

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO  
GRANDE DO SUL – IFRS CAMPUS FELIZ

MARIA EDUARDA ESCHER MALETZ

**AVALIAÇÃO DA CINZA DE CASCA DE ARROZ NA REMOÇÃO DE CORANTE  
VIOLETA CRISTAL EM MEIO AQUOSO EMPREGANDO A TÉCNICA DE  
ADSORÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
curso de bacharelado em Engenharia Química  
do Instituto Federal do Rio Grande do Sul, IFRS.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Nicéia Chies Da Fré

FELIZ  
2024

MARIA EDUARDA ESCHER MALETZ

**AVALIAÇÃO DA CINZA DE CASCA DE ARROZ NA REMOÇÃO DE CORANTE  
VIOLETA CRISTAL EM MEIO AQUOSO EMPREGANDO A TÉCNICA DE  
ADSORÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Química.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof.<sup>a</sup> Ma. Cecilia Brasil Biguelini

---

Prof. Dr. Matheus Felipe Pedrotti

**ORIENTADOR**

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Nicéia Chies Da Fré

Feliz, 26 de novembro de 2024.

Dedico esse trabalho aos meus pais, que não mediram esforços para eu chegar onde estou. Sem vocês nada faria sentido.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Vilson e Dirce, que me apoiaram, ouviram e incentivaram durante esta caminhada. Agradeço por todo amor, ajuda e por estarem presentes, apesar da distância física.

Aos tios, primos e padrinhos que me acolheram neste novo momento, pelo carinho e cuidado que tiveram comigo.

As amizades mantidas e novas que construí, pelos bons momentos, companheirismo, suporte e por tornarem esta etapa mais alegre. Agradeço a Sabrina, minha dupla durante estes cinco anos de aprendizado, por tudo que compartilhamos e ajuda mútua.

Agradeço ao IFRS – Campus Feliz, aos professores pelos ensinamentos compartilhados, em especial a professora Nicéia Chies Da Fré, pela orientação, dedicação e por ter conduzido a realização do trabalho da forma que foi.

E a Gabriela Schwantes Pagliarin, pelo auxílio na realização dos testes e por todo conhecimento trocado.

A todos os demais que de certa forma contribuíram para a minha chegada até aqui.

Meu mais sincero, muito obrigada.

## RESUMO

A utilização de resíduos agroindustriais como possíveis biossorventes surge da necessidade de encontrar materiais de baixo custo e abundantes, que possam substituir adsorventes convencionais com alto valor agregado, como o carvão ativado, e ainda gerar o reaproveitamento de um possível resíduo. O tratamento de efluentes contendo corantes já foi estudado utilizando, entre outros, palha de trigo, casca de arroz e folhas de oliveira, apresentando resultados interessantes. O Brasil é um forte produtor agrícola, sendo o Rio Grande do Sul o responsável pela maior produtividade de arroz em território nacional, o que resulta em uma grande quantidade de resíduos gerados. Desta forma, o presente trabalho tem por objetivo a avaliação da cinza residual da queima de casca de arroz, em forno de grelha para geração de energia, como possível material adsorvente na remoção de corante violeta cristal em meio aquoso. Este estudo buscou as condições otimizadas de tempo de contato e temperatura, onde foi utilizado a metodologia de planejamento composto central rotacional e também, a isoterma que melhor representa o processo, para o qual os dados foram ajustados aos modelos linear, de Langmuir e de Freundlich, em duas condições, filtração imediata e decantação por 48 h. A partir dos ensaios, obteve-se as superfícies de resposta, que resultaram nas condições 20 °C e 15 min como as mais favoráveis para a reação. O equilíbrio de adsorção foi melhor representado pelo modelo de isoterma de Freundlich, onde foi obtido coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9130 e 0,9314 para a solução filtrada e decantada, respectivamente. Em teste final, realizado nas condições otimizadas encontradas e mantido sob decantação por 168 h, atingiu-se percentual de remoção de 85,23%, utilizando 1,8 e 2,0 g de adsorvente, indicando que a dosagem de CCA não influencia na remoção do corante. Assim, conclui-se que a cinza de casca de arroz possui potencial efetivo de aplicação como biossorvente de baixo custo para remoção de corante violeta cristal, não sendo necessário tratamento prévio de ativação para atingir percentuais atraentes de remoção, além de possibilitar a agregação de valor a um resíduo, utilizando-o como nova matéria-prima.

**Palavras-chave:** Adsorção. Cinza de casca de arroz. Violeta cristal. Biossorvente.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Formula estrutural do corante VC. ....	15
Figura 2 – Classificação das isotermas de adsorção. ....	21
Figura 3 – Peneiras utilizadas para análise granulométrica. ....	26
Figura 4 – Corantes avaliados.....	27
Figura 5 – Agitador shaker Lucadema. ....	28
Figura 6 – Espectrofotômetro Nova Instrumentos. ....	29
Figura 7 – Diluições do corante violeta cristal. ....	30
Figura 8 – Amostras filtradas após ensaios de adsorção. ....	31
Figura 9 – Amostras decantadas após 48 horas. ....	32
Figura 10 – Cinzas de casca de arroz. ....	33
Figura 11 – Análise granulométrica da cinza de casca de arroz. ....	34
Figura 12 - Análise granulométrica cumulativa de grossos retidos. ....	34
Figura 13 – Solução de verde de malaquita (A) antes e (B) após processo de adsorção. ....	37
Figura 14 – Curva de turbidez para a CCA. ....	37
Figura 15 – Espectro de absorção molecular do violeta cristal. ....	38
Figura 16 – Comparação espectro de absorção molecular. ....	39
Figura 17 – Curva e calibração do VC. ....	40
Figura 18 – Superfície de resposta para a absorbância. ....	41
Figura 19 – Superfície de resposta para o percentual de remoção. ....	42
Figura 20 – Isoterma linear para a solução filtrada. ....	45
Figura 21 – Isoterma de Langmuir para a solução filtrada. ....	45
Figura 22 – Isoterma de Freundlich para a solução filtrada. ....	46
Figura 23 – Isoterma linear para a solução decantada. ....	47
Figura 24 – Isoterma de Langmuir para a solução decantada. ....	47
Figura 25 – Isoterma de Freundlich para a solução decantada.....	48
Figura 26 – Percentuais de remoção com o tempo. ....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Percentuais de remoção de VC para biossorventes vistos na literatura..	20
Tabela 2 - Variáveis testadas para o planejamento experimental.....	30
Tabela 3 - FRX para a cinza de casca de arroz. ....	35
Tabela 4 - Percentual de remoção de corantes após ensaios de adsorção.....	36
Tabela 5 - P-valor para ANOVA com variável resposta absorbância.....	41
Tabela 6 - P-valor para ANOVA com variável resposta % remoção. ....	43
Tabela 7 - Parâmetros de adsorção de Langmuir. ....	46
Tabela 8 - Parâmetros de adsorção de Freundlich. ....	46

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Relação entre o valor de $R_L$ e a classificação da isoterma. ....	23
Quadro 2 - Relação entre o valor de $n$ e a classificação da isoterma. ....	24

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCA	Cinza de casca de arroz
FRX	Fluorescência de raios X
IFRS	Instituto Federal do Rio Grande do Sul
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UV-VIS	Ultravioleta visível
VC	Violeta cristal
VM	Verde de malaquita
VR	Vermelho reativo

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1 OBJETIVOS .....	13
1.1.1 Objetivo geral.....	13
1.1.2 Objetivos específicos.....	13
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
2.1 CORANTES E GERAÇÃO DE RESÍDUOS.....	14
2.1.1 Corante violeta cristal .....	15
2.2 ADSORÇÃO .....	16
2.2.1 Efeito do pH .....	16
2.2.2 Efeito da temperatura.....	17
2.2.3 Efeito do tempo de contato .....	17
2.3 MATERIAIS ADSORVENTES .....	18
2.3.1 Resíduos agroindustriais e materiais biossorventes.....	18
2.3.2 Cinza de casca de arroz.....	20
2.4 ISOTERMAS DE ADSORÇÃO .....	21
2.4.1 Modelo de isoterma de Langmuir.....	22
2.4.2 Modelo de isoterma de Freundlich.....	24
2.5 ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO MOLECULAR UV-VIS .....	25
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>26</b>
3.1 TESTES PRELIMINARES .....	26
3.1.1 Composição granulométrica do adsorvente.....	26
3.1.2 Espectrometria de fluorescência de raios X .....	26
3.1.3 Avaliação de corantes.....	27
3.1.4 Turbidez.....	28
3.1.5 Espectro de absorção molecular .....	29
3.1.6 Curva de calibração do vc .....	29
3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	30
3.3 ISOTERMAS DE ADSORÇÃO .....	31
3.4 REMOÇÃO DE CORANTE EM CONDIÇÕES OTIMIZADAS.....	32
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>33</b>
4.1 COMPOSIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA.....	33
4.1.1 Composição granulométrica do adsorvente.....	33

<b>4.1.2 Espectrometria de fluorescência de raios x.....</b>	<b>35</b>
4.2 AVALIAÇÃO DE CORANTES .....	36
4.3 TURBIDEZ.....	37
4.4 ESPECTRO DE ABSORÇÃO MOLECULAR .....	38
4.5 CURVA DE CALIBRAÇÃO DO VIOLETA CRISTAL.....	39
4.6 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	40
4.7 ISOTERMAS DE ADSORÇÃO .....	44
4.8 REMOÇÃO DE CORANTE EM CONDIÇÕES OTIMIZADAS.....	49
<b>5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>51</b>
<b>6 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os corantes são substâncias solúveis empregadas com a finalidade de conferir cor a materiais ou meios. Possuem ampla aplicação na indústria, principalmente na área têxtil, onde são utilizados na tinturaria dos tecidos. No entanto, parte destas substâncias não se fixam completamente as fibras, resultando em efluentes contendo altas parcelas destes materiais (Cheruiyot *et al.* 2019; Dávila, Nunes, Féris, 2019).

O violeta cristal é um corante classificado como catiônico, ou seja, as substâncias pertencentes a esta classe apresentam grupos com cargas positivas em sua estrutura. Este possui notória aplicação na microbiologia, sendo essencial para a determinação de bactérias através da técnica de coloração de Gram. Contudo, devido a sua característica de coloração intensa, se for descartado de maneira incorreta, pode ocasionar graves problemas a corpos hídricos como, a impossibilidade de realização da fotossíntese (Tripathi, Sapra, 2020; Fabryanty *et al.* 2017).

Diversas técnicas podem ser aplicadas para a remoção de poluentes, como os corantes, de efluentes aquosos, porém, a adsorção destaca-se como um método eficiente e que possui maior predominância no âmbito da pesquisa nos últimos anos. Este fenômeno consiste em um processo de separação, onde as partículas contaminantes são removidas através da retenção destas sobre a superfície de um material sólido, denominado adsorvente (Marques, Da Conceição, 2022; Nascimento *et al.* 2020).

Para um adsorvente ser considerado efetivo, é necessário que ele apresente elevada área superficial, em razão de apresentar mais possibilidades de pontos para que a reação ocorra. Entre os materiais já consolidados no mercado, os carvões ativados são os mais utilizados, no entanto, apresentam valor elevado e tendem a encarecer a técnica. Desta forma, cresce a busca por materiais alternativos e, preferencialmente, de baixo custo, com bom potencial de desempenho de adsorção (Nascimento *et al.* 2020; Crini *et al.* 2019).

Entre os materiais estudados, os resíduos agroindustriais, provenientes da agricultura e do processamento de produtos agrícolas, surgem como uma boa opção de biossorventes. Estes substratos, além de acessíveis, estão presentes em abundância, tendo em vista a diversidade de culturas agrícolas presentes ao longo do território nacional (Mo *et al.* 2018). Assim, já foi relatada a utilização de palha de trigo

(Laidani *et al.* 2019), cinzas residuais de caule de feijão e girassol (Ghosh, Reddy, 2014) e casca de arroz (Quansah *et al.* 2020), em substituição aos adsorventes tradicionais.

Diante disso, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a utilização de cinzas residuais da queima da casca de arroz, como possível biossorvente, para a remoção de corante violeta cristal de soluções aquosas. Da mesma forma, identificar as melhores condições operacionais de temperatura e tempo de contato, definir o modelo matemático de isoterma que melhor represente o processo, além de buscar o percentual máximo de remoção nas condições otimizadas de processo.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Realizar um estudo referente a utilização de resíduo agroindustrial, cinza de casca de arroz, como possível material adsorvente para o tratamento de efluente aquoso contendo corante violeta cristal.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a viabilidade da cinza de casca de arroz para a adsorção de corante violeta cristal;
- Analisar o efeito da temperatura e do tempo de contato na eficiência de adsorção;
- Determinar qual modelo de isoterma melhor representa o procedimento experimental;
- Obter o percentual de remoção máximo de corante em condições otimizadas de operação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CORANTES E GERAÇÃO DE RESÍDUOS

Corantes são substâncias solúveis, naturais ou sintéticas, que ao serem aplicadas sobre um material ou meio possuem a finalidade de adicionar cor. Desta forma são amplamente utilizados na indústria em geral, como para a fabricação de tintas ou modificando o aspecto visual de tecidos, cosméticos, alimentos e produtos (Cheruiyot *et al.* 2019).

Por conta de sua ampla aplicabilidade, os corantes surgem como uma classe propensa a contaminação ambiental. Dentre os efluentes contendo estas substâncias, os gerados por indústrias têxteis apresentam grande preocupação, principalmente devido ao alto volume produzido (Marques, Da Conceição, 2022).

Os corantes sintéticos são a principal categoria utilizada para o tingimento de tecidos. Estes são compostos orgânicos e insaturados, que devido a sua estrutura química possuem difícil degradação e, conseqüentemente, permanecem no ambiente por longo período de tempo. Dos corantes aplicados nas fibras, em torno de 50 a 70% fixam-se completamente a elas, enquanto o restante é perdido durante as etapas de lavagem, sendo necessário retirá-los das águas residuais antes destas retornarem ao meio ambiente (De Almeida, Dilarri, Corso, 2016; Dávila, Nunes, Féris, 2019).

Algumas destas substâncias possuem alta pigmentação, resultando em águas residuais com intensa coloração. Esta característica influencia diretamente na qualidade da água, que se não for tratada corretamente pode causar efeitos prejudiciais para a fauna e a flora aquática, tendo em vista que a presença de cor impede a realização da fotossíntese, diminuindo o oxigênio presente no meio. Além disso, a presença de corantes pode aumentar alguns parâmetros, como o teor de compostos fenólicos, devido a estrutura química da maior parte destas moléculas, levando o efluente a apresentar valores superiores aos padrões de lançamento (De Almeida, Dilarri, Corso, 2016; Pizato *et al.* 2017).

Marques e Da Conceição (2022) mostram que nos últimos anos, devido ao interesse na preservação ambiental, diversas técnicas de tratamento de efluentes vem sendo estudadas e testadas. Estas técnicas possuem diferentes mecanismos de funcionamento, sendo citados os métodos físicos, como a filtração; químicos, como a coagulação e os processos oxidativos avançados; biológicos, onde a biodegradação

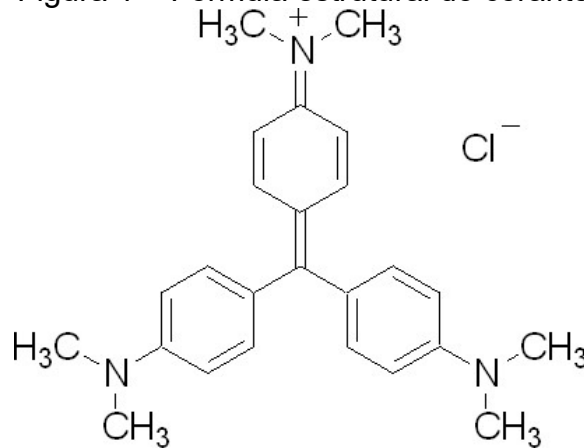
é muito utilizada; e físico-químicos, destacando-se a adsorção como alternativa de tratamento mais recorrente.

### 2.1.1 Corante violeta cristal

Dentre os corantes há diversas classificações que podem ser adotadas, de acordo com sua estrutura química, aplicação e sua forma de fixação. São chamados de catiônicos os que em meio aquoso dissociam-se em íons positivos. Estes são caracterizados por apresentarem cores brilhantes, ampla variedade, resistência a luz e boa relação custo-benefício (Zanoni, Yamanaka, 2016).

O violeta cristal (VC), conforme mostrado na Figura 1, é um corante catiônico orgânico pertencente ao grupo dos trifenilmetano, além de ser amplamente utilizado para o tingimento de tecidos e couros, possui notória aplicação no campo da microbiologia, sendo empregado na técnica de coloração de Gram para identificação de células Gram-positivas (Tripathi, Sapra, 2020; Sun, Ou, Chen, 2022).

Figura 1 – Fórmula estrutural do corante VC.



Fonte: Neon, 2024.

Quando dissolvido em água o VC apresenta coloração roxa vibrante, possuindo alta capacidade de conferir cor mesmo em quantidades significativamente baixas. Sua presença é perceptível visualmente e pode ocasionar riscos ao corpo hídrico que for exposto, devido ao fato de impedir a penetração de luz solar, dificultando o processo de fotossíntese das plantas aquáticas (Fabryanty *et al.* 2017).

## 2.2 ADSORÇÃO

A adsorção é uma operação unitária onde ocorre o mecanismo de sorção, que consiste na interação entre uma substância presente no meio (adsorvato) e um material sólido (adsorvente). É um fenômeno de superfície onde há a transferência de massa entre uma fase fluída e a área superficial de um material utilizado como adsorvente (Nascimento *et al.* 2020; Bolgar *et al.* 2018).

O mecanismo de adsorção pode ser classificado como físico ou químico, variando de acordo com a intensidade da força de interação (Atkins, 2017).

Na adsorção física, também denominada fisissorção, a ligação advém de interações moleculares do tipo forças de Van der Waals, as quais são mais fracas. No entanto, possibilitando que o fenômeno ocorra sobre toda a superfície do material adsorvente. Neste mecanismo, por conta de as moléculas serem fracamente adsorvidas, há a possibilidade de ocorrer mais facilmente a dessorção, sendo assim caracterizada como um fenômeno reversível. Ainda, apresenta baixas entalpias e aumentos de temperatura desfavorecem o processo (Atkins, 2017; Matos, 2015).

Já na adsorção química ou quimissorção, o adsorvato fica retido por meio de ligações químicas mais fortes, normalmente do tipo covalentes, sendo um método altamente específico, em razão do fenômeno ser observado em apenas alguns pontos do material, denominados sítios ativos (Nascimento *et al.* 2020; Matos, 2015). É um processo caracterizado por altas entalpias de reação e pode ocasionar reações químicas irreversíveis (Atkins, 2017).

O processo de adsorção é utilizado com o objetivo de separar misturas, principalmente quando uma das espécies se encontra em concentrações muito baixas, não sendo eficiente o emprego de métodos como destilação, extração e cristalização (Matos, 2015). Fatores como a natureza do adsorvente, do adsorvato e as condições operacionais influenciam diretamente no desempenho da operação, podendo aumentá-la quando alterados corretamente (Nascimento *et al.* 2020).

### 2.2.1 Efeito do pH

O pH e o ponto de carga zero (PZC), são conceitos relacionados e que possuem grande importância para o processo de adsorção. O PZC é determinado com o intuito de adquirir informações sobre a faixa de pH onde o adsorvente apresenta

carga superficial nula. A partir desta determinação, é possível realizar o ajuste de pH do meio, de forma a favorecer o processo desejado (Nascimento *et al.* 2020).

Meios com valores de pH acima do PZC, tendem a favorecer a adsorção de íons positivos (cátions), pois a superfície do adsorvente adquire carga negativa ao perder prótons para a solução com característica alcalina. Já para valores de pH inferiores ao pH do ponto de carga zero, o processo ocorre de forma inversa, a superfície do material torna-se positiva devido a associação dos sítios ativos com os prótons dissolvidos em solução ácida, favorecendo a adsorção de ânions (íons negativos) (Nascimento *et al.* 2020).

O ponto de carga zero do adsorvente pode ser alterado realizando modificações químicas no material utilizado, como ativações com ácidos, que tendem a baixar o PZC (Nascimento *et al.* 2020).

### **2.2.2 Efeito da temperatura**

A temperatura é um parâmetro que afeta diretamente o processo de adsorção. Valores elevados de temperatura podem ocasionar um aumento na energia cinética e na mobilidade das espécies presentes no meio (Nascimento *et al.* 2020). Também, tende a diminuir a viscosidade da solução, elevando a velocidade de difusão das moléculas (Silva, 2005).

A adsorção consiste em uma reação de equilíbrio exotérmica, onde para que seja efetiva, é necessário que a taxa de sorção seja superior à de dessorção. Desta forma, altas temperaturas tendem a deslocar o sentido da reação para o favorecimento do fenômeno de dessorção. Isso ocorre pois, elevações na temperatura favorecem processos endotérmicos, que absorvem calor (Banerjee *et al.* 2016; Silva, 2005)

Assim, apesar da elevação na temperatura aumentar a velocidade do processo, resultando em um alcance do estágio de equilíbrio de forma mais rápida, ela também tende a diminuir a capacidade de adsorção, pois influencia no aumento da taxa de dessorção (Silva, 2005).

### **2.2.3 Efeito do tempo de contato**

O tempo de contato é um parâmetro relacionado com o comportamento cinético do fenômeno de adsorção. Em geral, o processo ocorre de forma rápida nos

primeiros períodos, até alcançar o equilíbrio, quando o crescimento do percentual de remoção torna-se menos expressivo (Nascimento *et al.* 2020).

No entanto, a permanência sob agitação, após atingir o estágio de equilíbrio, pode favorecer o fenômeno de dessorção. Isso ocorre pois a movimentação aumenta a colisão entre as moléculas de corante presentes no meio e o material adsorvente. Porém, em razão da superfície do material estar saturada e a solução estar com quantidades inferiores da substância que se deseja remover, o adsorvato tende a liberar-se do adsorvente e ser dessorvido para o meio (Saha *et al.* 2021; Banerjee *et al.* 2016).

## 2.3 MATERIAIS ADSORVENTES

O mercado tradicional de adsorventes é composto, em geral, por materiais sólidos. Estes, para serem considerados efetivos, devem apresentar uma elevada relação entre sua área superficial e o volume que ocupam. Desta forma, substâncias porosas possuem vantagem para esta aplicação, levando em consideração que quanto maior a área de superfície, há um maior número de sítios ativos para que a reação ocorra (Nascimento *et al.* 2020).

Dentre os materiais adsorventes, os carvões ativados destacam-se como os mais consolidados no mercado e amplamente utilizados (Bhatnagar, Minocha, 2006). Além deles, as zeólitas, sílicas mesoporosas e aluminas são empregadas para o tratamento de água e efluentes, apresentando boas características e alto desempenho. No entanto, são matérias-primas com alto valor agregado, podendo encarecer o processo e limitar sua aplicação (Crini *et al.* 2019).

Nos últimos anos, diversos estudos vêm sendo realizados visando a utilização de distintos materiais como adsorventes, entre eles poli álcool vinílico (PVA) (Mok *et al.* 2020), cerâmicas preparadas a partir de ganga de carvão (Zhou *et al.* 2020), argilas (Kausar *et al.* 2018), resíduos industriais, como lodo (Oke, Mohan, 2022) e resíduos agrícolas (Kadhom *et al.* 2020).

### 2.3.1 Resíduos agroindustriais e materiais bioadsorventes

Resíduos agroindustriais podem ser classificados como materiais oriundos do processamento de matéria-prima orgânica, como alimentos, fibras, couro e madeira. Estes encontram-se em estado sólido e são provenientes de atividades como

descascamento de cereais, recorte do couro e serragem da madeira, resultando em rejeitos que não tem aproveitamento direto na indústria (Alencar *et al.* 2020).

De acordo com o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (Cepea), da Esalq/USP, em parceria com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), o Brasil conta com um amplo setor agrícola, sendo responsável pela produção de importantes culturas como milho, café, algodão, soja e trigo. Além disso, destacam-se os setores de bovinos, aves e leite, resultando em uma importante participação da agroindústria para o Produto Interno Bruto (PIB) nacional. Segundo a BASF, o cultivo de arroz no Brasil está presente em maior proporção na região sul do país, onde o Rio Grande do Sul destaca-se, produzindo cerca de 8 milhões de toneladas ao ano, o que significa em torno de 80% da produção nacional.

Desta forma, é crescente a preocupação com a geração de resíduos provenientes da agricultura e a busca por formas de reutilização destes materiais, tratando-os como possíveis novas matérias-primas (Vaz Junior, 2020). Estudos apontam a utilização destas matérias em distintos campos de atuação como na construção civil (Hu, He, Zhang, 2020; Hwang, Huynh, 2015), para obtenção de materiais com maior valor agregado como sílica (Fernandes *et al.* 2017) e catalisadores (Ngaini *et al.* 2022) ou também para a produção de energia elétrica e alimentação de caldeiras (Ministério de Minas e Energia, 2023).

Outro ramo que resulta em uma opção viável de reaproveitamento dos resíduos gerados e que vem sendo objetivo de um grande número de pesquisas é o de biossorventes, que consistem em adsorventes provenientes de materiais biológicos (Mo *et al.* 2018). Esta aplicação apresenta diversas vantagens, como alta disponibilidade de matéria-prima, em virtude do Brasil ser um forte produtor agrícola. Também há uma variedade de fontes que podem ser utilizadas para a obtenção destes materiais, já havendo estudos aplicando casca de arroz (Quansah *et al.* 2020; Saha *et al.* 2021), de aveia (Banerjee *et al.* 2016), palha de trigo (Laidani *et al.* 2019) entre outros.

Na Tabela 1, são apresentados estudos onde emprega-se biossorventes para a remoção de corante violeta cristal. Nela são avaliados os percentuais máximos de adsorção, calculados através da Equação 1, de cada material.

$$\%_{remoção} = \frac{(C_0 - C_t) * 100}{C_0} \quad (1)$$

Onde:

$C_0$  = concentração inicial de soluto ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

$C_t$  = concentração no tempo  $t$  ( $\text{mg.L}^{-1}$ ).

Tabela 1 – Percentuais de remoção de VC para bioadsorventes vistos na literatura.

Adsorvente	Percentual máximo de remoção	Referência
Cascas de café	94%	Cheruiyot <i>et al.</i> 2019.
Casca de coco	82%	Sultana <i>et al.</i> 2022.
Casca de amêndoa	83%	Loulidi <i>et al.</i> 2020.
Casca de abacaxi	97%	Kristanti; Yuniarto; Hadibarata, 2022.
Folhas de oliveira	99,2%	Elsherif <i>et al.</i> 2021.

Fonte: Autora, 2024.

### 2.3.2 Cinza de casca de arroz

A casca de arroz é um resíduo proveniente do beneficiamento do arroz, que apresenta alto poder calorífico e é utilizado há muito tempo para a queima e, conseqüente, geração de energia. No entanto, esta prática leva a formação de um subproduto, a cinza de casca de arroz (CCA), que constantemente acaba por não ter sua usabilidade explorada e é descartada de maneira precoce (Tashima *et al.* 2012; Hongo *et al.* 2021).

Este resíduo agroindustrial possui em sua composição alto teor de sílica, na forma de óxido de silício, além de outras substâncias como óxidos de alumínio, ferro, manganês, magnésio, cálcio, potássio e fósforo, que tem suas quantidades variadas de acordo com o solo, condições climáticas e fertilizantes que a planta foi exposta (Schmitz, 2019).

Devido a sua composição, a CCA possui um campo vasto de possíveis aplicações, entre estas destacam-se a síntese de zeólitas (Schmitz, 2019), a utilização como material pozolânico para construção civil, como matéria-prima para a extração de sílica e para o tratamento de efluentes, através do emprego como bioadsorvente (Liu *et al.* 2016). Também, pode ser reincorporada na agricultura como aditivo para correção de acidez do solo, por apresentar pH próximo da neutralidade (Kath, 2013).

A cinza de casca de arroz possui características importantes para a utilização como material adsorvente, como elevada área superficial e porosidade, devido aos

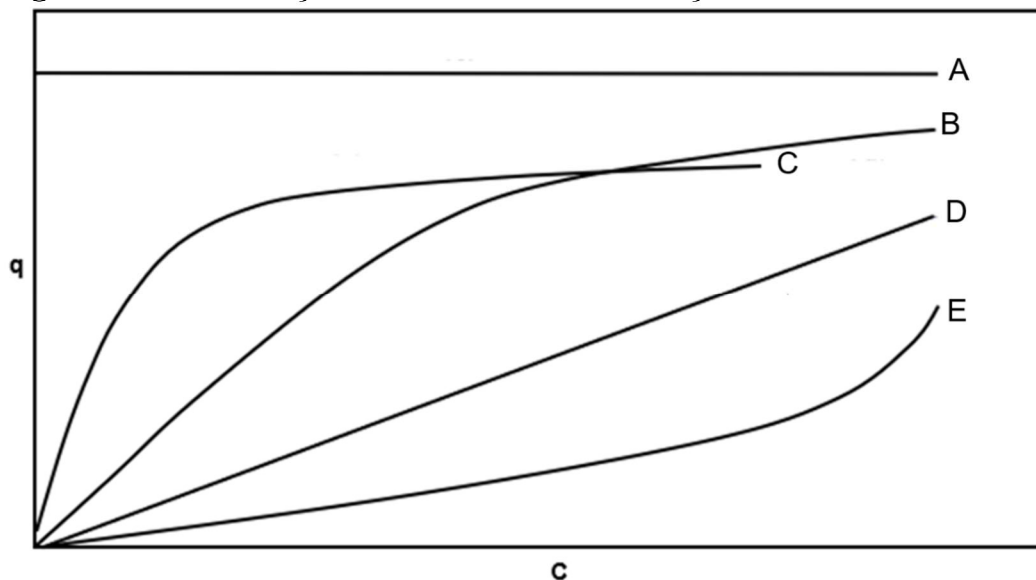
elementos que a compõem. Além de ser uma alternativa economicamente viável em relação aos adsorventes tradicionais, como o carvão ativado (Liu *et al.* 2016).

## 2.4 ISOTERMAS DE ADSORÇÃO

A adsorção é uma reação de equilíbrio, ou seja, quando este ponto é alcançado, parte do adsorvato está remanescente no meio líquido e outra parcela ficou retida ao sólido. Esta relação é descrita através das isotermas de adsorção (Atkins, 2017).

As isotermas de adsorção são modelos matemáticos que representam a reação até esta atingir o estado estacionário, em uma temperatura conhecida. Através destes equacionamentos, também é possível obter-se graficamente a relação de equilíbrio entre a concentração de soluto no meio (C) e a quantidade de soluto adsorvido por grama de adsorvente (q). Por meio da avaliação destas curvas, pode-se classificar a adsorção como linear, não favorável, favorável, muito favorável e irreversível, como é ilustrado na Figura 2 (Nascimento *et al.* 2020).

Figura 2 – Classificação das isotermas de adsorção.



Legenda: "A" irreversível; "B" favorável; "C" muito favorável; "D" linear; "E" não favorável.  
Fonte: Adaptado de Moreira, 2008.

Na isoterma linear, a relação é crescente e proporcional, ou seja, a quantidade adsorvida aumenta com a concentração no fluido. As curvas que apresentam concavidade voltada para baixo são denominadas favoráveis, e nestas o processo ocorre de forma rápida e uma alta parcela de adsorvato é retida no adsorvente. De

forma análoga, quando uma baixa quantidade de analito é capaz de ser adsorvida, a reação possui característica de não favorável ou desfavorável. Há também o extremo da isoterma muito favorável, quando a quantidade removida independe da remanescente no meio, ocorrendo nestes casos a adsorção irreversível (McCabe, Smith, Harriott, 1993).

Diversos modelos de isothermas vem sendo desenvolvidos e estudados. No entanto, o de Langmuir e o de Freundlich ainda são os mais usuais no meio acadêmico e nos processos de tratamento de águas e efluentes (Nascimento *et al.* 2020).

#### 2.4.1 Modelo de isoterma de Langmuir

Formulado em 1918, o modelo de isoterma de Langmuir é um dos pioneiros e ainda mais utilizados, este baseia-se no princípio de quimissorção, fornece uma expressão simples e é caracterizado como um processo muito favorável (Nascimento *et al.* 2020).

Este modelo de isoterma é baseado nas hipóteses de que a adsorção ocorra em monocamada, as espécies adsorvidas interajam apenas com os sítios ativos, a superfície apresente um número fixo de pontos de adsorção e que eles sejam equivalentes, ou seja, possuam mesma energia independente da presença ou não de moléculas adsorvidas (Bolgar *et al.* 2018).

Na Equação 2, é representado o modelo de isoterma de Langmuir:

$$q_e = \frac{q_{m\acute{a}x} \cdot K_L \cdot C_e}{1 + q_{m\acute{a}x} \cdot C_e} \quad (2)$$

Onde:

$q_e$  = quantidade de soluto adsorvido por grama de adsorvente no equilíbrio ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ );

$q_{m\acute{a}x}$  = capacidade máxima de adsorção ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ );

$K_L$  = constante de Langmuir ( $\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$ );

$C_e$  = concentração de soluto do equilíbrio ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ).

É possível realizar a determinação da quantidade de soluto adsorvido no equilíbrio ( $q_e$ ), através da Equação 3:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{m} \quad (3)$$

Na qual:

$C_0$  = concentração inicial de soluto ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

$V$  = volume de soluto (L);

$m$  = massa de adsorvente (g).

Os parâmetros de adsorção  $q_{m\acute{a}x}$  e  $K_L$ , podem ser determinados através da linearização da Equação 2, assim, obtêm-se a Equação 4:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{m\acute{a}x} \cdot K_L} + \frac{1}{q_{m\acute{a}x}} C_e \quad (4)$$

Através da obtenção dos parâmetros de adsorção, é possível calcular o fator de separação ( $R_L$ ), o qual indica se o processo é desfavorável, linear, favorável ou irreversível. A Equação 5 explicita a forma de determinar este valor e o Quadro 1 demonstra as relações entre o número obtido e a característica da reação (Nascimento *et al.* 2020).

$$R_L = \frac{1}{1 + q_{m\acute{a}x} \cdot K_L} \quad (5)$$

Quadro 1 - Relação entre o valor de  $R_L$  e a classificação da isoterma.

Fator de Separação ( $R_L$ )	Classificação da isoterma
$R_L > 1$	Desfavorável
$R_L = 1$	Linear
$0 < R_L < 1$	Favorável
$R_L = 0$	Irreversível

Fonte: Autora, 2024.

Valores de  $R_L$  entre 0 e 1, indicam que a fase sólida é preferível, ocasionando um processo favorável. Já valores acima de 1, sugerem que a fase líquida é preferível ao soluto, indicando um fenômeno desfavorável. Enquanto que valores iguais a 1 ou 0, são relacionados a isotermas lineares e irreversíveis, respectivamente (Nascimento *et al.* 2020).

### 2.4.2 Modelo de isoterma de Freundlich

O modelo de Freundlich foi elaborado em 1932, e trata-se de um equacionamento em que é considerado o princípio de fisissorção, sendo um exemplo de isoterma favorável (Nascimento *et al.* 2020).

Este modelo de isoterma baseia-se no princípio da inexistência de um limite para a capacidade de adsorção, ou seja, não prevê uma possível saturação do adsorvente. Assim, possui como característica a possibilidade de adsorção em multicamadas, que é uma particularidade de processos onde a adsorção física prevalece (Bolgar *et al.* 2018).

Na Equação 6, é expressa a capacidade de adsorção através do modelo de isoterma de Freundlich:

$$q_e = K_F \cdot C_e^{1/n} \quad (6)$$

Para a construção da curva de adsorção utiliza-se a forma linearizada do modelo, esta é apresentada na Equação 7:

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (7)$$

Onde:

$q_e$  = quantidade de soluto adsorvido por grama de adsorvente no equilíbrio ( $\text{mg.g}^{-1}$ );

$1/n$  = constante relacionada à heterogeneidade da superfície;

$K_F$  = constante de Freundlich ( $\text{L.mg}^{-1}$ );

$C_e$  = concentração de soluto do equilíbrio ( $\text{mg.L}^{-1}$ ).

A avaliação do processo é realizada através do valor obtido para o parâmetro  $n$ , como é descrito no Quadro 2.

Quadro 2 - Relação entre o valor de  $n$  e a classificação da isoterma.

Parâmetro $n$	Classificação da isoterma
$n < 1$	Desfavorável
$n = 1$	Linear
$1 < n < 10$	Favorável

Fonte: Autora, 2024.

Quanto maior o valor de  $n$ , mais forte será a interação entre o adsorvato e o adsorvente, ou seja, mais favorável será o processo.

## 2.5 ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO MOLECULAR UV-VIS

A espectroscopia de absorção molecular consiste em um método de identificação e quantificação de substâncias, amplamente utilizado em escala laboratorial e que se baseia na interação da radiação eletromagnética com a molécula presente na amostra (Pavia, Lampman, Kriz, Vyvyan, 2016).

Seu princípio de funcionamento consiste, basicamente, na emissão de energia eletromagnética através de uma fonte. A luz então passa por um monocromador, que é responsável por delimitar o comprimento de onda que entrará em contato com a amostra. Ao atravessar a cubeta contendo a amostragem, parte da energia é absorvida e outra parcela é emitida. Ao final, o equipamento realiza a leitura e fornece o valor de absorbância, ou seja, quanta radiação não foi transmitida. Este valor relaciona-se com a concentração de analito, através da curva de calibração construída para a solução (Cohn, 2006).

É considerado um método altamente seletivo, devido a característica de cada substância apresentar um pico de absorção em um comprimento de onda próprio, gerando assim, espectros únicos. Para a determinação da região espectral ideal são realizadas varreduras, que consistem na leitura de uma amostra com concentração constante em distintos comprimentos de onda (Pavia, Lampman, Kriz, Vyvyan, 2016).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 TESTES PRELIMINARES

##### 3.1.1 Composição granulométrica do adsorvente

O material utilizado como adsorvente foi a cinza de casca de arroz (CCA) proveniente da queima em forno de grelha de uma empresa cerealista localizada no Rio Grande do Sul.

A amostra bruta foi caracterizada quanto ao seu aspecto visual, através de microscópio ótico (marca Tucsen, modelo ISH1000) com aproximação de 8x e com relação a sua composição granulométrica, através do peneiramento de 68,8 g de cinza. Este ocorreu em malhas de 4, 12, 14, 20, 30, 35, 50 e 60 mesh, conforme Figura 3, que correspondem a aberturas de 4750, 1700, 1400, 850, 600, 500, 300 e 250  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

Figura 3 – Peneiras utilizadas para análise granulométrica.



Fonte: Autora, 2024.

O peneiramento foi realizado em peneiras de inox (marca TPL), com o auxílio de mesa vibratória (marca Fortest).

##### 3.1.2 Espectrometria de fluorescência de raios X

A espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) foi realizada no Laboratório de Geoquímica da UFRGS – Campus do Vale, em espectrômetro de fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda (marca Rigaku, modelo RIX 2000).

A caracterização de FRX da cinza de casca de arroz, foi realizada para a possível avaliação da sua composição química. Para isso, inicialmente, realizou-se no IFRS – Campus Feliz as etapas de lixiviação com ácido clorídrico e calcinação, com o intuito de remover a matéria orgânica volátil presente na CCA.

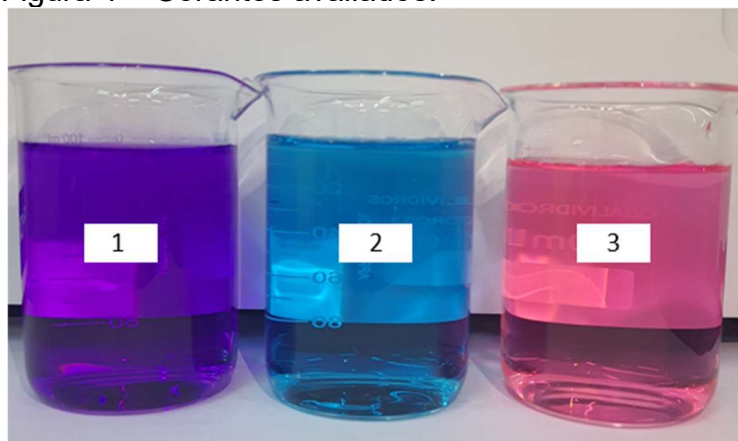
A lixiviação foi realizada pesando-se 25 g de cinza e emergindo-as em solução de ácido clorídrico 10% v/v, juntamente com 5 pérolas de vidro, em balão de fundo redondo. A mistura foi fervida durante 2 h, em seguida as cinzas foram lavadas em filtro a vácuo com água destilada e secas em estufa (marca Lucadema, modelo 82/100), durante 6 h e a 100 °C.

Para a segunda etapa, pesou-se 7,5191 g de CCA, que foi calcinada em forno tipo mufla (marca Jung, modelo 24010), a uma temperatura de 600 °C, durante 6 horas e com rampa de aquecimento de 5 °C/min.

### 3.1.3 Avaliação de corantes

Inicialmente foram realizados testes com os seguintes corantes: os catiônicos verde de malaquita (marca Nuclear) e violeta cristal (marca Neon) e o aniônico vermelho reativo (marca Sigma-Aldrich), conforme Figura 4.

Figura 4 – Corantes avaliados.



Legenda: “1” corante violeta cristal; “2” corante verde de malaquita; “3” corante vermelho reativo.

Fonte: Autora, 2024.

Os testes foram conduzidos em temperatura ambiente, utilizando 100 mL de solução e 1,2 g de CCA, em sua condição natural de pH, nas granulometrias de 20 (850  $\mu\text{m}$ ) e 60 (250  $\mu\text{m}$ ) mesh. Nesta etapa também foi verificada a influência da adição de cinza no pH do meio, através da medição em pHmetro (marca Lucadema, modelo MPA-210), da amostra antes e após o processo de adsorção.

As amostras de verde de malaquita (VM) e vermelho reativo (VR) foram preparadas a partir da diluição de soluções iniciais de concentração 2130 e 1000 mg/L, respectivamente. Para isso, pesou-se 1 g de VM (1,6 mL) e 8 g de VR (8,4 mL), ambos para 1000 mL de água destilada.

A solução estoque de violeta cristal (VC) (marca Neon), com concentração 405 mg/L foi preparada pesando-se 0,2025 g de pó para 500 mL de água destilada. Após, realizou-se a diluição de 5 g (5,4 mL) desta em balão volumétrico de 1000 mL.

### 3.1.4 Turbidez

Para a construção da curva de turbidez, agitou-se 100 mL de água destilada contendo amostras de CCA durante 10 min a uma velocidade de 150 rpm, em um agitador do tipo incubadora shaker (marca Lucadema, modelo Luca-222), conforme Figura 5. Foram utilizadas as granulometrias de 12, 14, 20, 30, 35, 50 e 60 mesh, além da amostra em sua forma bruta.

Figura 5 – Agitador shaker Lucadema.



Fonte: Autora, 2024.

Com o intuito de aumentar a quantidade de partículas finas, foi realizada a cominuição da amostra em cadinho de porcelana com pistilo. Após a realização do ensaio, as amostras foram filtradas em papel filtro qualitativo e a leitura realizada em um turbidímetro (marca Hanna, modelo HI 98703).

### 3.1.5 Espectro de absorção molecular

A construção do espectro de absorção molecular do VC foi realizada mediante a varredura de comprimento de onda em espectrofotômetro UV-Vis (marca Nova Instrumentos, modelo Nova 6100UV), conforme Figura 6.

Figura 6 – Espectrofotômetro Nova Instrumentos.



Fonte: Autora, 2024.

A solução utilizada para esta etapa do processo foi preparada através da pesagem de 20 g (21,6 mL) da solução estoque para posterior diluição em balão volumétrico de 1000 mL.

A varredura foi realizada do comprimento de onda de 190 até 780 nm. A partir desta, é possível determinar o comprimento de onda no qual a solução apresenta o valor máximo de absorbância do corante.

Com o intuito de comprovar o comprimento de onda a ser utilizado, realizou-se também a varredura de uma solução após ser realizado o processo de adsorção e outra onde agitou-se apenas água destilada e cinza.

### 3.1.6 Curva de calibração do vc

A curva de calibração do VC foi construída através da leitura de absorbância em espectrofotômetro (marca Nova Instrumentos, modelo Nova 6100UV), no comprimento de onda de 582 nm, de soluções com concentrações conhecidas. Para isso, partiu-se de uma solução inicial de concentração 405 mg/L e realizou-se a diluição de 6 pontos (Figura 7), onde adicionou-se 2,5, 4,0, 5,5, 7,0, 8,5 e 10,0 g da solução em balões volumétricos de 500 mL, que foram completados com água destilada.

Figura 7 – Diluições do corante violeta cristal.



Fonte: Autora, 2024.

### 3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental para obtenção das superfícies de resposta foi realizado variando duas condições, tempo de contato e temperatura, conforme Tabela 2, a fim de avaliar seus efeitos na adsorção do corante. A quantidade de adsorvente foi mantida constante em 1,5 g de cinza bruta, assim como a concentração da solução, 8,7 mg/L. Esta foi preparada de forma análoga a utilizada para a construção do espectro de absorção molecular.

Tabela 2 - Variáveis testadas para o planejamento experimental.

Código	Tempo de contato (min)	Temperatura (°C)
- 1,41	5	20
- 1	10	24
0	15	28
1	20	32
1,41	25	35

Fonte: Autora, 2024.

Os testes seguiram a metodologia de planejamento composto central rotacional (DCCR) que resultou em 9 variações de análises, sendo realizadas em triplicata, totalizando 27 amostras.

Os ensaios foram realizados em agitador tipo shaker (marca Lucadema, modelo Luca-222), com velocidade constante de 150 rpm. Após, as amostras foram filtradas e a leitura realizada em espectrofotômetro.

### 3.3 ISOTERMAS DE ADSORÇÃO

Para os ensaios de adsorção utilizou-se a CCA em sua forma bruta. Os testes foram realizados em um agitador do tipo shaker (marca Lucadema, modelo Luca-222), em condições constantes de temperatura (20 °C), tempo de contato (15 min), quantidade de adsorvente (1,5 g) e velocidade de agitação (150 rpm).

Para a construção das isotermas de adsorção variou-se a concentração da solução utilizada. Assim, foram preparadas 6 soluções a partir da diluição da solução inicial de concentração 405 mg/L, analogamente as empregadas para a construção da curva de calibração. Os pontos foram testados em triplicata, resultando em 18 amostras.

Após, parte de cada amostra, em torno de 50 mL, foi filtrada (Figura 8) e o restante foi mantido em contato com a cinza para decantação durante 48 h (Figura 9). Foi realizada a leitura em espectrofotômetro (marca Nova Instrumentos, modelo Nova 6100UV), do filtrado e da parcela sobrenadante, que foi retirada com auxílio de pipeta pasteur.

Após serem realizadas as leituras, os dados obtidos foram ajustados para três modelos de isotermas de adsorção (linear, Langmuir e Freundlich), visando averiguar qual modelo se adequa melhor ao processo realizado.

Figura 8 – Amostras filtradas após ensaios de adsorção.



Fonte: Autora, 2024.

Figura 9 – Amostras decantadas após 48 horas.



Fonte: Autora, 2024.

### 3.4 REMOÇÃO DE CORANTE EM CONDIÇÕES OTIMIZADAS

Para esta etapa foram utilizadas as dosagens de 1,8 e 2,0 g de cinza de casca de arroz. Os ensaios realizaram-se com 100 mL de solução de VC de concentração 8,7 mg/L, em equipamento tipo shaker (marca Lucadema, modelo Luca-222), seguindo as condições otimizadas de 20 °C, 15 min de agitação e 150 rpm.

Após a realização dos testes, as amostras foram mantidas sob decantação durante 168 h. Foram realizadas leituras em espectrofotômetro (marca Nova Instrumentos, modelo Nova 6100UV), no comprimento de onda de 582 nm, da parcela sobrenadante após 48, 96 e 168 h.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 COMPOSIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

#### 4.1.1 Composição granulométrica do adsorvente

O aspecto visual da CCA é mostrado na Figura 10, a imagem foi obtida em microscópio ótico com aproximação de 8x. Em suma, o material apresenta coloração preta, com alguns resquícios de cascas que não carbonizaram por completo.

Figura 10 – Cinzas de casca de arroz.

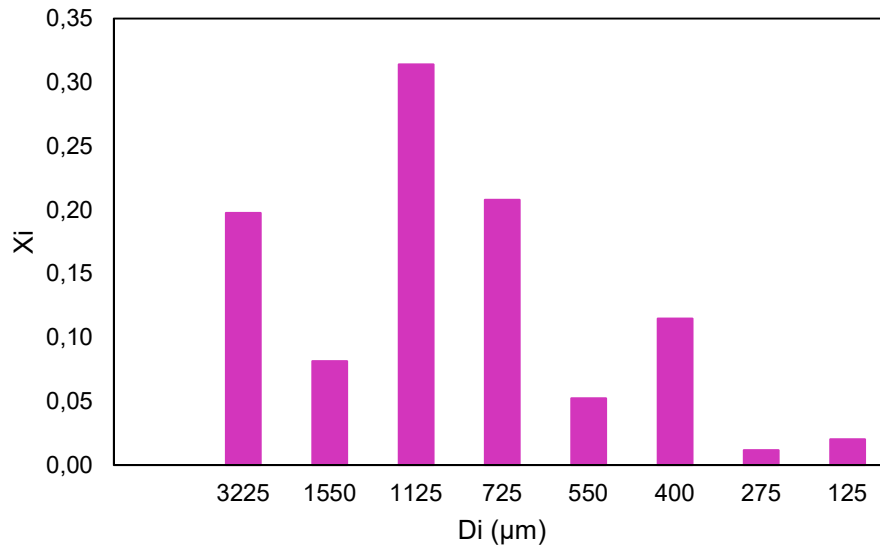


Fonte: Autora, 2024.

Na Figura 11, pode ser visualizada a distribuição granulométrica de acordo com a dimensão de menor tamanho das partículas não passantes de cada malha. O ponto alto da curva, demonstra que a amostra possui maior quantidade de material particulado passante na malha de 14 mesh e sendo retido na de 20 mesh, resultando em cinzas com tamanho aproximado de 1125  $\mu\text{m}$ , este valor tende a ser relacionado a largura do material, tendo em vista que este possui formato alongado.

Percebe-se também que na peneira de 60 mesh, onde as partículas apresentam tamanho médio de 275  $\mu\text{m}$ , há uma baixa fração de material que ficou retido, 0,012. A fração passante pela peneira mencionada e acumulada no fundo foi de 0,020, o que evidencia uma quantidade mínima de partículas com granulometria igual ou inferior a 275  $\mu\text{m}$ , na CCA em sua forma bruta, como é obtida após a queima em forno de grelha.

Figura 11 – Análise granulométrica da cinza de casca de arroz.

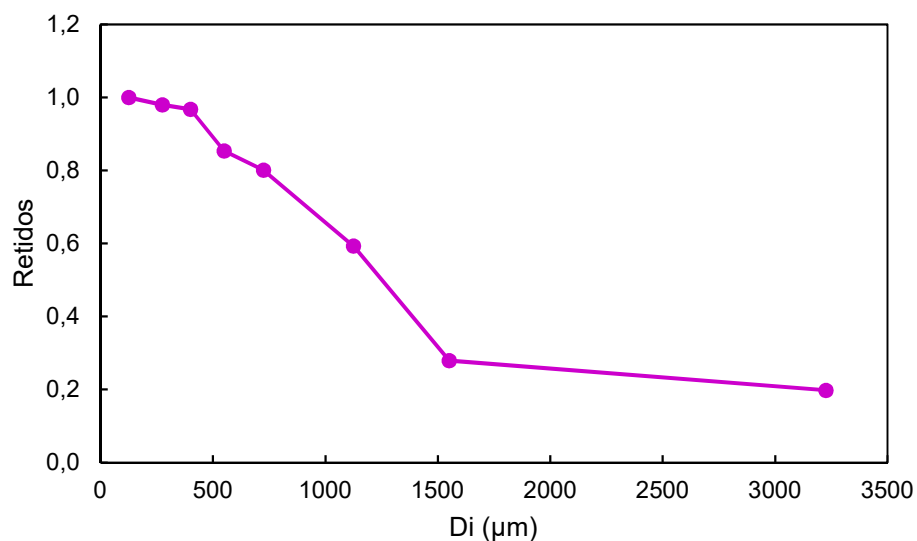


Fonte: Autora, 2024.

A análise granulométrica cumulativa de grossos é ilustrada na Figura 12. Nesta é possível constatar que, apesar da distribuição de partículas se caracterizar como uniforme, há uma alta quantidade de partículas com granulometrias superiores a 1125 μm.

É possível observar que grande parcela do material peneirado, 59,3%, ficou retido até a peneira de 20 mesh. Após a peneira de malha 30 mesh, que apresentou percentual cumulativo de 80,1%, o acumulado de grossos apresentou crescimento menos intenso.

Figura 12 - Análise granulométrica cumulativa de grossos retidos.



Fonte: Autora, 2024.

Com base nas Figuras 11 e 12, que apresentam a análise granulométrica da cinza de casca de arroz, percebe-se como alternativa viável a utilização do resíduo em sua forma bruta, tendo em vista a alta porcentagem de material grosseiro retido nas primeiras peneiras. Também é importante salientar, visando a aplicação em escala industrial, que a utilização da CCA em sua forma natural reduz o emprego de operações unitárias, não sendo necessária a moagem da amostra para atingir quantidade significativa de partículas finas e também o peneiramento para a separação de uma faixa de utilização.

#### 4.1.2 Espectrometria de fluorescência de raios x

Após as etapas de lixiviação e calcinação, o residual de CCA foi pesado, alcançando percentual de cinza remanescente de 92,72%. Também foi quantificada a quantidade de material volátil presente na amostra, onde foi obtido percentual de remoção de 7,28%.

O baixo valor encontrado para a remoção de material volátil, pode ser explicado devido ao resíduo ser proveniente da queima em caldeira, para geração de energia. Desta forma, a maior parte da matéria orgânica não está presente na cinza, sendo esta, composta em sua maior parte por substâncias inorgânicas.

Devido a cinza ser composta em suma por compostos inorgânicos, realizou-se a análise da composição química da CCA, através de FRX. Os resultados são apresentados na Tabela 3, onde são descritos os elementos presentes em maior porcentagem na cinza. Através desta, é possível comprovar a presença de sílica em maior quantidade.

Tabela 3 - FRX para a cinza de casca de arroz.

Amostra	Si	Al	Ti	Fe	Mn	Ca	Mg	K	Na	P	LOI	Total
CCA	94,895	Nd	0,015	1,347	0,175	0,499	0,385	1,52	Nd	0,415	0,56	100

Legenda: L.O.I. "Loss on Ignition", Perda ao Fogo feita por gravimetria; "Nd" não detectado pela metodologia.

Fonte: Autora, 2024.

## 4.2 AVALIAÇÃO DE CORANTES

Nesta etapa do estudo foram avaliados dois grupos de corantes, os catiônicos (verde de malaquita e violeta cristal) e os aniônicos (vermelho reativo), visando analisar em qual meio a CCA apresentaria maior eficiência de adsorção.

Na Tabela 4 são apresentados os valores de percentual de remoção para cada solução, nas condições de temperatura ambiente, velocidade de agitação de 150 rpm, tempo de contato de 15 min e para cinzas com passagem em peneira de 20 mesh. As concentrações utilizadas foram escolhidas de modo que a coloração da solução inicial ficasse adequada para a leitura no espectrofotômetro, não excedendo o limite do equipamento, mas também não sendo mínima ao ponto de não restar vestígios de corante na amostra final.

Tabela 4 - Percentual de remoção de corantes após ensaios de adsorção.

<b>Corante</b>	<b>Concentração inicial (mg/ L)</b>	<b>% remoção</b>
Verde de malaquita	3,4	82,68
Violeta cristal	2,2	80,73
Vermelho reativo	8,4	3,09

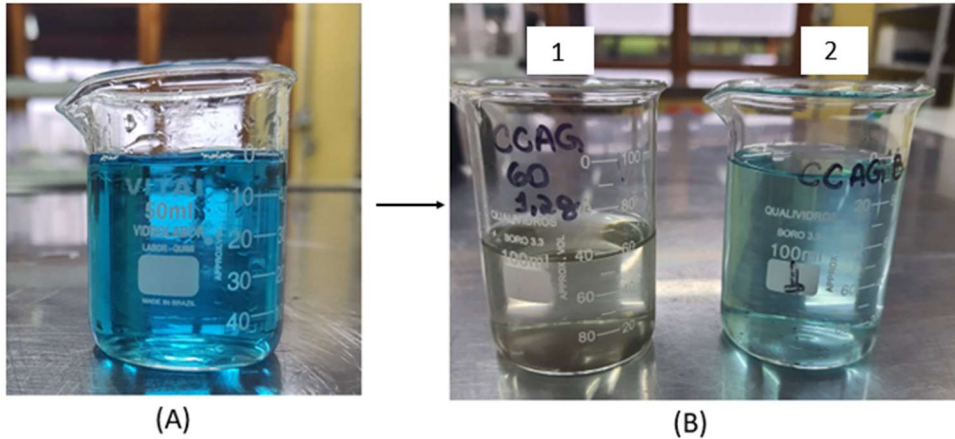
Fonte: Autora, 2024.

A partir da comparação de resultados, averiguou-se que a CCA possui melhor desempenho em corantes catiônicos. Isto se dá em decorrência das cargas presentes no meio, tendo em vista que corantes catiônicos tem por característica a dissociação em grupos positivos, enquanto a cinza em pH neutro para alcalino fica carregada negativamente, como foi relatado por Malik *et al.* (2020), que testou a remoção de corantes aniônicos e constatou que para o processo ser eficiente era necessário acidificar a solução, com objetivo da superfície do adsorvente adquirir carga positiva.

O pH neutro da solução foi comprovado a partir da leitura, onde registou-se medida de 7,08, assim como, a partir da adição de CCA o pH teve uma baixa elevação, atingindo o valor de 7,14, não afetando a condição do meio.

Outro fator testado foi a diferença de granulometria do adsorvente, e para isso utilizou-se cinzas peneiradas em malhas de 20 e 60 mesh. O resultado visual pode ser observado na Figura 13, onde percebe-se uma diminuição na tonalidade azul da solução de VM após o processo ser realizado com partículas mais finas, no entanto, a amostra com cinza mais grossa permaneceu mais límpida.

Figura 13 – Solução de verde de malaquita (A) antes e (B) após processo de adsorção.



Legenda: “1” solução com CCA de 60 mesh; “2” solução com CCA de 20 mesh.

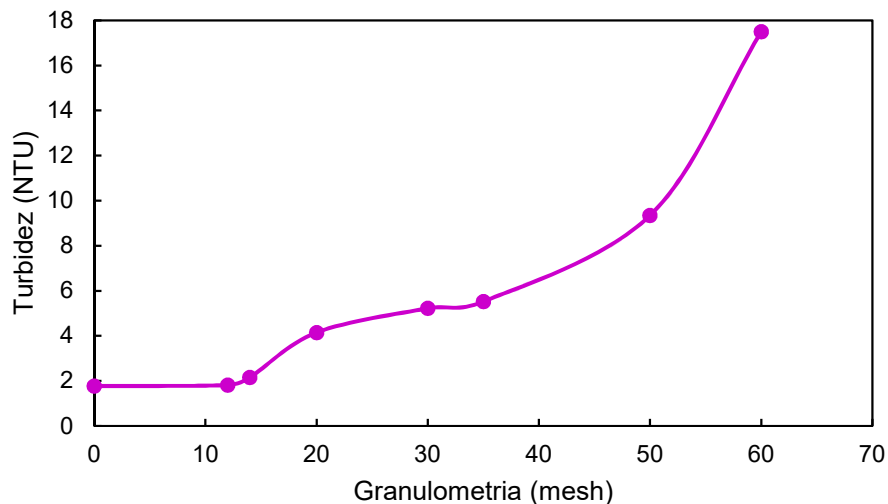
Fonte: Autora, 2024.

Apesar da cinza apresentar maior eficiência de remoção para o corante verde de malaquita, presou-se pela utilização do violeta cristal para o seguimento do estudo, em virtude do preparo da solução deste apresentar maior confiabilidade e resultados mais seguros de concentrações.

#### 4.3 TURBIDEZ

A curva de turbidez para o adsorvente está representada na Figura 14. Esta foi realizada em virtude da presença visual de resíduos sólidos observados nos testes iniciais realizados com CCA de 60 mesh. A curva foi construída utilizando as granulometrias de 12, 14, 20, 30, 35, 50 e 60 mesh.

Figura 14 – Curva de turbidez para a CCA.



Fonte: Autora, 2024.

Observa-se um aumento na presença de material particulado conforme o tamanho da partícula diminui. Isso pode estar relacionado com o modo de filtração utilizado, pois filtros com poros maiores que o tamanho das partículas tendem a permitir a passagem de resíduos do material adsorvente para a solução filtrada.

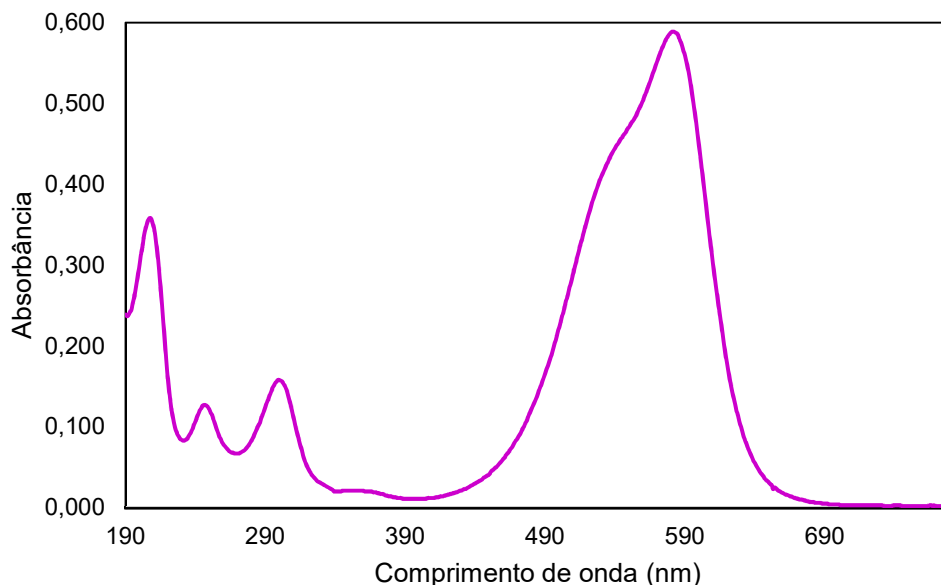
Sabe-se que partículas com granulometrias inferiores resultam em uma maior área superficial de contato, ou seja, maior disponibilidade de sítios ativos para que ocorra a adsorção (Ikenyiri, Ukpaka, 2016). No entanto, a presença de turbidez é um fator que influencia diretamente na leitura realizada no espectrofotômetro. Por tratar-se de um método onde a medida é feita através da transmitância de luz ao ser incidida sobre uma amostra, a presença de partículas suspensas impede a passagem de radiação, ocasionando erros de aferição (Pavia, Lampman, Kriz, Vyvyan, 2016).

Desta forma, com base nos dados obtidos sobre a distribuição granulométrica e a turbidez ocasionada pela cinza de casca de arroz, assim como, por priorizar um processo com menos etapas, optou-se pela utilização do resíduo na sua forma natural para a sequência do estudo.

#### 4.4 ESPECTRO DE ABSORÇÃO MOLECULAR

A representação do espectro de absorção molecular do corante violeta cristal é visualizada na Figura 15, sendo este, construído através da varredura realizada em amostra com concentração de 8,7 mg/L.

Figura 15 – Espectro de absorção molecular do violeta cristal.

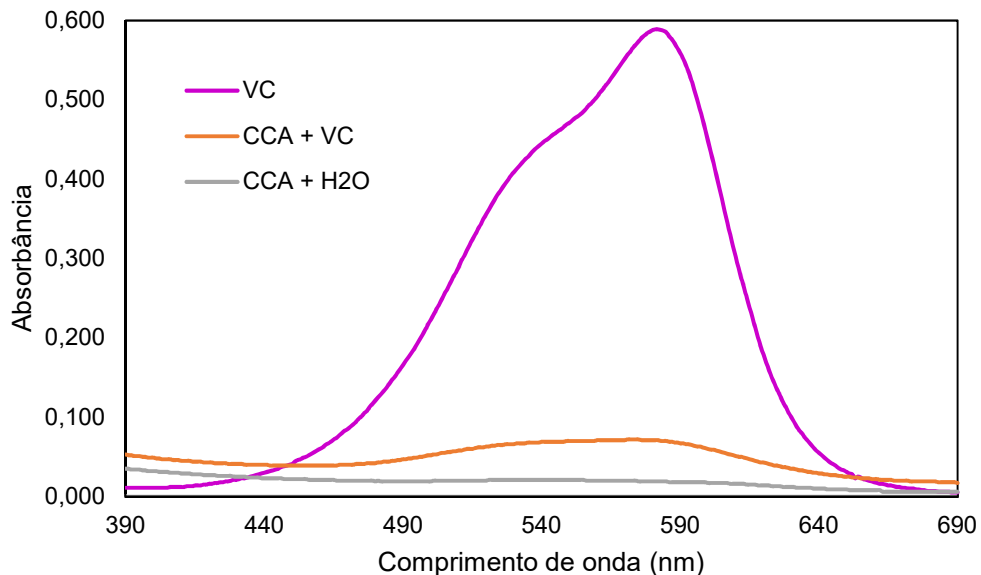


Fonte: Autora, 2024.

A partir da análise da Figura 15, foi possível determinar o comprimento de onda de maior absorção para esta solução, sendo este o de 582 nm, que foi utilizado para as leituras dos ensaios. O teste executado é essencial para a correta determinação da quantidade de corante presente na amostra.

O comprimento de onda de absorção máximo pode ser comprovado a partir da análise da Figura 16, onde realizou-se a comparação entre os espectros da solução de corante pura (VC), da amostra após realização do processo de adsorção (CCA + VC) e de um teste branco, onde agitou-se apenas água destilada com CCA (CCA + H<sub>2</sub>O).

Figura 16 – Comparação espectro de absorção molecular.



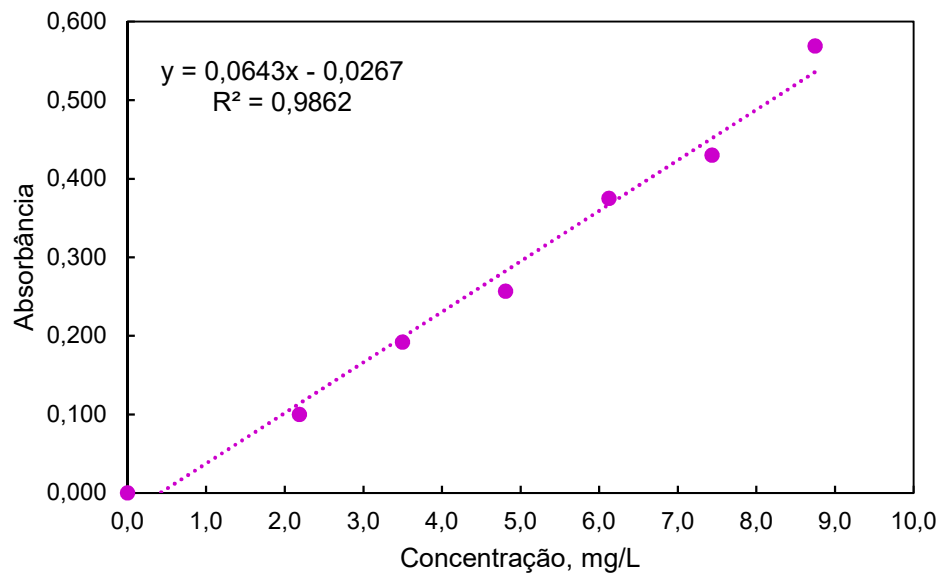
Fonte: Autora, 2024.

Alisando a Figura 16, é possível identificar elevações na região de 582 nm para as soluções contendo corante, com um pico menos intenso para a amostra que passou pelo processo de adsorção. Diferente destas, no teste branco, a curva apresenta comportamento de reta na região citada, indicando que não há a presença de violeta cristal e comprovando o comprimento de onda ideal para a realização dos testes.

#### 4.5 CURVA DE CALIBRAÇÃO DO VIOLETA CRISTAL

Na Figura 17 é observada a curva de calibração para o corante violeta cristal, que foi construída a partir da leitura de absorbância de soluções de concentrações 2,2, 3,5, 4,8, 6,1, 7,4 e 8,7 mg/L, no comprimento de onda de 582 nm.

Figura 17 – Curva e calibração do VC.



Fonte: Autora, 2024.

A curva plotada apresenta o comportamento de uma reta, desta forma, conforme aumenta a concentração da solução, há uma leitura maior de absorbância. Obteve-se um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9862 e p-valor  $< 0,0001$ , o que indica que a variável concentração possui influência altamente significativa no valor de absorbância, em razão do p-valor baixo obtido ser baixo.

A partir da regressão linear, também foi obtida a equação da reta, conforme Equação 8, que indica uma boa aproximação, em razão do  $R^2$  ser muito próximo de 1, além de possibilitar o cálculo da concentração de VC a partir da leitura realizada.

$$C = 0,0643 * ABS - 0,0267 \quad (8)$$

#### 4.6 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A partir dos dados obtidos pelo planejamento composto central rotacional foi realizado análise de variância (ANOVA), que utilizou as variáveis independentes tempo de contato sob agitação e temperatura, para obtenção dos coeficientes e a Equação 9, e a partir desta, plotou-se a superfície de resposta, representada na Figura 18, em função da variável de resposta absorbância.

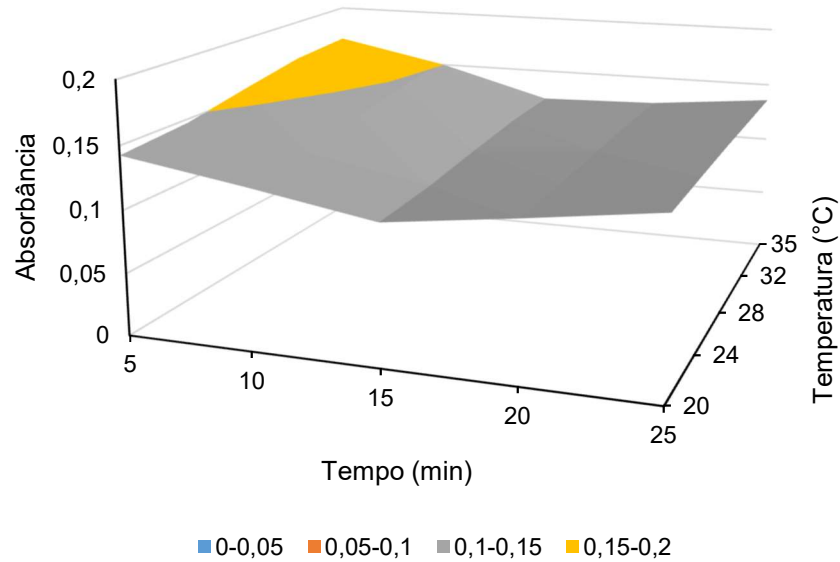
$$ABS = 0,1178 - 0,007t + 0,0046T + 0,0148t^2 - 0,0004T^2 - 0,0036 * t * T \quad (9)$$

Onde:

t = tempo de contato (s)

T = temperatura (°C).

Figura 18 – Superfície de resposta para a absorbância.



Fonte: Autora, 2024.

Na Tabela 5, são indicados os valores de p-valor encontrados para cada coeficiente da Equação 9. O p-valor indica se a variável independente testada possui influência significativa na variável resposta. Ao nível de significância de 5%, se o valor-p for menor que 0,05, deve-se rejeitar a hipótese nula onde não há diferença significativa entre as médias, ou seja, p-valor < 0,05, indica que há significância e que as variáveis independentes influenciam na variável resposta (Montgomery e Runger, 2021).

Tabela 5 - P-valor para ANOVA com variável resposta absorbância.

<b>Coefficiente</b>	<b>p-valor</b>
Interseção	7,5541E-19
t	0,00043
T	0,01218
t <sup>2</sup>	7,6627E-6
T <sup>2</sup>	0,87755
t*T	0,14810

Fonte: Autora, 2024.

A partir da análise da Tabela 5, constata-se que ambas as variáveis testadas possuem influência significativa nos ensaios de adsorção (p-valor < 0,05). No entanto,

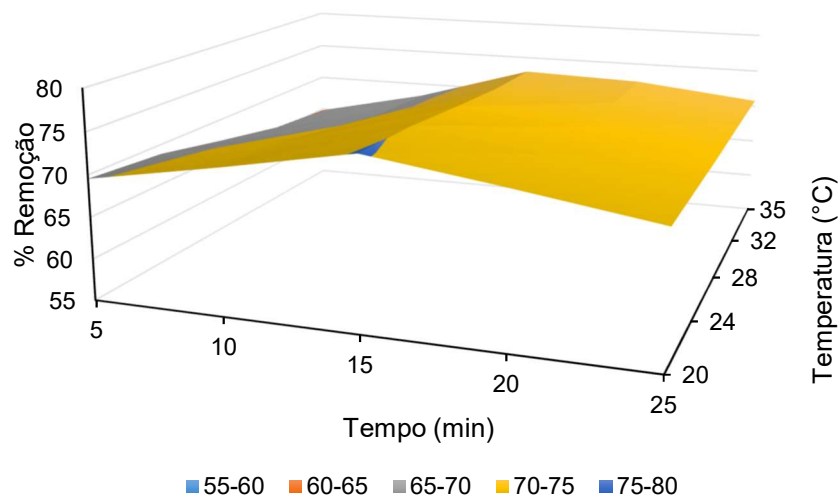
verifica-se que o tempo de contato possui impacto mais significativo no ensaio, pois apresenta p-valor inferior ao da variável temperatura. Também, devido aos coeficientes de  $temperatura^2$  e  $tempo * temperatura$  apresentarem p-valor  $> 0,05$ , não sendo significativos, comprova-se que a temperatura possui menor influência no processo. No entanto, presou-se pela aplicação de todos os coeficientes na equação, apesar de  $T^2$  e  $T * t$  apresentarem valores relativamente baixos.

Assim, a partir da construção da superfície de resposta em função da variável absorvância, foi possível realizar a otimização do processo para as variáveis testadas, onde determinou-se 20 °C e 15 min como as condições mais adequadas para a realização do fenômeno de adsorção.

Em nova análise estatística realizada, utilizou-se como variável resposta o percentual de remoção, para as mesmas variáveis independentes de tempo de contato e temperatura. A partir desta, obteve-se a Equação 10, que foi utilizada para a construção da superfície de resposta representada na Figura 19.

$$\%_{remoção} = 73,9363 + 1,2283t - 0,8105T - 2,5952t^2 + 0,0642T^2 + 0,6280 * t * T \quad (10)$$

Figura 19 – Superfície de resposta para o percentual de remoção.



Fonte: Autora, 2024.

Na Tabela 6, são indicados os valores de p-valor para cada coeficiente obtido na Equação 10.

Tabela 6 - P-valor para ANOVA com variável resposta % remoção.

<b>Coefficiente</b>	<b>p-valor</b>
Interseção	2,8839E-28
t	0,00058
T	0,01437
t <sup>2</sup>	4,2798E-5
T <sup>2</sup>	0,89998
t*T	0,15787

Fonte: Autora, 2024.

Ao nível de significância de 5%, a análise da Tabela 6 comprova que a variável independente temperatura possui menor influência no processo, quando comparada a variável tempo de contato. Pois, o p-valor do coeficiente  $T$  é maior que o do coeficiente  $t$ , 0,01437 e 0,00058, respectivamente. Além disso, conforme visto anteriormente, os parâmetros  $T^2$  e  $T * t$ , possuem p-valor superior ao utilizado como nível de significância, desta forma, não apresentam influência significativa.

Ademais, a partir da construção da superfície de resposta em função do percentual de remoção, conforme Figura 19, foi possível prever um percentual de remoção de corante de 75,2%, para as condições otimizadas de processo de 20 °C e 15 min.

Os resultados encontrados demonstram que com o aumento de temperatura há uma diminuição na eficiência do processo. Isto ocorre pois, em temperaturas superiores há maior mobilidade e vibração molecular, resultando na ampliação da taxa de dessorção (Saha, *et al.* 2021). Além disso, por tratar-se de um processo exotérmico, elevações na temperatura tendem a deslocar o equilíbrio de reação no sentido inverso, elevando a taxa de dessorção (Silva, 2005).

Com relação a avaliação do tempo de contato, percebe-se que a absorvância medida diminui com o aumento de tempo, até o seu valor mínimo em 15 min. No entanto, nota-se uma tendência de aumento no valor detectado pelo equipamento a partir de ensaios com duração superior.

Segundo Banerjee *et al.* (2016), o fenômeno de adsorção ocorre inicialmente de forma mais rápida, devido à alta disponibilidade de sítios ativos, diminuindo a velocidade conforme o adsorvente fica saturado, até atingir o estágio de equilíbrio, quando as taxas de adsorção e dessorção são iguais.

Assim, em tempos muito curtos, o processo pode não ocorrer de forma completa, sendo interrompido antes da saturação do material. Já em ensaios que permanecem por maiores períodos sob agitação, como relatado por Saha *et al.* (2021), o corante tende a ser desorvido, devido a permanência sob agitação e falta de pontos de ligação.

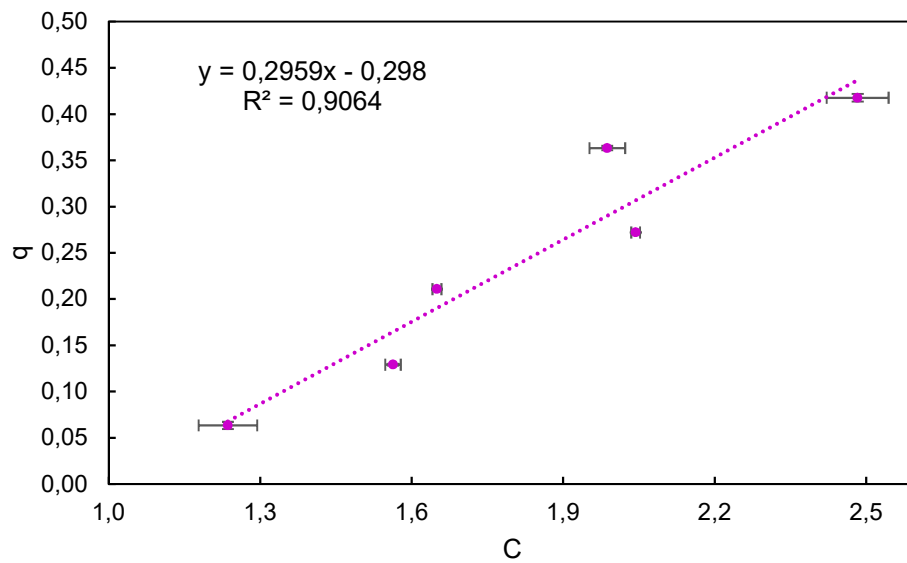
Como já foi mencionado anteriormente, o agitação favorece a mobilidade e interações moleculares, por conta do aumento de colisões que ocasiona entre elas. Assim, a permanência de agitação após o equilíbrio tende a liberar o adsorvato para o meio, pois ocorre a interação do adsorvente saturado com a solução com baixa concentração de corante.

#### 4.7 ISOTERMAS DE ADSORÇÃO

A partir da absorbância lida, foi calculada a concentração de soluto no equilíbrio ( $C$ ), através da Equação 8 e a quantidade de soluto adsorvido por grama de adsorvente no equilíbrio ( $q$ ), por meio da Equação 3. Os dados obtidos foram ajustados aos modelos de isoterma linear, de Langmuir e de Freundlich, além disso, foram adicionadas barras de desvio padrão para as curvas construídas e realizou-se a regressão linear, que possibilitou a obtenção do  $R^2$  e do p-valor, ao nível de significância de 5%, característico de cada equação.

Para a isoterma linear (Figura 20), plotou-se o gráfico de  $C$  versus  $q$ , onde a partir da regressão linear, obteve-se um  $R^2$  de 0,9064 p-valor igual a 0,003, menor que o nível de significância.

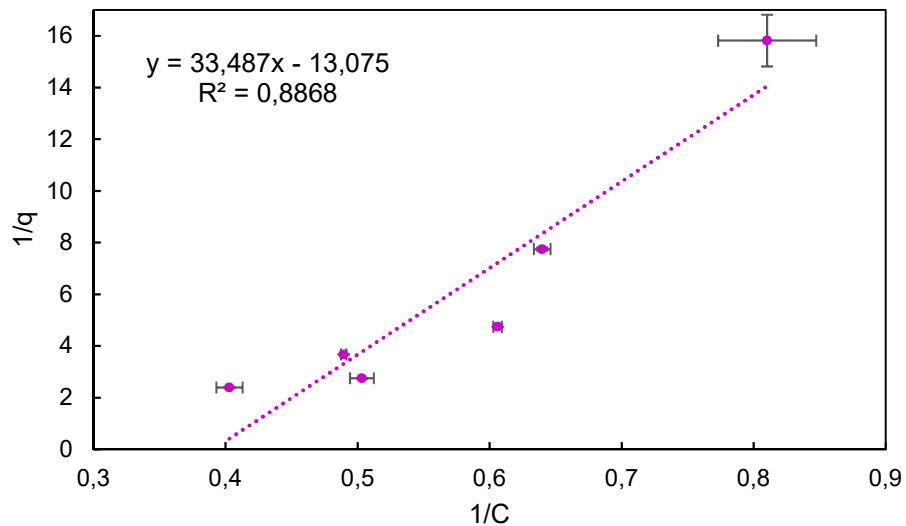
Figura 20 – Isoterma linear para a solução filtrada.



Fonte: Autora, 2024.

O gráfico do modelo matemático de Langmuir é observado na Figura 21, o qual foi plotado através da inversa de  $C$  versus  $q$ , ou seja,  $1/C$  versus  $1/q$ . O  $R^2$  encontrado foi de 0,8868 (p-valor 0,004 < 0,05).

Figura 21 – Isoterma de Langmuir para a solução filtrada.



Fonte: Autora, 2024.

Os parâmetros de adsorção para o modelo de Langmuir foram calculados e são apresentados na Tabela 7.

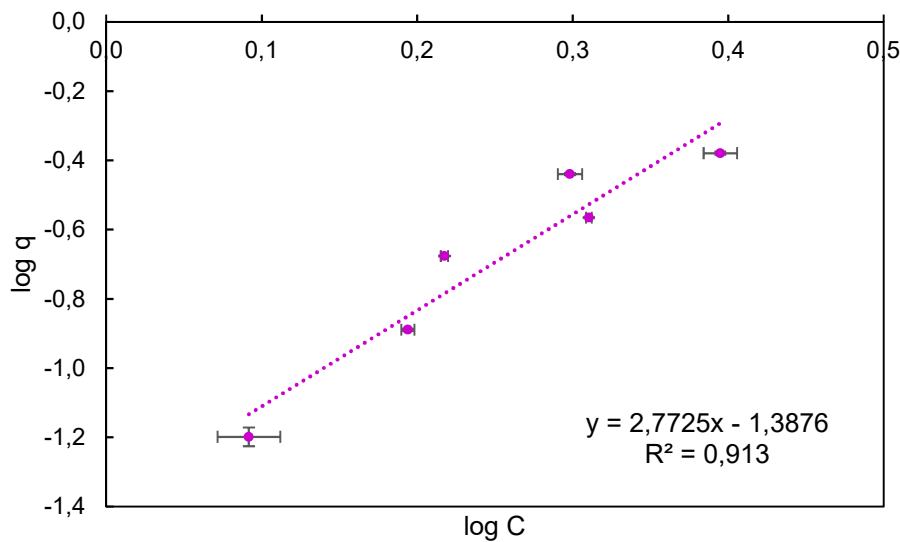
Tabela 7 - Parâmetros de adsorção de Langmuir.

$q_{\text{máx}}$ (mg/g)	$K_L$ (L/mg)	$R_L$
33,487	0,0023	0,9289

Fonte: Autora, 2024

Por fim, os dados foram ajustados ao modelo de Freundlich, por meio da aplicação do logaritmo, onde plotou-se o gráfico do logaritmo de  $C$  versus o logaritmo de  $q$ , como é ilustrado na Figura 22. Através da regressão linear foi obtido  $R^2$  de 0,913 (p-valor  $0,002 < 0,05$ ).

Figura 22 – Isoterma de Freundlich para a solução filtrada.



Fonte: Autora, 2024.

Os parâmetros de Freundlich também foram calculados e são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros de adsorção de Freundlich.

$n$	$K_F$ (L/mg)
1,7206	1,4699

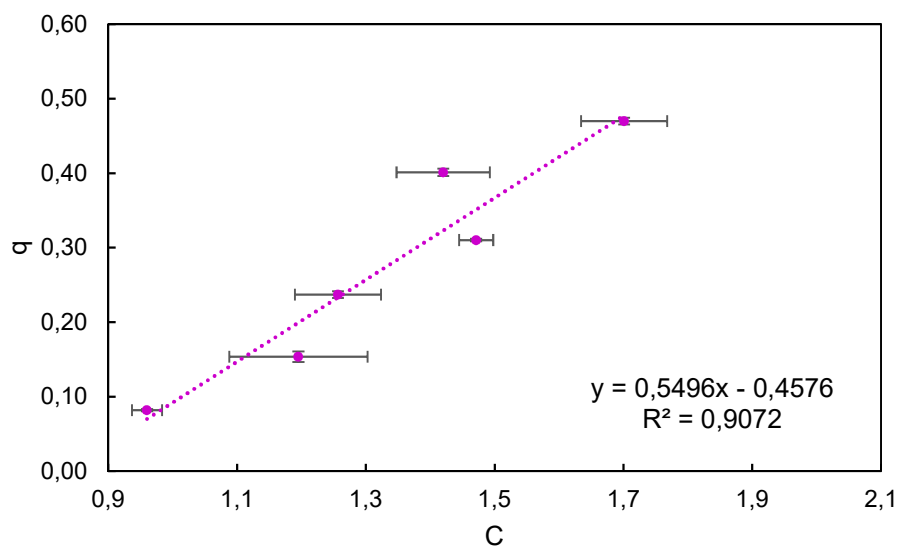
Fonte: Autora, 2024

Através dos parâmetros de adsorção,  $n$  e  $R_L$ , constatou-se que ambas as isotermas são favoráveis. No entanto, o modelo de Freundlich representa de maneira mais adequada os dados obtidos, pois apresenta  $R^2$  mais próximo de 1 e também p-valor inferior.

Como já foi mencionado, parte das soluções foram mantidas por 48 horas em contato com a cinza após os ensaios de adsorção, com o intuito de avaliar a possibilidade de realização do processo sem a etapa de filtração.

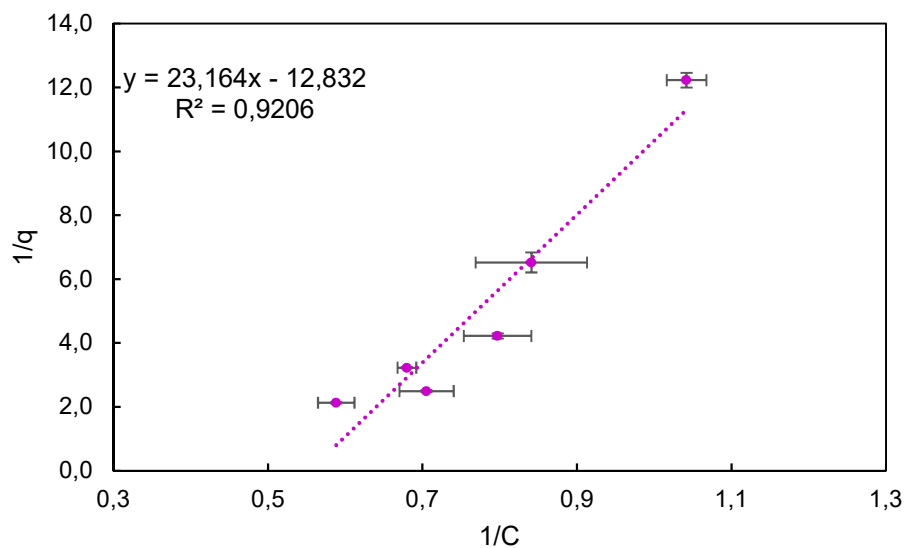
Após as leituras de absorbância, os dados foram novamente ajustados para os modelos de isothermas linear (Figura 23), de Langmuir (Figura 24) e de Freundlich (Figura 25), onde foram obtidos  $R^2$  de 0,9072 (p-valor 0,033 < 0,05), 0,9206 (p-valor 0,002 < 0,05) e 0,9314 (p-valor 0,001 < 0,05), respectivamente.

Figura 23 – Isotherma linear para a solução decantada.



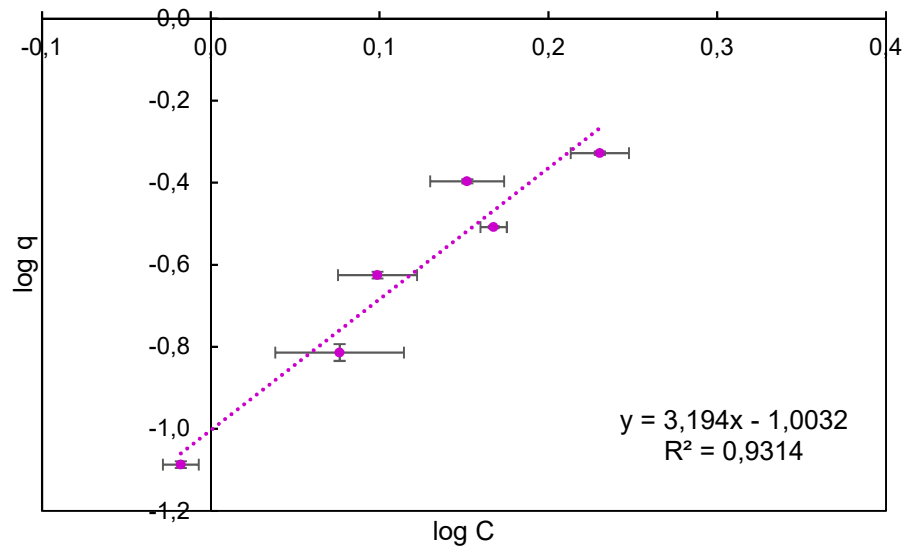
Fonte: Autora, 2024.

Figura 24 – Isotherma de Langmuir para a solução decantada.



Fonte: Autora, 2024.

Figura 25 – Isoterma de Freundlich para a solução decantada.



Fonte: Autora, 2024.

A plotagem das curvas de adsorção após decantação, confirmou o modelo matemático de Freundlich como o que melhor representa o processo realizado. Desta forma, a adsorção ocorre com características de fisissorção, onde há a possibilidade de formação de multicamadas, como já foi relato por Aljeboree, Alkaim e Al-Dujaili (2015), Yasin *et al.* (2021), Banerjee *et al.* (2016), Lakshmi *et al.* (2009) e Da Rosa *et al.* (2019).

Também, averiguou-se, através da comparação das leituras de absorvância entre as amostras filtradas de imediato e as decantadas durante 48 h, que o processo pode ser realizado sem a etapa de filtração. As soluções mantidas em contato com a cinza por maior período de tempo apresentaram concentrações finais menores e, conseqüentemente, percentuais de remoção de VC superiores.

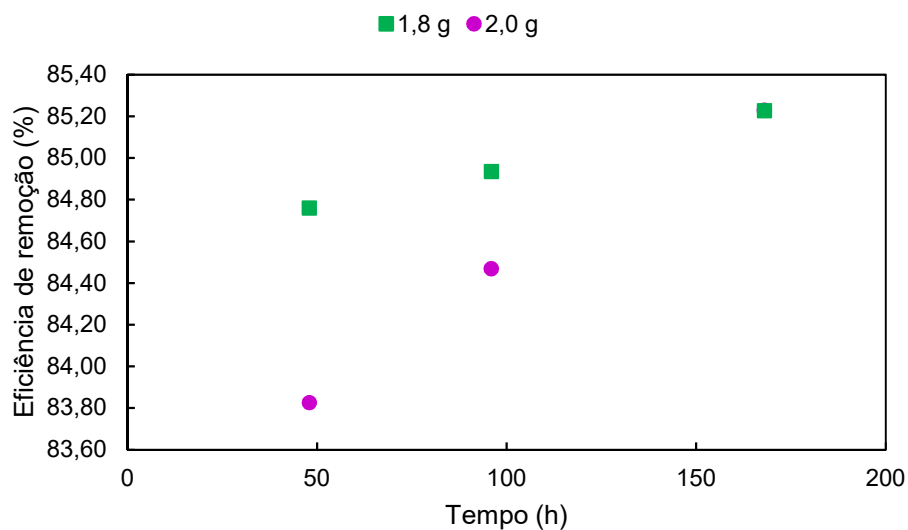
Diferente do processo realizado durante a etapa de planejamento experimental, durante a decantação as amostras foram mantidas sem agitação, resultando em um maior tempo de contato, no entanto sem aumentar a mobilidade molecular, que tende a facilitar o fenômeno de dessorção.

Assim, devido a característica de adsorção física que não prevê uma saturação do material, um tempo de contato superior auxilia na eficiência de adsorção. Pois, apesar da velocidade de reação diminuir ao decorrer do processo, a cinza continua adsorvendo enquanto estiver em contato com o meio.

#### 4.8 REMOÇÃO DE CORANTE EM CONDIÇÕES OTIMIZADAS

Por fim, realizando-se a adsorção em condições otimizadas e mantendo-se a solução de corante em contato com as cinzas por mais tempo, com o intuito de remover uma maior parcela de corante, utilizou-se duas quantidades maiores de CCA, 1,8 e 2,0 g, mantendo uma concentração constante de corante de 8,7 mg/L e volume de solução de 100 mL. Os resultados de percentual de remoção são apresentados na Figura 26.

Figura 26 – Percentuais de remoção com o tempo.



Fonte: Autora, 2024

Observa-se que, inicialmente, nos tempos de 48 e 96 h, a amostra com 1,8 g de CCA apresentou maior percentual de remoção, 84,76 e 84,94%, respectivamente, em comparação com a amostra de 2,0 g, onde obteve-se remoção de 83,83 e 84,47%. No entanto, após decantação durante 168 h, ambas as amostras atingiram o mesmo patamar de remoção, alcançando um percentual máximo de 85,23%.

Uma maior quantidade de adsorvente, resulta em um aumento na disponibilidade de sítios ativos, favorecendo o fenômeno de adsorção, em razão de haver mais possibilidade de retenção das moléculas de corante (Quansah *et al.* 2020). Isso foi possível observar aumentando a dosagem de 1,5 g, utilizada durante a etapa de planejamento experimental e para a construção das isotermas, para as dosagens de 1,8 e 2,0 g.

Utilizando dosagem de 1,5 g e realizando-se o experimento nas condições otimizadas de 20 °C e 15 min, para uma decantação de 48 horas, obteve-se percentual de remoção de 80,55%. Como esperado, o valor é menor em comparação aos alcançados para as amostras com 1,8 e 2,0 g de adsorvente, onde atingiu-se 84,76 e 83,83 % de remoção, respectivamente.

No entanto, quantidades demasiadamente elevadas podem ocasionar a aglomeração do adsorvente, gerando efeito contrário e reduzindo a disponibilidade de áreas para que ocorra a adsorção (Saha *et al.* 2021). Como foi percebido, através da comparação de resultados de percentual de remoção entre as amostras com 1,8 e 2,0 g de adsorvente, para os tempos iniciais de 48 e 96 h.

Por fim, após 168 h, ambas as amostras apresentaram mesmo percentual de remoção, o que pode ser explicado devido à natureza de características físicas do processo. Como já foi relatado, na fisissorção, há a possibilidade de adsorção em múltiplas camadas (Nascimento *et al.* 2020), ou seja, as moléculas de corante não são retidas necessariamente apenas pelos sítios ativos. Desta forma, a dosagem de CCA utilizada, mesmo que em menores quantidades, não delimita o percentual de remoção que será atingido, podendo influenciar no tempo necessário para alcançá-lo.

## 5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da avaliação realizada, conclui-se que a cinza de casca de arroz de forno de grelha, em sua forma bruta, sem a necessidade de pré-tratamento químico, apresentou alta eficiência na remoção do corante catiônico violeta cristal. Podendo ser utilizada como material bioissorvente de baixo custo e abundante, além de atribuir valor agregado a um resíduo agroindustrial.

A otimização do processo foi realizada para as variáveis de tempo de contato e temperatura, que resultou em 20 °C e 15 min como as condições de melhor realização do fenômeno de adsorção. O que indica ser um processo rápido e com possibilidade de ocorrer em temperatura ambiente.

Também, realizou-se a comparação entre a amostra filtrada de imediato, após agitação e mantida decantando por 48 h, onde foi possível avaliar que há a possibilidade de realizar o processo sem a etapa de filtração.

O ajuste ao modelo matemático de Freundlich representou melhor os dados experimentais, onde obteve-se coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9130 e 0,9314 para a solução filtrada de imediato e decantada por 48 h, respectivamente. Concluindo que forças físicas comandam o mecanismo de adsorção.

Por fim, para as dosagens de 1,8 e 2,0 g de adsorvente, obteve-se o percentual máximo de remoção de 85,23%, em condições de 20 °C, agitação de 15 min e decantação de 168 h, concluindo que a quantidade de CCA empregada não possui influência na quantidade de corante removida.

Ademais, em decorrência dos resultados obtidos para a remoção de corante violeta cristal empregando CCA como bioissorvente, são propostas algumas sugestões de trabalhos futuros como: melhoria das isothermas testadas; realização da cinética do processo; avaliação de outros corantes; realização do processo de forma contínua, através da construção de uma coluna de adsorção.

## 6 REFERÊNCIAS

ALENCAR, Viviane do Nascimento e Silva. **Resíduos agroindustriais: uma alternativa promissora e sustentável na produção de enzimas por microrganismos**. *Anais do Congresso Internacional da Agroindústria*, 2020.

ALJEBOREE, Aseel M.; ALKAIM, Ayad F.; AL-DUJAILI, Ammar H. Isotherma de adsorção, modelagem cinética e termodinâmica do corante violeta cristal em carvão ativado à base de casca de coco. **Dessalinização e Tratamento de Água**, v. 53, n. 13, p. 3656-3667, 2015.

AN, Qiang et al. Resource utilization of agricultural waste: Converting peanut shell into an efficient catalyst in persulfate activation for degradation of organic pollutant. **Chemosphere**, v. 304, p. 135308, 2022.

ATKINS, Pedro. **Físico-Química - Fundamentos, 6ª edição**. Rio de Janeiro: LTC, 2017

BANERJEE, Sushmita et al. Remoção do Verde Malaquita, um corante perigoso de soluções aquosas usando casca de Avena sativa (aveia) como potencial adsorvente. **Journal of Molecular Liquids**, v. 162-172, 2016.

BHATNAGAR, Amit; MINOCHA, A. K. Conventional and non-conventional adsorbents for removal of pollutants from water-A review. **Indian journal of chemical technology**, v. 13, n. 3, p. 203-217, 2006.

BOLGAR, Peter et al. **Student solutions manual to accompany Atkins' physical chemistry**. Oxford University Press, 2018.

CHERUIYOT, Gilbert K. et al. Adsorption of toxic crystal violet dye using coffee husks: Equilibrium, kinetics and thermodynamics study. **Scientific African**, v. 5, p. e00116, 2019.

COHN, P. E.. **Analisadores industriais: no processo, na área de utilidades, na supervisão da emissão de poluentes e na segurança**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2006.

CRINI, Grégorio et al. Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment. **Environmental Chemistry Letters**, v. 17, p. 195-213, 2019.

DA ROSA, Marcelo Pereira et al. Uma nova abordagem para converter resíduos de casca de arroz em um adsorvente rápido e eficiente para remover corante catiônico da água. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 6, p. 103504, 2019.

DÁVILA, Ivone Vanessa Jurado; NUNES, Keila Guerra Pacheco; FÉRIS, Liliana Amaral. Remoção do violeta cristal por adsorção utilizando carvão ativado. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação. Uberaba, MG. Vol. 4, n. 2 (jul./set. 2019), p. 146-156**, 2019.

DE ALMEIDA<sup>1</sup>, Érica Janaina Rodrigues; DILARRI<sup>1</sup>, Guilherme; CORSO<sup>1</sup>, Carlos Renato. A indústria têxtil no Brasil: Uma revisão dos seus impactos ambientais e possíveis tratamentos para os seus efluentes. **BOLETIM DAS ÁGUAS, Departamento de Bioquímica e Microbiologia, Universidade Estadual Paulista (UNESP)**, p. 1-18, 2016.

ELSHERIF, Khaled et al. Adsorção de corante violeta cristal em pó de folhas de oliveira: Estudos de equilíbrio e cinéticos. **KM Elsherif, A. El-Dali, AA Alkarewi, AM Ewlad-Ahmed e A. Treban. Adsorção de corante violeta cristal em pó de folhas de oliveira: Estudos de equilíbrio e cinéticos. Chemistry International** , v. 7, n. 2, p. 79-89, 2021.

FABRYANTY, Rizka et al. Removal of crystal violet dye by adsorption using bentonite–alginate composite. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 5, n. 6, p. 5677-5687, 2017.

FERNANDES, Lara Janaína et al. Characterization of silica produced from rice husk ash: comparison of purification and processing methods. **Materials Research**, v. 20, n. Suppl 2, p. 512-518, 2017.

GHOSH, Rakesh Kumar; REDDY, D. Damodar. Crop Residue Ashes as Adsorbents for Basic Dye (M ethylene Blue) Removal: Adsorption Kinetics and Dynamics. **CLEAN–Soil, Air, Water**, v. 42, n. 8, p. 1098-1105, 2014.

HONGO, Teruhisa et al. Adsorção simultânea de azul de metileno e neutralização de pH de água contaminada por cinza de casca de arroz. **ACS omega** , v. 6, n. 33, p. 21604-21612, 2021.

HU, Lingling; HE, Zhen; ZHANG, Shipeng. Sustainable use of rice husk ash in cement-based materials: Environmental evaluation and performance improvement. **Journal of Cleaner Production**, v. 264, p. 121744, 2020.

HWANG, Chao-Lung; HUYNH, Trong-Phuoc. Investigation into the use of unground rice husk ash to produce eco-friendly construction bricks. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 335-341, 2015.

IKENYIRI, P. N.; UKPAKA, C. P. Overview on the effect of particle size on the performance of wood based adsorbent. **Journal of Chemical Engineering & Process Technology**, v. 7, n. 5, p. 1-4, 2016.

KADHOM, Mohammed et al. Removal of dyes by agricultural waste. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 16, p. 100259, 2020.

KATH, Aline Hernandez. **Efeito residual da cinza de casca de arroz na acidez e na disponibilidade de fósforo, silício e potássio no solo**. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas.

KAUSAR, Abida et al. Adsorção de corantes usando argila e argila modificada: Uma revisão. **Journal of Molecular Liquids** , v. 256, p. 395-407, 2018.

KRISTANTI, Risky Ayu; YUNIARTO, Adhi; HADIBARATA, Tony. Adsorção de corantes básicos violeta cristal em biomassa agrícola: caracterização, isoterma e estudos cinéticos. **International Journal of Integrated Engineering**, v. 14, n. 1, p. 269-275, 2022.

L Aidani, Ykhlef et al. Studies of the biosorption of textile dye onto wheat straw. **Scientific Study & Research. Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry**, v. 20, n. 4, p. 609-625, 2019.

LAKSHMI, Uma R. et al. Cinzas de casca de arroz como um adsorvente eficaz: Avaliação das características adsorptivas para corante índigo carmim. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 2, p. 710-720, 2009.

LIU, Xinyu et al. A review on recent advances in the comprehensive application of rice husk ash. **Research on Chemical Intermediates**, v. 42, p. 893-913, 2016.

LOULIDI, Ilyasse et al. Adsorção de cristal violeta em um resíduo agrícola: cinética, isoterma, termodinâmica e mecanismo de adsorção. **The Scientific World Journal**, v. 2020, n. 1, p. 5873521, 2020.

MALIK, Abdul et al. A comparative study of the adsorption of congo red dye on rice husk, rice husk char and chemically modified rice husk char from aqueous media. **Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia**, v. 34, n. 1, p. 41-54, 2020.

MARQUES, Carine Ferreira; DA CONCEIÇÃO, Vinicius Masquetti. Alternativas tecnológicas de tratamento de efluentes têxteis: Uma revisão bibliométrica. **Revista Internacional de Ciências**, v. 12, n. 3, p. 194-212, 2022.

MATOS, Simone Pires de. **Operações Unitárias - Fundamentos, Transformações e Aplicações dos Fenômenos Físicos e Químicos**. Rio de Janeiro: Érica, 2015.

MCCABE, Warren L.; SMITH, Julian C.; HARRIOTT, Peter. **Unit operations of chemical engineering**. McGraw-hill, 1993.

MO, Jiahao et al. A review on agro-industrial waste (AIW) derived adsorbents for water and wastewater treatment. **Journal of environmental management**, v. 227, p. 395-405, 2018.

MOK, Chun Fah et al. Adsorption of dyes using poly (vinyl alcohol)(PVA) and PVA-based polymer composite adsorbents: a review. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 28, p. 775-793, 2020.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 7ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2021. E-book. p.Capa. ISBN 9788521637448. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521637448/>.

MOREIRA, S. A. Adsorção de íons metálicos de efluente aquoso usando bagaço do pedúnculo de caju: estudo de batelada e coluna de leito fixo. 2008. 151 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do et al. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. 2020.

NGAINI, Zainab et al. Convenient conversion of palm fatty acid distillate to biodiesel via rice husk ash catalyst. **BioEnergy Research**, p. 1-11, 2022.

OKE, Ninad; MOHAN, S. Development of nanoporous textile sludge based adsorbent for the dye removal from industrial textile effluent. **Journal of Hazardous Materials**, v. 422, p. 126864, 2022.

PAVIA, Donald L.; LAMPMAN, Gary M.; KRIZ, George S.; VYVYAN, James R. **Introdução à espectroscopia**. 2ª edição. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2016. *E-book*. pág.17. ISBN 9788522123391. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788522123391/>.

PIZATO, Everton et al. Caracterização de efluente têxtil e avaliação da capacidade de remoção de cor utilizando o fungo *Lasiodiplodia theobromae* MMPI. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, p. 1027-1035, 2017.

QUANSAH, Jude Ofei et al. Nascent rice husk as an adsorbent for removing cationic dyes from textile wastewater. **Applied Sciences**, v. 10, n. 10, p. 3437, 2020.

SAHA, Niladri et al. Comparative experimental and mathematical analysis on removal of dye using raw rice husk, rice husk charcoal and activated rice husk charcoal: batch, fixed-bed column, and mathematical modeling. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-18, 2021.

SCHMITZ, Thaís. Síntese hidrotérmica de zeólitas sem direcionadores orgânicos de estrutura a partir de cinza de casca de arroz sem pré-tratamento. 2019.

SILVA, Ariane Torquato. Influência da temperatura na adsorção do corante azul de metileno utilizando serragem de *Pinus elliottii* como um adsorvente alternativo: um modelo para o tratamento de efluentes têxteis. **Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis**, 2005.

SULTANA, Sharmin et al. Adsorção de corante violeta cristal por pó de casca de coco: perspectivas de isoterma, cinética e termodinâmica. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 17, p. 100651, 2022.

SUN, Weikai; OU, Hongxiang; CHEN, Ziwei. Study on preparation of chitosan/polyvinyl alcohol aerogel with graphene- intercalated attapulgite (GO- ATP@ CS- PVA) and adsorption properties of crystal violet dye. **Nanomaterials**, v. 12, n. 22, p. 3931, 2022.

TASHIMA, Mauro Mitsuchi et al. High reactive rice husk ash (RHA): production method and pozzolanic reactivity. **Ambiente Construído**, v. 12, p. 151-163, 2012.

TRIPATHI, Nishant; SAPRA, Amit. Gram staining. 2020.

VAZ JUNIOR, Silvio. Aproveitamento de resíduos agroindustriais: uma abordagem sustentável. 2020.

YASIN, Farkhanda et al. Adsorção de corante violeta cristal tóxico usando casca de arroz: estudo de equilíbrio, cinético e termodinâmico. **Dessalinização e Tratamento de Água**, v. 227, p. 338-349, 2021.

ZANONI, Maria V. Boldrin; YAMANAKA, Hideko. Caracterização química, toxicológica, métodos de detecção e tratamento. 2016.

ZHOU, Lu et al. Adsorption removal of cationic dyes from aqueous solutions using ceramic adsorbents prepared from industrial waste coal gangue. **Journal of environmental management**, v. 234, p. 245-252, 2019.

ZOMER, Milena Laurindo et al. UTILIZAÇÃO DO BAGAÇO DE LARANJA E DA CINZA DA CASCA DE ARROZ COMO ADSORVENTES DE EFLUENTE TÊXTIL. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 14, n. 1, 2022.