.

Portanto, esta pesquisa proporcionou um estudo da capacidade de produção de carvão vegetal a partir do bagaço de malte ativado com K₂CO₃ produzindo bons resultados na adsorção do corante reativo azul BF-5G , se mostrando uma forma viável para o tratamento deste efluente da indústria têxtil .

7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O estudo utilizou o bagaço de malte como material precursor na produção de um carvão ativado com elevada afinidade no tratamento do corante azul Reativo BF-5G . Mas visando contribuir de forma complementar são sugestões para trabalhos futuros:

Realizar um balanço energético do processo desde a secagem do bagaço até a pirólise.

Ampliar o estudo com a verificação de outros fatores como diferentes agentes químicos, razão de impregnação, tempo de pirólise e tempo de ativação.

Estudar a reutilização da água de lavagem e a recuperação do agente ativante.

Avaliar a capacidade adsorptiva do carvão ativado obtido para outros poluentes.

Testar com diferentes efluentes industriais.

Avaliar a viabilidade econômica do processo proposto.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J. E. R.; CORSO, C. R. Acid Blue 161: **Decolorization and Toxicity Analysis After Microbiological Treatment. Water, Air, & Soil Pollution.** Repositório Institucional da UNESP, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-016-3042-5>. Acesso em: 13 mar. 2024.

ARIE, A. A. R. H.; KRISTIANO, E. C.; CENGIZ, R.; CAKAN, D. **Preparation of salacca peel-based porous carbons by K₂CO₃ activation method as cathode materials for LiS battery.** Carbono Lett., 2020, p. 207-213. Disponível em: DOI10.1007/s42823-019-00085-1. Acesso em: 5 nov. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO. **Panorama da indústria têxtil brasileira 2024.** São Paulo: ABIT, 2024. Disponível em: <https://www.abit.org.br> . Acesso em: 28 fev. 2025.

ATKINS, P. W.; JONES, Loretta; LAVERMAN, Leroy. **Princípios de Química: Questionando a Vida Moderna e o Meio Ambiente.** São Paulo: W.H. Freeman, 2018.

BARBOSA, L. C. A. **Espectroscopia no Infravermelho na caracterização de compostos orgânicos.** Viçosa: Ed. UFV, 2007. 189 p.

BARCELLOS, I. O.; GIOVANELLA, R. F.; CHIARELLO, L. M.; BLOSFELD, A. M. **Remoção de cor de soluções de corantes reativos com cinza de casca de arroz.** Dynamis Revista Técnico-Científica, n. 2, v. 15, p. 1-6, 2009.

BAZARIN, G.; MÓDENES, N. A.; QUINONES, R. E. F.; BORBA, E. C.; TRIGUEROS, E. G. D.; DAL'LOGLIO. **High removal performance of reactive blue 5G dye from industrial**

dyeing wastewater using biochar in a fixed-bed adsorption system: Approaches and insights based on modeling, isotherms, and thermodynamics study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111761> . Acesso em: 27 dez. 2024.

BIN LI, YINGYING HUANG, ZIXIN WANG, JIALI LI, ZHUO LIU, SHISUO FAN. **Enhanced adsorption capacity of tetracycline on tea waste biochar with KHCO_3 activation from aqueous solution.** *Environmental Science and Pollution Research*, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-13817-6>. Acesso em: 22 dez. 2024.

BOINA, R. F.; RAMOS, B. P.; DE FREITAS, R. M.; FERRAZ FREITAS, R.; RODRIGUES, J. D.; MARCOS MADEIRA RODRIGUES, J.; DE OLIVEIRA BOINA, W. L.; HENRIQUE SALES, D.; LEME, T. S.; TEIXEIRA, S. R.; PEREIRA, N. C. **Ceramic adsorbent material in removing reactive blue bf 5G dye from synthetic wastewater.** *Separation and Purification Technology*, [S. l.], v. 331, p. 125555, 2024. DOI: [10.1016/j.seppur.2023.125555](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125555). Acesso em: 10 fev. 2025.

BRASIL. **Ministério da Agricultura e Pecuária. Anuário da Cerveja 2024: ano de referência 2023.** Brasília, DF: MAPA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura>. Acesso em: 28 fev. 2025.

CADERNOS DE CIÊNCIA & TECNOLOGIA. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 37, n. 3, e26715, 2020. DOI: [10.35977/0104-1096.cct2020.v37.26715](https://doi.org/10.35977/0104-1096.cct2020.v37.26715).

CALIJURI, M. do C.; CUNHA, D. G. F. (Coord.). *Engenharia Ambiental*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

CERVELIN, Patrícia C. **Avaliação da remoção do corante comercial reativo azul 5G utilizando *Macrófita Salvinia sp.*** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/1893> . Acesso em: 12 jan. 2024.

CHA, J. S.; PAR, S. H.; JUNG, S. C.; RYU, C.; JEON, J.; SHIN, M. C.; PARK, Y. K. **Production and utilization of biochar: A review.** *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2016. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2016.06.002> . Acesso em: 31 out. 2024.

CHAVES, N. O.; CARVALHO, L. F. C.; OLIVEIRA, R. M. B. P. **As principais técnicas utilizadas para remoção de corantes das águas residuais da indústria têxtil: uma revisão,** 2022. Disponível em: DOI: 10.22407/1984-5693.2022.v14.p.e20221406 . Acesso em: 9 jan. 2024.

CHO, D. W.; KWON, G.; YOON, K.; TSANG, Y. F.; YONG, G.; KWON, W.; SONG, H. **Simultaneous production of syngas and magnetic biochar via pyrolysis of paper mill sludge using CO₂ as reaction medium.** *Energy Conversion and Management*, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.095>. Acesso em: 3 nov. 2024.

DEDAVID,B,A; GOMES, C,I; MACHADO,G . **Microscopia Eletrônica de Varredura- Aplicações e preparação de amostras** . PORTO ALEGRE 2007; EDIPUCRS, 2007. Disponível em : <https://hdl.handle.net/10923/22337> . Acesso em : 28 fev. /2024 .

DEWEI ,W; SHIJA,L,h ; GENG,G.F; MA,J. **From Trash to Treasure: Direct Transformation of Onion Husks into Three-Dimensional Interconnected Porous Carbon Frameworks for High-Performance Supercapacitors in Organic Electrolyte** , 216 (2016), pp. Disponível em :<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.09.053> . Acesso em :24/10/24.

DUTRA, Danrley Kristyam Rosa. **Obtenção de carvão ativado a partir do resíduo de casca do eucalipto branco.** 2023. Monografia (Bacharelado em Química Industrial) – Universidade do Vale do Taquari - Univates, [Cidade], 2023. Acesso em : 28 fev. /2024

FENG ,Z ;CHEN,N; LIU,T; FENG,C. **KHCO₃ activated biochar supporting MgO for Pb(II) and Cd(II) adsorption from water: Experimental study and DFT calculation analysis** . Journal of Hazardous Materials Volume 426, 15 (2022) . Disponível em : <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128059> . Acesso em : 20/12/2024 .

GALLETI, Silvia Regina. Introdução à microscopia eletrônica. **Biológico, São Paulo**, v. 65, n. 1/2, p. 33-35, 2003.

HONORIO,F,J; VEIT,T,M; GONÇALVES,C,G; KLEN,R,M,F . **Adsorption of reactive blue BF-5G dye by soybean hulls:kinetics, equilibrium and influencing factors** . Water Sci Technol (2016) .Disponível em: DOI: [10.2166/wst.2015.589](https://doi.org/10.2166/wst.2015.589). Acesso em : 23/12/2024 .

INKSON, Beverley J. Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization. In: **Materials characterization using nondestructive evaluation (NDE) methods**. Woodhead publishing, 2016. p. 17-43. Disponível em : <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100040-3.00002-X> . Acesso em: 12/01/2024 .

JUCHEN, T,P;, Handria Hariane PIFFER,H,H;VEITA, T,M; GONÇALVES ,C,G ; PALÁCIOA,M,S; ZANATTE, C,J . **Biosorption of reactive blue BF-5G dye by malt bagasse: kinetic and equilibrium studies** . Journal of Environmental Chemical Engineering .(2018). Disponível em : <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.11.009> . Acesso em : 28/12/2024.

LAIQUAN, L.v ; HUANG,S , ZHOU,C; MA,W. **Biochar activated by potassium carbonate to load organic phase change material: Better performance and environmental friendliness** . Industrial Crops & Products 204 (2023) 117184 . Disponível em : <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117184>. Acesso em : 05/11/24.

LI,R; Li, Q.; Gu, S.; Canção, C. Peng. **Co-influence of the pore size of adsorbents and the structure of adsorbates on adsorption of dyes**. Volume 57, Issue 31, Pages 14686 - 146952 (2016). Disponível: [10.1080/19443994.2015.1065446](https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1065446) .Acesso em :21/11/24.

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

LOPES, C. W ;BERTELLA, F.;PERGHER, S. B. C.;FINGER, P. H.;DALLAGO, R. M. ;PENHA, F. G. **Síntese e caracterização de carvões ativados derivados do sabugo de milho**. Perspectiva, Erechim , (2013). Disponível em: [139_360.pdf \(uricer.edu.br\)](https://www.uricer.edu.br/139_360.pdf). Acesso em: 30 /11/ 2024.

LOPES, Greice K. P.; ZANELLA, Heloisa G.; SPESSATO, Lucas; RONIX, Amanda; VIERO, Patrícia; FONSECA, Jhessica M.; YOKOYAMA, Jéssica T. C.; CAZETTA, André L.; ALMEIDA, Vitor C. **Steam-activated carbon from malt bagasse: optimization of preparation conditions and adsorption studies of sunset yellow food dye**. *Arabian Journal of Chemistry*, v. 14, n. 3, p. 103001, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103001> . Acesso em: 14 mar. 2025.

YUAN, G,C ; QINYAN , Y; BAOYU,G; AIMIN, L . **Insight into activated carbon from different kinds of chemical activating agents: A review** . *Sci. Total Environ.*, 746 (2020), Artigo 141094 . Disponível em : doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141094 . Acesso em : 22/10/24.

YUEBIN ,X. C; YUANYUAN , W.a ;DONGIIE ,Y; ZHANG,Y.Z ; LIU,W , LI,Q; QIU,X . **K₂CO₃ activation enhancing the graphitization of porous lignin carbon derived from enzymatic hydrolysis lignin for high performance lithium-ion storage** . *Journal of Alloys*

and Compounds 785 (2019) 706e714. Disponível em : <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.039>. Acesso em : 30/10/24.

KOPRIVANAC, N. **Photocatalytic Oxidation of Azo Dyes and Oxalic Acid in Batch Reactors and CSTR: Introduction of Photon Absorption by Dyes to Kinetic Models.** (2018). Disponível em : doi: 10.15255/CABEQ.2016.974 . Acesso em : 12/11/2024.

KILIK M , , Esin Apaydın-Varol, Ays, e Eren Pütün . **Preparation and surface characterization of activated carbons from Euphorbia rigida by chemical activation with ZnCl₂, K₂CO₃, NaOH and H₃PO₄ .** Applied Surface Science (2012). Disponível em : <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.07.155> . Acesso em : 27/10/23.

KIRK, S. E.; SKEPPER, J. N.; DONALD, A. M. **Application of environmental scanning electron microscopy to determine biological surface structure.** Journal of microscopy, v. 233, n. 2, p. 205-224, 2009. Disponível em : <https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.2009.03111.x>. Acesso em : 11/02/24.

MARIN,,A,L,S ; **REMOÇÃO DOS CORANTES TÊXTEIS C.I. REACTIVE BLUE 203 E C.I. REACTIVE RED 195 MEDIANTE O USO DE BAGAÇO DE MAÇÃ COMO ADSORVENTE.** 2015. 153f. Tese (Mestrado) -Programa de PósGraduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2015. Disponível em : <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1498> . Acesso em : 17/12/24.

MARÍN, M, P; SILVA.L,A; DIAZ, N, E . **Understanding the phenomenon of X-rays diffraction by crystals and related concepts.** European Journal of Physics, (2020). Disponível em : DOI 10.1088/1361-6404/ab8e53 . Acesso em : 12/11/2024.

MAHMOODI, Niyaz Mohammad; SAFFARDASTGERDI, Mohammad, Hosein. **Zeolite nanoparticle as a superior adsorbent with high capacity : Synthesis , surface modification and pollutant adsorption ability from wastewater.** Microchemical Journal, (2019) . Disponível em: 10.1016/j.microc.2018.10.018 . Acesso em : 12/12/2024 .

MILDEMBERG, N. A. **OBTENÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE BAGAÇO DE MALTE E SUA APLICAÇÃO NA REMOÇÃO DE AZUL DE METILENO** . 2019. 124p. Tese (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná . Curitiba, 2019. Disponível em : <https://hdl.handle.net/1884/58998> . Acesso em : 20/11/2024.

MELO,H, N; FERREIRA,E,O,M; POTENCIANO ,F,FN; MARTINS,R,P; OSTROSKI,C,I. **Análise do tratamento químico em carvão ativado para remoção do corante azul 5g.**Revista Processos Químicos (2017) . Disponível em : DOI:[10.19142/rpq.v11i22.403](https://doi.org/10.19142/rpq.v11i22.403) . Acesso em : 20/12/2024 .

MONDAL. A, K, K.; Kretschmer, Y.F.; Zhao, H.; Oliveira, C.Y. Oliveira, B.; Sol, G.X. Wang. **Nitrogen-doped porous carbon nanosheets from environmentally friendly eucalyptus leaves as high-performance electrode materials for supercapacitors and lithium-ion .** batteries Eur. J., 23 (15) (2017). Disponível em : <https://doi.org/10.1002/chem.201605019>. Acesso em : 21/10/2024.

MOHAMED .B.A,b , Chang Soo Kim a,c , Naoko Ellis a , Xiaotao Bi . **Microwave-assisted catalytic pyrolysis of switchgrass for improving bio-oil and biochar properties** . Bioresource Technology (2016). Disponível em : [http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.\(2015\).10.096](http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.(2015).10.096). Acesso em : 28/10/2024.

NADOLNY, B.; HEINECK, R. G.; BAZANI, H. A. G.; HEMMER, J. V.; BIAVATTI, M. L.;

NADOLNY, B.; HEINECK, R. G.; BAZANI, H. A. G.; HEMMER, J. V.; BIAVATTI, M. L.; RADETSKI, C. M.; ALMERINDO, G. I. **Use of brewing industry waste to produce carbon-based adsorbents: Paracetamol adsorption study.** *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, [S. l.], v. 55, n. 8, p. 947–956, 2020. DOI: 10.1080/10934529.2020.1759320 . Acesso em: 14 mar. 2025.

NASCIMENTO, D, B. L. **Detection of organic or inorganic material in Martian meteorite Zagami by vibrational spectroscopy?**. *International Journal of Astrobiology* 19.6 (2020): 438-445. Disponível em : DOI:10.1017/S147355042000021 . Acesso em: 12/01/2024.

NOVAES, C. G.; Yamaki, R. T.; de Paula, V. F.; do Nascimento Júnior, B. B.; Barreto, J. A.; Valasques, G. S.; Bezerra, M. A. **Otimização de Métodos Analíticos Usando Metodologia de Superfícies De Resposta - Parte I: Variáveis de Processo.** *Revista Virtual Química*, v. 9, n. 3, p. 1284-1215, 2017 . Disponível em : DOI: 10.21577/1984-6835.20170070. Acesso em : 12/09/2024.

NETO .B.B. ; SCARMINIO . I. S.; BRUNS.R.E . **Como fazer experimentos pesquisas e desenvolvimentos na ciência e na indústria.** Ed. da Unicamp. (2010) .

ODA, T. Y. R.; REZENDE, A. A. P.; SOUSA, R. C. S.; SILVA, C. M.; PEREIRA, A. C. **Pulp mill sludge-derived carbon activated with an alternative source of chemicals and its application in wastewater treatment – An approach for byproducts valorization.** *Journal of Environmental Management* (2021). Disponível em : <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113477> . Acesso em : 27/11/2023.

PATIL, S. S., KULKARNI, S. K., DESHMUKH, M. A., GARADKAR, K; MAHULIKAR, P. P.. **Synthesis and Characterization of Nanocrystalline Hydroxyapatite Powder Prepared Using Sol-Gel Method for Biomedical Applications.** *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 10, ,2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.10.173> . Acesso em : 10/01/2024.

PAVIA, D. L.; LAMPMAN, G. M.; KRIZ, G. S.; VYVYAN, J. R. **Introdução à espectroscopia.** São Paulo: Cengage Learning, (2015), 692p.

PIMENTEL, C. H.; FERNANDEZ, L. D.; DIAS, D. G.; FREIRE, M. S.; ALVAREZ, J. G. **Separation of CO₂ using biochar and KOH and ZnCl₂ activated carbons derived from pine sawdust**. Volume 11, Edição 6, dezembro de (2023). Disponível em : <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111378> . Acesso em : 11/01/2024.

RAJA, A. S. M.; ARPUTHARAJ, A.; SAXENA, S.; PATIL, P. G. **Water requirement and sustainability of textile processing industries**. *Water in Textiles and Fashion*, p. 155–173, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102633-5.00009-9> . Acesso em: 22 dez. 2024.

REGALBUTO, J. R.; ROBLES, J. O. **The Engineering of Pt/Carbon Catalyst Preparation**. University of Illinois: Chicago, 2004.

RIBEIRO, C.; SCHEUFELE, B. F.; QUINONES, R. F. R.; MÓDENES, N. A.; SILVA, M. G. C.; VIEIRA, M. G. A.; BORBA, C. E. **Characterization of Oreochromis niloticus fish scales and assessment of their potential on the adsorption of reactive blue 5G dye**. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, v. 482, p. 693–701, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.05.057>. Acesso em: 22 dez. 2024.

RIBEIRO, J. P.; NUNES, M. I. **Recent trends and developments in Fenton processes for industrial wastewater treatment – A critical review**. *Environmental Research*, v. 197, p. 110957, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110957>. Acesso em: 20 dez. 2024.

ROCHA, D. N.; BARBOSA, G. E.; RENATO, S. N.; VAREJÃO, V. E.; SILVA, P. U.; ARAÚJO, E. V. M.; MARTINS, A. M. **Improving biofuel production by thermochemical conversion of defatted *Scenedesmus obliquus* biomass**. *Journal of Cleaner Production*, v. 275, p. 124090, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124090>. Acesso em: 26 nov. 2024.

SANTOS, L. A. L. dos; SILVA, L. F. da; SOUZA, F. L. de; BARROS, M. A. F. de; ALMEIDA, V. C. de. **Análise da viabilidade econômica da produção industrial de carvão vegetal por bagaço de malte**. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 28, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220220183>. Acesso em: 5 mar. 2025.

SARAVANAKUMAR, B. S. P.; RAMACHANDRAN, A.; RAIVIA, S. P. G. V.; GANESH, B. G. V.; RAMESH, K. R.; YUVAKKUMAR, R. **Electrochemical performances of monodispersed spherical CuFe₂O₄ nanoparticles for pseudocapacitive applications.** *Vacuum*, v. 168, p. 108798, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.108798>. Acesso em: 13 dez. 2024.

SEVILLA, M.; FERERO. **Beyond KOH activation for the synthesis of superactivated carbons from hydrochar.** *Carbon*, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.12.010>. Acesso em: 29 nov. 2023.

SILVA, K. S. C.; SANTOS, G. A.; LEITE, H. R.; AROUCHA, E. M.; SANTOS, G. F. K. **Adsorção de corante azul reativo BF-5G utilizando casca de *Manihot esculenta* Crantz.** *Matéria (Rio de Janeiro)*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620220001.1346>. Acesso em: 22 dez. 2024.

SINGH, G.; AJANYA, J.; RUBAN, M.; XUN, G.; V. A. **Recognizing the potential of K-salts, apart from KOH, for generating porous carbons using chemical activation.** *Chemical Engineering Journal*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139045>. Acesso em: 31 out. 2024.

SINGH, K.; LAKHI, A.; SANCHITA, S.; SHESHANATH, V.; YONG, I. **Biomass derived porous carbon for CO₂ capture.** *Carbon*, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.03.050>. Acesso em: 15 nov. 2024.

SINCH, G. J.; LEE, R.; ROHAN, B.; AJAY, K.; JIABAO, Y.; AJAYAN, V. **Highly graphitized porous biocarbon nanosheets with tunable micro-meso interfaces and enhanced layer spacing for CO₂ capture and LIBs.** *Chemical Engineering Journal*, v. 433, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.134464>. Acesso em: 18 out. 2024.

TEXPAL. Lavanderia. Disponível em: <https://www.texpal.com.br>. Acesso em: 28 dez. 2024.

ULLAH, F.; GUOZHAO, J.; MUHAMMAD, I.; YUAN, G.; FARIARISHATA, S.; YE, S.; QURAT UL AIN; AIMIMI, L. **Adsorption performance and mechanism of cationic and anionic dyes by KOH activated biochar derived from medical waste pyrolysis.**

Environmental Pollution, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120271>. Acesso em: 19 nov. 2023.

VENTURINI FILHO, W. G. (Coord.). **Bebidas alcoólicas: ciência e tecnologia**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2016.

VIANA, M. M. **Obtenção e utilização de produtos de pirólise do lodo de esgoto para adsorção de poluentes em meio aquoso**. 2013. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-18082014-115608/>. Acesso em: 29 dez. 2024.

WANG, J.; GUO, X. **Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods**. *Journal of Hazardous Materials*, v. 390, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122156>. Acesso em: 25 nov. 2024.

WANG, K.; PENG, N.; SUN, J.; LU, G.; CHEN, M.; DENG, F.; DOU, R.; NIE, L.; ZHONG, Y. **Synthesis of silica-composited biochars from alkali-fused fly ash and agricultural wastes for enhanced adsorption of methylene blue**. *Reaction Engineering*, v. 139055, p. 1-10, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100857>.

YANG, L.; JIÃO, M.; FUXUAN, B.; SHOUVI, M.; GUANGSHAN, Z.; YIFAN, W. A.; YUE, Z.; ZHAO, J.; YING, Z. **Pinecone-derived magnetic porous hydrochar co-activated by KHCO_3 and K_2FeO_4 for Cr(VI) and anthracene removal from water**. *Environmental Pollution*, v. 306, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119457>. Acesso em: 31 out. 2024.

ZHANG, X. H.; LI, K.; ZHANG, Q. B.; QIN, Q.; CAO, L. E.; JIN, E. **Strategy for preparing porous graphitic carbon for supercapacitor: Balance on porous structure and graphitization degree**. *Journal of the Electrochemical Society*, v. 165, n. 10, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1149/2.0491910jes> . Acesso em: 16 out. 2024.

ZHOU, Y.; LIU, X.; XIANG, Y.; WANG, X. B.; ZHANG, F.; WEI, C.; LUO, L.; MING, L.; TANG, B. **Modification of biochar derived from sawdust and its application in removal of tetracycline and copper from aqueous solution: Adsorption mechanism and modelling**. *Bioresource Technology*, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.178>. Acesso em: 30 out. 2024.