



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS**

**CAMPUS PALMAS**

**CURSO SUPERIOR BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL**

**HENRIQUE PABLO LACERDA RÊGO**

**ADSORÇÃO DO VERMELHO CONGO NO CARVÃO A BASE DA CASCA DA CASTANHA  
DE CAJU (*Anacardium occidentale L.*)**

**PALMAS – TO**

**2023**

**HENRIQUE PABLO LACERDA RÊGO**

**ADSORÇÃO DO VERMELHO CONGO NO CARVÃO A BASE DA CASCA DA CASTANHA  
DE CAJU (*Anacardium occidentale L.*)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia  
Civil da Unidade Palmas, do Instituto Federal do  
Tocantins, como exigência à obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

---

- R343a Rêgo, Henrique Pablo Lacerda  
ADSORÇÃO DO VERMELHO CONGO NO CARVÃO A BASE DA  
CASCA DA CASTANHA DE CAJU (*Anacardium occidentale L.*) /  
Henrique Pablo Lacerda Rêgo. – Palmas, TO, 2023.  
45 p. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) –  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus  
Palmas, Palmas, TO, 2023.
- Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza
1. Adsorção do Corante Vermelho do Congo. 2. Absorbância do Carvão  
da Castanha de Caju. 3. Eficiência de Remoção do Corante Vermelho do  
Congo com Carvão de Casca de Castanha de Caju. I. Pedroza, Marcelo  
Mendes. II. Título.

**CDD 624**

---

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e  
pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a)  
autor(a).

**ADSORÇÃO DO VERMELHO CONGO NO CARVÃO A BASE DA CASCA DA CASTANHA DE CAJU (*Anacardium occidentale L.*)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil da Unidade Palmas, do Instituto Federal do Tocantins, como exigência à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em : 09/10/2023

**BANCA EXAMINADORA**



---

Dr. Marcelo Mendes Pedroza  
Orientador e Presidente da Banca  
Instituto Federal do Tocantins



---

Prof. MSc Ranyere do Nascimento Lôbo  
Instituto Federal do Tocantins



---

Prof. Dra. Elaine da Cunha Silva Paz  
Instituto Federal do Tocantins

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades. Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional. Ao professor Dr. Marcelo Mendes Pedroza, pela orientação acadêmica, apoio e confiança.

“Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo para todo propósito debaixo do céu”.

Eclesiastes 3:1

## RESUMO

RÊGO, Henrique Pablo Lacerda. **Adsorção do vermelho congo no carvão a base de castanha de caju (*Anacardium occidentale L.*)** 2023. 26p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2023.

Este trabalho objetivou o estudo e estimativas de parâmetros estatísticos do tratamento de efluentes com presença de corante vermelho congo a partir do processo de adsorção, tal método se baseia retenção de substâncias na superfície do carvão ativado, produzido pelo processo de pirólise da biomassa da casca da castanha de caju. O experimento de adsorção foi realizado em regime de batelada, em mesa de agitação Shaker TE 141, com volume padrão de 30 mL de solução, com planejamento experimental do tipo Delineamento de Faces Centradas, para se verificar os efeitos da massa de carvão e concentração da solução do corante no processo de adsorção. Durante o teste de adsorção de corante vermelho congo, foi possível observar que para a obtenção de maior eficiência se faz necessário a aplicação de massa elevada de carvão ativado e baixa concentração de corante, com melhor resultado nas respostas de absorbância do filtrado e capacidade de adsorção apresentado na aplicação de baixa quantidade de massa e alta concentração de corante.

**Palavras-chave:** Castanha de caju, Corante, Processo de Pirólise, Adsorção.

## ABSTRACT

RÊGO, Henrique Pablo Lacerda. **Congo red adsorption on cashew nut-based charcoal** (*Anacardium occidentale L.*) 2023. 26p. Completion of course work - Bachelor of Civil Engineering - Federal Institute of Education, Science and Technology of Tocantins. Palms, 2023.

This work aims to study and estimate statistical parameters for the treatment of effluents with the presence of Congo red dye from the adsorption process. This method is based on the retention of substance on the surface of activated carbon, produced by the biomass pyrolysis process. from the shell of the Brazil nut. The adsorption experiment was carried out in batch mode, on a Shaker TE 141 improvement table, with a standard volume of 30 mL of solution, with experimental planning of the Centered Face Design type, to verify the effects of coal mass and concentration of dye solution without adsorption process. During the Congo red dye adsorption test, it was possible to observe that to obtain greater efficiency it is necessary to apply a high mass of activated carbon and low concentration of dye, with better results in the filtrate absorption responses and adsorption capacity presented. when applying a low amount of mass and high concentration of dye.

**Key-words:** Cashew Nut, Dye, Pyrolysis Process, Adsorption.



## **LISTA DE QUADROS**

<b>Quadro 1:</b> Usos comuns do carvão ativado nas diversas linhas comerciais .....	21
<b>Quadro 2:</b> Comparação Entre Adsorção Física e Adsorção Química.....	22

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Estrutura da castanha de caju.....	18
<b>Figura 2:</b> Cadeia de produtos derivados do caju .....	18
<b>Figura 3:</b> Produtores mundiais de castanha de caju .....	19
<b>Figura 4:</b> Estrutura Química Do Corante Vermelho de Congo. ....	23
<b>Figura 5:</b> Etapas de desenvolvimento pratico do trabalho.....	23
<b>Figura 6:</b> Amostra de carvão ativado obtido da biomassa de <i>Anacardium occidentale L.</i> .....	24
<b>Figura 7:</b> Estufa a ser utilizada para secagem da amostra. ....	24
<b>Figura 8:</b> Agitação das soluções de Vermelho de Congo com os carvões (Shaker TE 141).....	27
<b>Figura 9:</b> Corante Vermelho de Congo para padronização dos 11 ensaios. ....	28
<b>Figura 10:</b> Procedimento de filtragem do vermelho de congo em papel analítico .....	28
<b>Figura 11:</b> Leitura das absorbâncias espectrofotômetro, a 500 nm .....	29
<b>Figura 12:</b> Curva de Calibração. ....	29
<b>Figura 13:</b> Representação do planejamento experimental utilizado no processo de adsorção de vermelho de congo (Delineamento composto central rotacional) .....	29
<b>Figura 14:</b> Representação do Diagrama de Pareto obtido a partir do Delineamento de Faces Centradas (DFC) na remoção de corante através de adsorção por agitação orbital horizontal.....	33
<b>Figura 15:</b> Valores observados versus valores previstos, para a remoção de vermelho de congo. ....	35
<b>Figura 16:</b> Superfície de resposta para a adsorção de corante, com os fatores quantidade de carvão ativado e concentração do vermelho de congo.....	36
<b>Figura 17:</b> Representação do Diagrama de Pareto obtido a partir do Delineamento de Faces Centradas (DFC) da adsorção por agitação orbital horizontal.....	38
<b>Figura 18:</b> Valores observados versus valores previstos, para a adsorção de vermelho de congo. ....	38
<b>Figura 19:</b> Superfície para capacidade máxima de adsorção em relação à massa de carvão e concentração de corante. ....	39
<b>Figura 20:</b> Representação do Diagrama de Pareto obtido a partir do Delineamento de Faces Centradas (DFC) da adsorção por agitação orbital horizontal.....	41
<b>Figura 21:</b> Valores observados versus valores previstos, para a eficiência de remoção do vermelho de congo.....	42
<b>Figura 22:</b> Superfície para capacidade máxima de adsorção em relação à massa de carvão e concentração de corante. ....	42

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Principais estados produtores de castanha de caju no Brasil, safra 2022. ....	19
<b>Tabela 2:</b> Níveis dos Fatores empregados no Planejamento Experimental, durante a adsorção do corante vermelho de congo .....	30
<b>Tabela 3:</b> Ordem dos experimentos empregados no planejamento fatorial DCCR .....	30
<b>Tabela 4:</b> Resultados obtidos por meio da Análise Imediata da casca de castanha de caju.....	31
<b>Tabela 5:</b> Resultados dos valores da absorbância obtidos através do ensaio de remoção de corante através de adsorção por agitação orbital horizontal.....	32
<b>Tabela 6:</b> Coeficientes de Regressão do Planejamento DFC 2 <sup>2</sup> obtidos da remoção de corante, em intervalo de 95% de confiança .....	34
<b>Tabela 7:</b> ANOVA para a absorção de corante vermelho de congo através de adsorção por agitação orbital horizontal .....	35
<b>Tabela 8:</b> Coeficientes de Regressão do Planejamento DFC 2 <sup>2</sup> obtidos da remoção de corante, em intervalo de 95% de confiança .....	37
<b>Tabela 9:</b> ANOVA para a absorção de corante vermelho de congo através de adsorção por agitação orbital horizontal .....	38
<b>Tabela 10:</b> Coeficientes de Regressão do Planejamento DFC 2 <sup>2</sup> obtidos da eficiência de remoção, em intervalo de 95% de confiança .....	40
<b>Tabela 11:</b> ANOVA para a absorção de corante vermelho de congo através de adsorção por agitação orbital horizontal .....	41

## LISTA DE SIGLAS

ACC	Amêndoas de Castanha de Caju
CCC	Carvão da Castanha de Caju
CA	Carvão Ativado
CF	Carbono Fixo
CH <sub>4</sub>	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
H <sup>2</sup>	Hidrogênio
H <sub>2</sub> O	Água
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Ácido Fosfórico
KOH	Hidróxido de Potássio
LCC	Líquido da casca da castanha de caju
PC	Poder Calorífico
PCI	Poder Calorífico Inferior
pH	Potencial Hidrogeniônico
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 Problema De Pesquisa .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2 Justificativa.....</b>	<b>14</b>
<b>1.3 Objetivos.....</b>	<b>15</b>
1.3.1 Objetivo Geral.....	15
1.3.2 Objetivos Específicos.....	15
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>15</b>
2.1 Biomassa.....	15
2.2 Resíduos Agrícolas.....	16
2.3 Cajueiro ( <i>Anacardium occidentale L</i> ).....	16
2.4 Pirólise de Biomassa.....	18
2.5 Carvão Ativado.....	19
2.6 Tipos de Adsorção.....	20
2.6.1 Corantes: Vermelho de Congo.....	21
<b>3 PROCEDIMENTO METODOLOGICO.....</b>	<b>22</b>
<b>3.1 Tipo de Pesquisa.....</b>	<b>22</b>
<b>3.2 Coleta e Preparo do Material .....</b>	<b>23</b>
3.2.1 Caracterização do carvão.....	23
3.2.1.1 Densidade Aparente.....	24
3.2.1.2 Umidade.....	24
3.2.1.3 Material Vólátil.....	24
3.2.1.4 Teor de Cinzas.....	25
3.2.1.5 Teor de Carbono Fixo.....	25
3.2.1.6 Teste de Adsorção.....	26
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>29</b>
4.1 Caracterização do Carvão.....	30
4.2 Teste de Adsorção do Vermelho de Congo.....	30
4.3 Razão de adsorção.....	35
4.4 Eficiência de remoção do vermelho de congo.....	39
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>43</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os efluentes industriais causam sérios prejuízos ao meio ambiente, em especial aos corpos aquáticos receptores. Os efluentes descartados pelas indústrias têxteis se caracterizam por apresentar alta carga de compostos químicos orgânicos, sendo os corantes, os principais resíduos desses efluentes, sendo estes compostos de difícil degradação e altamente tóxicos para o meio ambiente.

O elevado desenvolvimento populacional humano e suas atividades de gerenciamento para suprir com as necessidades dos mesmos, vem crescendo. Cada dia busca-se por mais alternativas sustentáveis de reaproveitamento na tentativa de manter o equilíbrio natureza – humano, dentre essas alternativas os carvões ativados a base de biomassa têm ganhado destaque e tornando-se cada dia mais populares. A biomassa é definida por Souza, et al., (2002), como todo material orgânico de origem vegetal. Os autores relatam que ela e deriva da reação entre  $\text{CO}_2$  -  $\text{H}_2\text{O}$  e luz solar, ou seja, pelo processo de fotossíntese, qual armazena fração de energia solar nas ligações químicas de seus componentes.

O carvão ativado é um sólido poroso amplamente utilizado como adsorvente em processos de tratamento de efluentes industriais. Sua aplicação na adsorção se deve a esta operação ser muito eficiente para a retirada de substancias da fase líquida, como é o caso dos corantes presentes nos efluentes têxteis.

As matérias-primas utilizadas para obtenção do carvão ativado são quase exclusivamente de origem vegetal e possuem alto poder de carbono, tais como: (a) Casca de coco, (b) Carvão mineral (antracito, betuminoso e lignito), c) Madeira de alta e baixa densidade (pinus, acácia etc), (d) Ossos de animais, (e) Resíduos agroindustriais, f) Carços de azeitona, noz, pêssigo, entre outros. As características do carvão ativado dependem da matéria-prima usada, as condições de ativação e a natureza dos agentes ativantes. Com isso, cada processo terá propriedades de adsorção diferentes e usos diversificados. Estudos indicam que madeiras maiores, resinosas, na forma de serragem e cascas de coco, podem fornecer carvões de ótimas propriedades descorantes e devem ser ativados por processos químicos. No Brasil, as matérias-primas mais utilizadas para a produção de carvão ativado são cascas de coco, madeiras de pinus e acácias, ossos de animais, os quais são utilizados para a fabricação de um tipo específico de carvão ativado.

O cajueiro (*Anacardium occidentale L*) pertencente à família Anacardiaceae, é uma árvore de aparência exótica, troncos tortuosos, folhas glabras, flores masculinas e hermafroditas e fruto reniforme. É uma planta nativa do Brasil, encontrada pelos colonizadores em todo o litoral Nordeste e, posteriormente, na região amazônica. Devido às características edafoclimáticas apresentadas pela região Nordeste aliada ao aspecto vigoroso das plantas, o cultivo do cajueiro se tornou uma das mais importantes atividades agrícolas do Nordeste Brasileiro (MAZZETTO, et al., 2009; EMBRAPA, 2018). De acordo com dados do Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste (ETENE), no ano de 2022 a produção brasileira de castanha de caju representou 2,7 %

da produção mundial, fazendo com que o Brasil de encontre na 12<sup>o</sup> posição, segundo o IBGE que a produção nacional em 2022 foi de 146.603 toneladas.

Maia (2020) realizou o aproveitamento de casca de castanho de caju através do processo de pirólise para a produção de carvão ativado e usou o material adsorvente na retirada de poluentes presentes em águas cinzas. Os resultados obtidos na pesquisa indicam uma boa eficiência do material na adsorção de compostos orgânicos causadores de cheiro nesse tipo de efluente.

No presente estudo será proposto o uso do carvão vegetal a base da casca da castanha de caju, como alternativa para diminuir o descarte da biomassa e sua utilização para a adsorção do corante vermelho de congo no meio ambiente.

### **1.1 Problema de Pesquisa**

Considera-se que a situação do Brasil em termos de produção de biomassa é positiva, pois há uma diversidade de subprodutos e resíduos agroindustriais originários de frutos das regiões, como o bagaço da cana-de-açúcar, castanha e caju, coco verde e outras frutas. Essa variedade de biomassa permite adotar fontes renováveis de energia, em substituição as fontes não renováveis. No processo de beneficiamento do fruto, a casca de castanha caju se destaca pela grande quantidade gerada. Uma parcela deste resíduo é reaproveitada em fábricas e mini fábricas beneficiadoras e a outra parte tem como grande problema a sua disposição final, pois uma quantidade considerável ainda vai para os aterros sanitários (Maia, et al., 2021).

A casca da castanha de caju apresenta propriedades lignocelulósica, capaz de ser empregada como fonte de energia através do processo de pirólise, que também resulta em subprodutos que podem ser utilizados como matéria-prima para a conversão em carvão ativado (Maia, et al., 2021).

Tendo apresentadas as vertentes acima, nota-se que uma alternativa sustentável a qual proporcionaria uma maior agregação de valores para o descarte da casca da castanha de caju seria a produção de carvão ativado por meio do processo de pirólise, de tal forma a utiliza-lo no teste de adsorção do corante vermelho congo, para redução da concentração de resíduos presentes em efluente sintético.

### **1.2 Justificativa**

Os corantes sintéticos são compostos orgânicos extensivamente usados em diversas áreas dentre as quais podemos destacar a indústria têxtil, farmacêuticas, de cosméticos, de plásticos, de couros, fotográficas, automobilísticas, de papel e alimentícia. Estima-se que mundialmente sejam produzidos milhões de toneladas de corantes, refletindo um mercado próspero que movimenta cerca de US\$ 7,7 bilhões/ano, sem considerar a produção de pigmentos, cerca de meia tonelada dessa classe de compostos é lançada diariamente no ambiente. Dada sua estrutura complexa e a diversificação da matriz durante o processo de tintura, muitos desses resíduos não são devidamente tratados pelos processos convencionais, o que pode provocar

sérias contaminações ambiental com graves riscos é flora e a fauna. Uma forma de tratamento de efluentes a base de corantes químicos é a utilização de carvão ativado para a adsorção de tais componentes químicos. Dito isso, surge a problemática dessa pesquisa: Qual o desempenho do carvão ativado produzido a partir da degradação térmica de casca de castanha de caju na remoção de corantes químicos em processo de adsorção?

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

Utilizar o carvão ativado obtido durante a degradação térmica da casca da castanha de caju em processo de adsorção do corante vermelho de congo em efluente sintético.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar as características do carvão ativado empregado nessa pesquisa;
- Determinar a eficiência de remoção do corante durante os testes de adsorção;
- Apresentar o modelo estatístico obtido durante a adsorção do corante vermelho de congo no carvão ativado da casca de castanha de caju.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Biomassa**

Definida como todo material orgânico de origem vegetal. A biomassa deriva da reação entre  $\text{CO}_2$  -  $\text{H}_2\text{O}$  e luz solar, ou seja, pelo processo de fotossíntese, qual armazena fração de energia solar nas ligações químicas de seus componentes (SOUZA et al., 2002). Quando os laços adjacentes entre moléculas de carbono, hidrogênio e oxigênio são quebrados por combustão, digestão, ou decomposição, estas substâncias liberam sua energia química armazenada. A utilização da biomassa como matéria prima de conversão depende das propriedades químicas e físicas das moléculas (MCKENDRY, 2002).

De acordo com McKendry (2002), um dos motivos pelos quais a biomassa tem acendido cada vez mais nos últimos anos, se dá os avanços da tecnologia relativa à conversão da biomassa, que se aparenta hoje de baixo custo e maior eficiência em sua conversão, diferentemente dos anos anteriores. O autor traz como segundo motivo a expansão do setor agrícola o qual estar produzindo cada vez mais quantidades excedentes de alimentos e, conseqüentemente seus rejeitos. O terceiro motivo trata-se da mudança climática, devido aos níveis elevados de emissões de gases com efeito de estufa ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , entre outros), o qual tornou-se um grande estímulo às energias renováveis em geral.

Werther et al., (2000) apontam que tanto em escala mundial como no Brasil, o potencial energético da biomassa é enorme, podendo se tornar uma das soluções para o fornecimento de



eletricidade em comunidades isoladas, incentivando o desenvolvimento de atividades extrativistas sustentáveis que contribuam para o desenvolvimento destas comunidades.

## 2.2 Resíduos Agrícolas

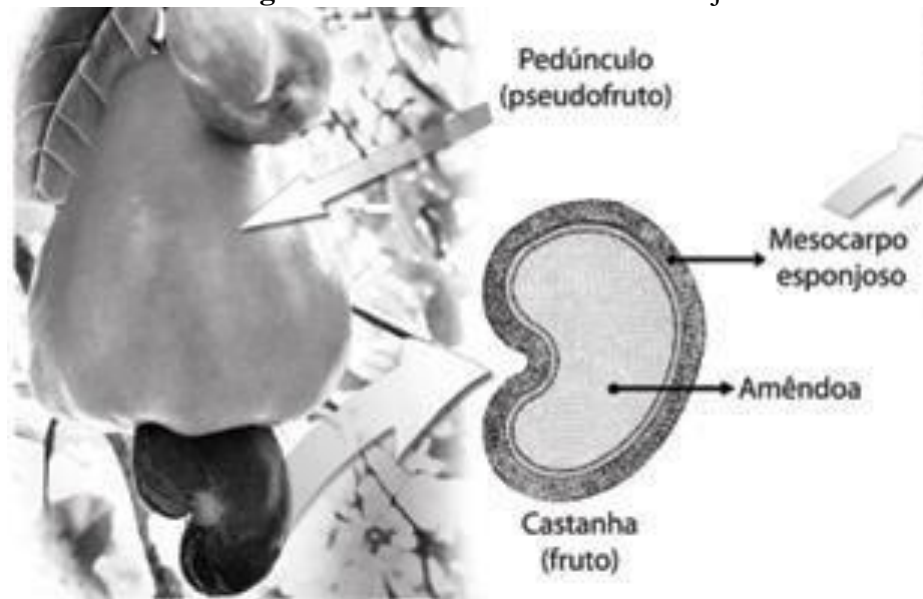
Segundo a Norma Brasileira 10.004 resíduos são aqueles que:

“(…) resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos que resultam da atividade da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Considera-se também, resíduo sólido os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornam inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d’água, ou exijam, para isso, soluções técnicas e economicamente inviáveis, em face à melhor tecnologia disponível” (ABNT,1987).

## 2.3 Cajueiro (*Anacardium occidentale L*)

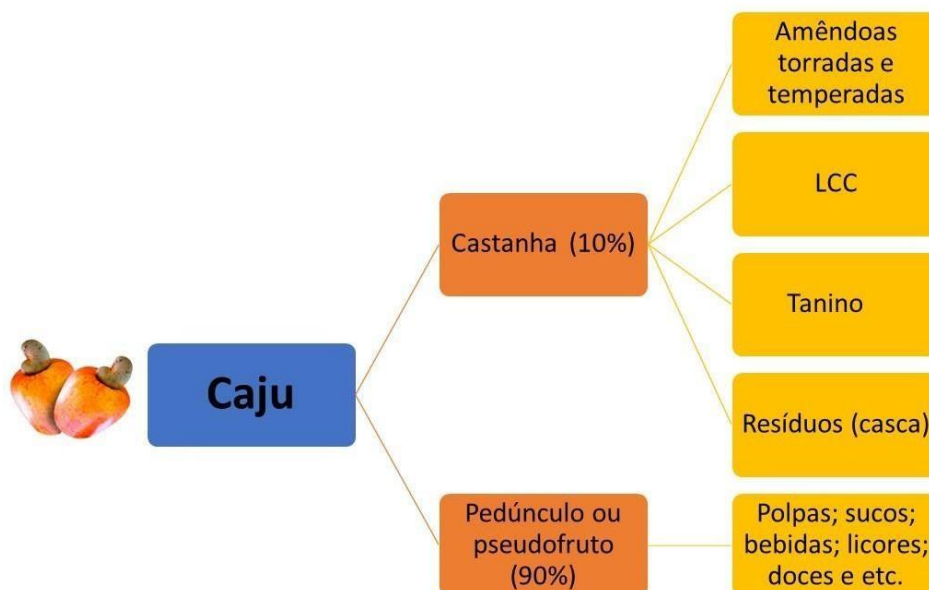
O cajueiro (*Anacardium occidentale L*) pertencente à família Anacardiaceae, é uma árvore de aparência exótica, troncos tortuosos, folhas glabras, flores masculinas e hermafroditas e fruto reniforme. Seu pedúnculo superdesenvolvido e muito apreciado pela suculência é frequentemente confundido com o fruto, quando na verdade se trata do pseudofruto, cientificamente denominado de pedúnculo floral, com coloração variante entre o amarelo e o vermelho, o seu fruto é conhecido popularmente como castanha de caju (Mazzetto, et al., 2009).

É uma planta nativa do Brasil, encontrada pelos colonizadores em todo o litoral Nordestino e, posteriormente, na região amazônica. Devido às características edafoclimáticas apresentadas pela região Nordeste aliada ao aspecto vigoroso das plantas, o cultivo do cajueiro se tornou uma das mais importantes atividades agrícolas do Nordeste Brasileiro. O principal produto explorado do cajueiro é o fruto (a castanha, Figura 1), uma noz que possui no seu interior a amêndoa (ACC), produto comercializado e consumido em vários países do mundo.

**Figura 1:** Estrutura da castanha de caju

**Fonte:** Adaptada, (Mazzetto, et al., 2009).

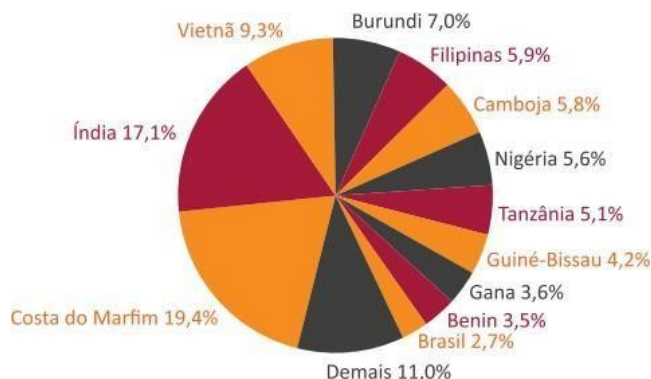
Da castanha ainda pode se aproveitar a casca (cerca de 70% do peso da castanha) que é utilizada para extração do líquido da casca de castanha de caju (LCC), que corresponde a cerca de 25% do peso da casca da castanha. (EMBRAPA, 2018). A cadeia de produtos derivados do caju pode encontra-se exposta na Figura 2.

**Figura 2:** Cadeia de produtos derivados do caju

**Fonte:** Autor, (2023)

De acordo com dados do Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste (ETENE), no ano de 2022 a produção brasileira de castanha de caju representou 2,7 % da produção mundial, fazendo com que o Brasil de encontre na 12º posição, sendo a Costa do Marfim (19,4%) o primeiro em produção de castanha de caju, seguido de Índia (17,1%) e Vietnã (9,3%) da produção mundial, Figura 3 (ETENE, 2022).

**Figura 3:** Produtores mundiais de castanha de caju



**Fonte:** (ETENE, 2022).

No que desrespeito a produção nacional de castanha de caju o Instituto de Geografia e Estatística (IBGE) revelam que a produção nacional em 2022 foi de 146.603 toneladas. O número é maior que o registrado na safra passada (2021), em que foram produzidas 110.570 toneladas do fruto, ou seja, um aumento de 33% em um ano. Este é o melhor resultado para o setor desde 2018. Os do instituto ainda destacam, Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte como os três estados produtores de castanha do caju, suas respectivas produções podemos ser vistas na Tabela 1 (EMBRAPA, 2023).

**Tabela 1:** Principais estados produtores de castanha de caju no Brasil, safra 2022.

<b>Castanha de Caju, safra 2022</b>			
	<b>Ceará</b>	<b>Piauí</b>	<b>Rio Grande do Norte</b>
<b>Área plantada (ha)</b>	272.294	77.448	48.396
<b>Área colhida (há)</b>	272.288	73.047	48.378
<b>Produção (mil t)</b>	95.758	21.674	18.169
<b>Rendimento (Kg/ha)</b>	354	296	376

**Fonte:** Autor com dados de (EMBRAPA, 2023).

## 2.4 Pirólise de Biomassa

O termo pirólise (do grego: pur = fogo; luo = soltar) designa a decomposição térmica de materiais na ausência de oxigênio. Também são usados no mesmo sentido os termos termólise e craqueamento térmico. A técnica de pirólise é utilizada há muito na produção industrial de carvão vegetal a partir da madeira e mais recentemente na transformação de carvão mineral em coque para utilização na indústria metalúrgica (PARADELA, 2012).

Segundo Pedroza (2011), a pirólise é uma tecnologia que ocorre através de um processo termoquímico que tem como objetivo a obtenção de produtos com elevada densidade energética, resultando em produtos líquidos (bio-óleo), sólidos (carvão) e a uma fração gasosa, onde ambos podem ser empregados no abastecimento energético do próprio processo ou serem comercializados. Tais potenciais tornam esses produtos capazes de atuação em diversas áreas.

A pirólise aplicada à matéria orgânica (i.e., composta principalmente por hidrocarbonetos) promove o “cracking” (quebra) das moléculas mais pesadas e a sua conversão noutras de massa molecular mais baixa. São normalmente usadas temperaturas moderadas e pressões não muito superiores à pressão atmosférica. Atualmente o principal objetivo da pirólise é a obtenção de hidrocarbonetos líquidos que possam ser usados como combustíveis ou como matéria-prima para certas indústrias (PARADELA, 2012).

## **2.5 Carvão Ativado**

O carvão já era descrito por diversos povos da antiguidade, como egípcios e gregos e seus efeitos no combate à intoxicação e também eram conhecidos pelos índios americanos. No Século XIX, apareceram os primeiros relatos de experimentações em público, demonstrando a sua capacidade na neutralização de venenos potencialmente letais. O carvão ativado (CA) é um material de carbono com uma porosidade bastante desenvolvida, com capacidade de coletar seletivamente gases, líquidos ou impurezas no interior dos seus poros, apresentando, portanto, um excelente poder de clarificação, desodorização e purificação de líquidos ou gases (FREITAS., et al, 2014).

No Quadro 1 seguem os usos mais comuns do carvão ativado nas diversas linhas comerciais.

**Quadro 1:** Usos comuns do carvão ativado nas diversas linhas comerciais

Resíduos Industriais	O CA é utilizado para a reciclagem de águas industriais, promovendo a remoção de substâncias orgânicas, redução de espuma, proporcionando melhoras ao resíduo final.
Tratamento de Água	O CA proporciona a eliminação de cor, odor, mal gosto e remoção de substâncias orgânicas e fenólicas através da adsorção para fins industriais e potáveis.
Tratamento de Ar	O CA possui capacidade de remover os contaminantes do ar, adsorvendo substâncias indesejáveis contidas, purificando-o.
Indústria Farmacêutica	O CA é um excelente medicamento para o tratamento de desintoxicação, purificação de substâncias, remoção de cor e impurezas de vitaminas, analgésicos, enzimas, penicilina e soluções intravenosas.
Adsorção de gases	O CA é utilizado para a recuperação de solventes nas indústrias de adesivos, tintas, têxtil, impressão ou purificação de gás.
Indústria Química	O CA é utilizado para a purificação de produtos, remoção de cores residuais, contaminantes, odores, remoção de orgânicos, desodorização e descoloração de produtos químicos.
Tratamento de Efluentes	O CA é usualmente mais utilizado na fase final de processo biológico em colunas de leito fixo, na fase de polimento e na remoção de cor ou componentes específicos.
Industria Alimentícia	O CA desempenha o papel de adsorver as moléculas de podem causar cor, gosto e odores indesejáveis nos alimentos.

**Fonte:** Autor (2023).

## 2.6 Tipos de Adsorção

A adsorção é uma operação de transferência de massa do tipo sólido – fluido na qual se explora a habilidade de certos sólidos em concentrar na sua superfície determinadas substâncias existentes em soluções líquidas ou gasosas, o que permite separá-las dos demais componentes dessas soluções (SCHNEIDER E. L., 2008).

Dependendo da natureza das forças envolvidas, a adsorção pode ser classificada quanto a sua intensidade em dois tipos: adsorção física e adsorção química. No caso de adsorção física, a ligação do adsorvato à superfície do adsorvente envolve uma interação relativamente fraca que pode ser atribuída às forças de Van der Waalls, que são similares às forças de coesão molecular. Diferentemente, a quimissorção, a qual envolve a troca ou partilha de elétrons entre as moléculas do adsorvato e a superfície do adsorvente, resultando em uma reação química (NASCIMENTO, et al., 2014).

Segundo Nascimento, et al., (2014), a adsorção química é altamente específica e nem todas as superfícies sólidas possuem sítio ativos capazes de adsorver quimicamente o adsorvato. Deve-se ressaltar que nem todas as moléculas presentes no fluido podem ser adsorvidas quimicamente, somente aquelas capazes de se ligar ao sítio ativo. A adsorção física, diferentemente da adsorção química, é inespecífica. No Quadro 2 são apresentadas as diferenças entre a adsorção física e química.

**Quadro 2:** Comparação Entre Adsorção Física e Adsorção Química

Adsorção Química	Adsorção Física
Alto calor de adsorção	Baixo calor de adsorção
Altamente específica	Não específica
Somente monocamada	Monocamada ou multicamada
Pode envolver dissociação	Nenhuma dissociação das espécies adsorvidas
Ativada, pode ser lenta e irreversível	Rápida, não ativada, reversível
Transferência de elétrons com formação de ligações entre adsorvato e adsorvente.	Sem transferência de elétrons. Pode ocorrer polarização do adsorvato.

**Fonte:** Adaptada do texto de (NASCIMENTO, et al., 2014)

Shneider, et al., (2008) apresentam alguns exemplos de adsorção em aplicações industriais, sendo eles: a. desumidificação de gases; b. recuperação de vapores de solventes valiosos; c. branqueamento das soluções de açúcar; óleos vegetais e minerais; d. recuperação de vitaminas e de outros produtos contidos em mostos de fermentação; e. separação de gases raros; f. desodorização de esgotos, cozinhas e sanitários; g. secagem de gases; h. remoção de contaminantes em efluentes industriais; i. dentre muitas outras aplicações.

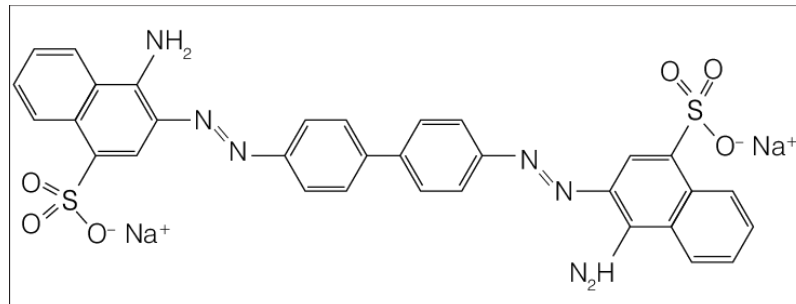
### 2.6.1 Corantes: Vermelho de Congo

O primeiro corante sintético, mauveína, foi descoberto por um químico chamado Willian Perkin em 1856. Após a descoberta foi dado o início da produção em escala industrial de índigo, através de rota sintética utilizando-se a anilina de Perkin como seu precursor (HUNGER 2003). Em sua maioria, os corantes são destinados à indústria têxtil, indústrias coureiro calçadista, papel e celulose, indústrias alimentícias, cosméticos, tintas e plásticos (GUARATINI & ZANONI 2000).

Os corantes, mesmo presentes em pequenas quantidades, são visualmente detectáveis e causam sérios problemas de natureza estética nos corpos d'água receptores. Além de problemas estéticos, a maioria dos corantes comercialmente usados é resistente à biodegradação, à fotodegradação e à ação de agentes oxidantes. Outros problemas causados comumente pelos corantes são: afetam significativamente a atividade fotossintética da vegetação em geral pela redução da penetração da luz solar; podem ser tóxicos a certas formas da vida aquática devido à presença de metais substituintes e cloreto, e alguns são carcinogênicos e mutagênicos (FUNGARO, et al., 2009).

O corante qual será testado a adsorção por meio do carvão da casca da castanha de caju é o corante aniônico vermelho de congo, cuja a formula química é  $C_{32}H_{22}N_6Na_2O_6S_2$ , estrutura na Figura 4.

**Figura 4:** Estrutura Química Do Corante Vermelho de Congo



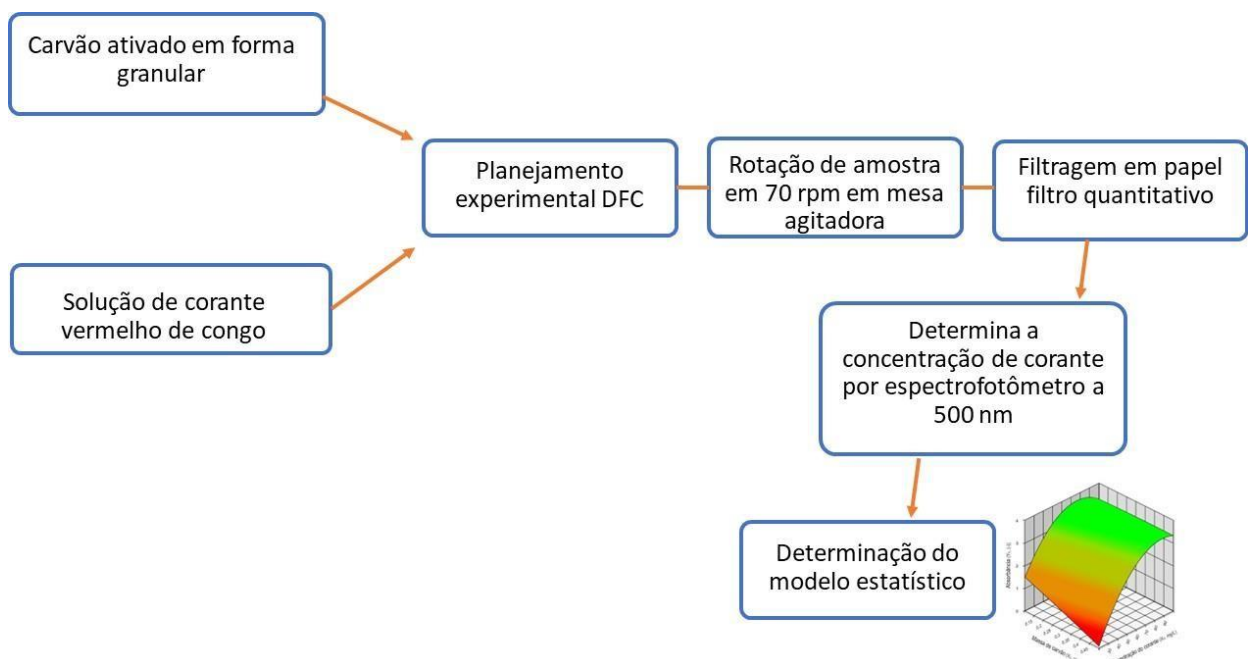
Fonte: (Kupfer, et al., 2015)

### 3 PROCEDIMENTO METODOLOGICO

#### 3.1 Tipo de Pesquisa

Foi realizado uma pesquisa do tipo experimental. A qual de acordo Tumelero, (2019) se trata de uma pesquisa relacionada com a manipulação de variáveis relacionadas com o objetivo de estudo, tendo como finalidade realizar testes de hipóteses que dizem respeito à convicção do pesquisado. A pesquisa seguiu algumas etapas, conforme está demonstrado na Figura 5.

**Figura 5:** Etapas de desenvolvimento pratico do trabalho.



Fonte: Autor, (2023).

### 3.2 Coleta e Preparo do Material

O material utilizado para o desenvolvimento do presente estudo foi o carvão ativado a base da castanha de caju. O carvão foi obtido por meio de doação pela pesquisadora Maia (2021).

#### 3.2.1. Caracterização do carvão

O carvão (Figura 6) utilizado na pesquisa foi produzido por Maia (2021), este foi submetido pela autora a pirólise em reator de leito fixo, na temperatura de 500 °C com taxa de aquecimento de 25 °C/min, usando o vapor de água como gás de arraste a uma vazão de 6 mL/min.

**Figura 6:** Amostra de carvão ativado obtido da biomassa de *Anacardium occidentale L.*



**Fonte:** Autor, (2023).

A autora analisou o carvão ativado para a obtenção dos dados referentes à umidade, teor de cinzas, material volátil, teor de carbono fixo e densidade. A amostra foi seca em estufa a 60 °C, conforme a figura 7, o mesmo foi triturado em moinho de bolas. A amostragem qual foi utilizada corresponde ao material passante na peneira de malha 16 e retido na peneira de malha 20.

**Figura 7:** Estufa que foi utilizada para secagem da amostra.



**Fonte:** Autor, (2023).



### 3.2.1.1 Densidade Aparente

Para a determinação da densidade aparente, foi acoplada a uma balança de precisão uma proveta de 100 mL, a mesma foi devidamente tarada e adicionou-se o carvão ativado previamente seco e triturado. Foram obtidas as massas (g) nas sucessivas adições dos respectivos volumes de 20, 40, 60, 80 e 100 mL. A densidade aparente foi obtida através da Equação 1:

$$\text{Densidade } \left(\frac{g}{mL}\right) = \left[\frac{m}{V(mL)}\right] \quad (\text{Equação.1})$$

### 3.2.1.2 Umidade

A determinação da umidade foi realizada de acordo com a norma ASTM D 3173-85. Foi pesada uma massa de aproximadamente 1g de carvão ativado em um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. Em seguida a amostra foi aquecida em estufa à temperatura de 105 °C durante um período de 1 hora. Posteriormente o cadinho foi colocado em dessecador por 15 minutos, logo após o recipiente foi pesado. A análise foi realizada em triplicata e o teor de umidade foi determinado de acordo com a Equação 2:

$$\text{Umidade } (\%) = \frac{(A-B)}{C} * 100 \quad (\text{Equação.2})$$

A= peso do cadinho vazio + peso da amostra

B= peso do cadinho + peso amostra pós-aquecimento na estufa — (g)

C= peso da amostra

### 3.2.1.3 Material Volátil

De acordo com método sugerido por Sanchez et al., (2009), a determinação do teor de material volátil do carvão ativado foi obtida em triplicata pesando cerca de 1g de amostra em um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. A amostra foi aquecida em um forno mufla à temperatura de 850 ° C, na ausência de oxigênio por um período de 7 minutos. O teor de material volátil foi obtido de acordo com a Equação 3:

$$\text{Material Volátil } (\%) = \left(\frac{A-B}{C}\right) * 100 \quad (\text{Equação.3})$$

A= peso do cadinho vazio + peso da amostra

B= peso do cadinho + peso amostra pós-aquecimento em forno mufla — (g)

C= peso da amostra

### 3.2.1.4 Teor de Cinzas

O teor de cinzas foi calculado segundo o método sugerido por Sanchez et al., (2009), em que uma massa de aproximadamente 1g de carvão ativado é adicionada a um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. A amostra foi calcinada a uma temperatura de 710 °C durante 60 minutos em um forno mufla da marca EDG Equipamentos, modelo W-One. Em seguida os cadinhos foram colocados em um dessecador por 1 hora para esfriar e posteriormente foram pesados. O teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma ASTM 2415-66/86 e seus resultados foram obtidos através da Equação 4:

$$\text{Cinzas (\%)} = \frac{(A-B)}{(C)} * 100 \quad (\text{Equação.4})$$

A= peso do cadinho + peso amostra após calcinação  
 B= peso do cadinho vazio  
 C= peso da amostra

} (g)

### 3.2.1.5 Teor de CF

Carbono fixo é definido como a quantidade de carbono que fica retida em determinado material quando este é aquecido sob atmosfera inerte ou sob vácuo, em condições controladas, aproximadamente a 350 °C. Nestas condições, a estrutura molecular se decompõe formando produtos de baixo peso molecular, liberando a matéria volátil (MCKENDRY, 2002).

A diferença entre a matéria seca total, a matéria volátil e a matéria mineral é o teor de carbono fixo. O teor de carbono fixo está diretamente relacionado com o poder calorífico e com a estrutura aromática do carvão ativado. A quantidade de carbono fixo é reflexo da porcentagem de lignina presente no material de partida. A determinação do mesmo também é regida pela Norma 8112.

No presente estudo para determinação do teor de carbono fixo presente na biomassa foi efetuada a diferença descrita de acordo com a Equação 5:

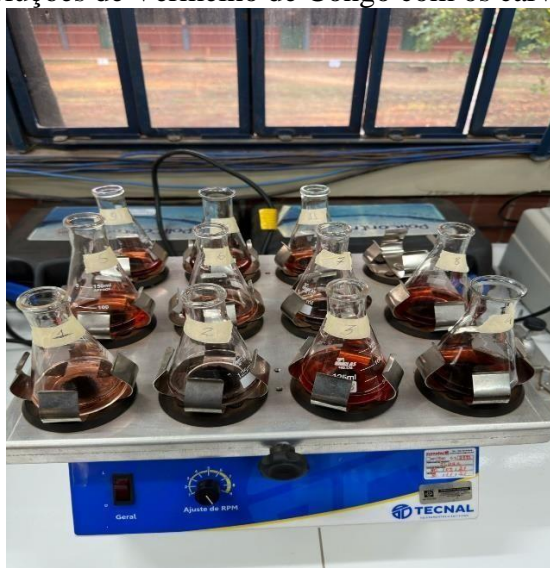
$$\text{Carbono Fixo (\%)} = 100 - [\text{Umidade(\%)} - \text{Cinzas(\%)} - \text{Material Volátil(\%)}]$$

(Equação.5)

### 3.2.1.6 Testes de adsorção

O teste de adsorção foi realizado em mesa de agitação (Shaker TE 141), Figura 8, com o carvão ativado proveniente da pirólise casca da castanha do caju na temperatura de 600 °C e taxa de aquecimento igual a 20 °C/min, na forma de pó, com granulometria de 0,45 mm. Este ensaio foi realizado no LARSEN-IFTO/Campus Palmas.

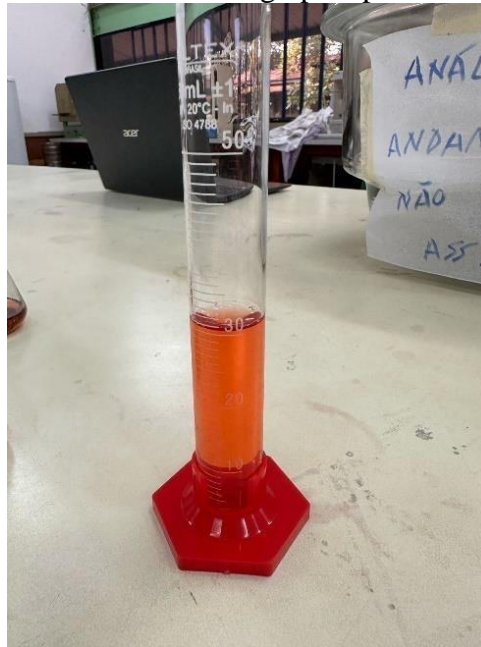
**Figura 8:** Agitação das soluções de Vermelho de Congo com os carvões (Shaker TE 141).



**Fonte:** Autor, (2023).

A solução corante (vermelho de Congo), de fórmula química  $C_{32}H_{22}N_6Na_2O_6S_2$  foi empregada nos experimentos utilizando o volume padrão de 30 mL de solução em todos os ensaios, Figura 9. Após o teste de adsorção, as amostras foram filtradas em papel analítico, Figura 10, e a concentração de corante vermelho de congo resultante foi determinada em espectrofotômetro, a 500 nm, Figura 11, com o auxílio de curva de calibração, Figura 12.

**Figura 9:** Corante Vermelho de Congo para padronização dos 11 ensaios.



**Fonte:** Autor, (2023).

**Figura 10:** Procedimento de filtragem do vermelho de congo em papel analítico.



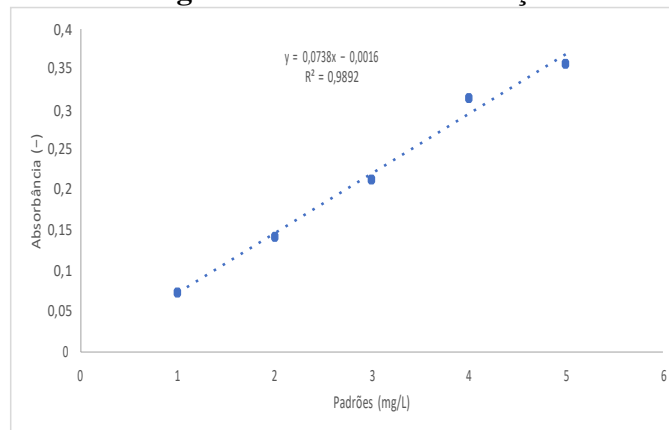
**Fonte:** Autor, (2023).

**Figura 11:** Leitura das absorvâncias espectrofotômetro, a 500 nm.



Fonte: Autor, (2023).

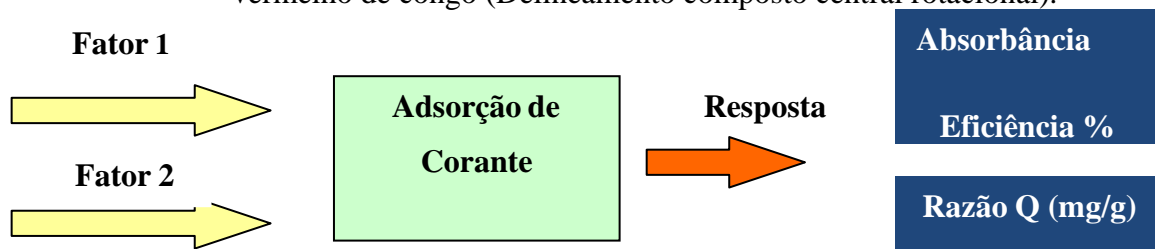
**Figura 12:** Curva de Calibração.



Fonte: Autor, (2023).

Foi aplicado no presente estudo um planejamento experimental do tipo Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), Figura 13, para se verificar os efeitos de duas variáveis independentes (massa de carvão e concentração da solução do corante) através do teste de adsorção.

**Figura 13:** Representação do planejamento experimental utilizado no processo de adsorção de vermelho de congo (Delineamento composto central rotacional).



Onde:

**Fator 1** – Massa de carvão (g) e **Fator 2** – Concentração do corante (mg/L)

A Tabela 2 mostra os níveis dos fatores empregados. O pH da solução do corante foi ajustado a 7. A agitação foi mantida igual a 70 rpm. O tempo de adsorção foi de 30 minutos.

**Tabela 2:** Níveis dos Fatores empregados no Planejamento Experimental, durante a adsorção do corante vermelho de congo

Fatores	Níveis				
	(-1,4)	(-1)	(0)	(+1)	(+1,4)
Massa de carvão (g)	0,08	0,2	0,5	0,8	0,92
Concentração do corante (mg/L)	3,4	20	60	100	117

Fonte: Autor, (2023).

Foram realizados 11 ensaios, com três repetições no ponto central, sendo 3 deles no ponto Central do Planejamento Experimental, como demonstrado tabela 3. Foram definidas três respostas para o experimento: (a) absorvância do filtrado, (b) eficiência de remoção e (c) capacidade de adsorção (Q).

**Tabela 3:** Ordem dos experimentos empregados no planejamento fatorial DCCR.

Ordem dos Experimentos	Fatores	
	Massa de carvão (g)	Concentração do corante (mg/L)
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	-1,4	0
9	0	1,4
10	1,4	0
11	0	-1,4

Fonte: Autor, (2023).

#### 4 RESULTADOS E DISCURSSÃO

O presente capítulo expõe os resultados obtidos nos ensaios realizados para a caracterização do carvão CCC ativado em forma granular a base da casca de castanha do caju, conforme a metodologia descrita no capítulo anterior. Para os ensaios de caracterização do carvão foram utilizados os dados da autora Maia, (2021), sendo eles umidade, material volátil, teor de cinza e teor de carbono, seguida da pirolise. O carvão CCC foi submetido ao teste de adsorção com vermelho de congo.

#### 4.1 Caracterização do Carvão

Na Tabela 4 são observados os resultados da caracterização do carvão obtido por Maia, (2021). Como podemos notar a autora realizou o CCC em temperatura de 500 °C/ Taxa de aquecimento 20° C/min e um segundo a temperatura 500 °C/ Taxa de aquecimento 27° C/min. Analisando a tabela podemos notar que a variação tida pelo tempo de aquecimento é pequena, tendo a variação máxima no material volátil com 4,2% entre as amostras. O carvão utilizado no presente estudo é o carvão obtido a temperatura de 500 °C/ Taxa de aquecimento 20° C/ minutos.

**Tabela 4:** Análises Imediatas e Elementares (CNH) das amostras de carvão pirolítico da biomassa CCC

Variável Analítica (%)	(Temperatura 500 °C/ Taxa de aquecimento 20° C/min)	(Temperatura 500 °C/ Taxa de aquecimento 27° C/min)
Umidade (%)	5,1	5,3
Cinzas (%)	6,4	6,6
Material Volátil (%)	31,2	27,1
Carbono Fixo (%)	57,3	61

Fonte: Adaptada de Maia, (2021).

#### 4.2 Teste de Adsorção do Vermelho de Congo

A verificação da adsorção do vermelho de congo no CCC produzido por Maia (2021), pode ser observada na Tabela 5, onde podemos observar a massa de carvão utilizada representada por X1 e a concentração do corante vermelho de congo representada por X2, qual foram utilizadas para realizar a absorvância e a eficiência final da adsorção. O delineamento dos fatores (X1 e X2), teve por finalidade observar o comportamento dos mesmos durante o processo de adsorção, averiguando os resultados experimentais que tiveram os melhores desempenhos finais. As absorvâncias dos testes foram consideradas como resposta do planejamento experimental, através delas é demonstrado a quantidade de luz que ultrapassa no recipiente ensaiado, indicando a eficiência de remoção do vermelho de congo, de tal forma foi possível avaliar que quanto menores forem os valores de absorvância maior será os índices de remoção do vermelho de congo, assim podemos afirmar que as variáveis são inversamente proporcionais.

**Tabela 5:** Resultados dos valores da absorvância obtidos através do ensaio de remoção de corante através de adsorção por agitação orbital horizontal.

Experimentos	Massa carvão (g) X1	Concentração corante (mg/L) X2	Absorvância (-)	Concentração filtrado (mg/L)	Eficiência (%)
1	(-) 0,2	(-) 25	0,358	0,379	98,48
2	(+) 0,8	(-) 25	0,185	0,206	99,17
3	(-) 0,2	(+) 75	2,461	2,482	96,68
4	(+) 0,8	(+) 75	1,952	1,973	97,36
5	(0) 0,2	(0) 50	1,097	1,118	97,76
6	(0) 0,8	(0) 50	0,375	0,396	99,20
7	(0) 0,5	(0) 25	0,307	0,328	98,68
8	(-1,4)0,5	(0) 75	2,424	2,445	96,73
9	(0) 0,5	(1,4) 50	0,833	0,854	98,29
10	(1,4) 0,5	(0) 50	0,815	0,836	98,32
11	(0) 0,5	(-1,4) 50	0,798	0,819	98,36

Fonte: Autor, (2023).

Analisando a Tabela 5, pode-se observar que entre os 11 experimentos todos exibiram uma eficiência superior a 95%. Demonstrando uma excelente qualidade do carvão CCC no processo de adsorção do vermelho de congo. Dentre os experimentos o de maior destaque em eficiência foi o experimento 6, qual seguiu o padrão X1: 0,8g de carvão (0); X2: 50mg/L de vermelho de congo (0), apresentando um índice de eficiência de remoção de 99,20%. A segunda adsorção mais eficiente foi o experimento 2, qual também apresenta X1: 0,8g de carvão e X2: 25mg/L de vermelho de congo, representando a metade das g utilizadas no experimento 6, experimento de maior absorvância.

Podemos notar que os menores resultados de eficiência se encontram em X2 de 75mg/L de vermelho de congo, sendo eles respectivamente experimento 4 (X1: 0,8g carvão; eficiência 97,37%), experimento 3 (X1: 0,2g de carvão; eficiência de 96,68%) e em terceiro com a menor absorvância entre os ensaios o experimento 8 (X1: 0,5g de carvão, eficiência de 96,73%).

Foi possível observar que para a obtenção de maior eficiência de adsorção se faz necessário a aplicação de massa elevada de carvão ativado e baixa concentração de corante, tendo assim os melhores resultados entre as respostas de absorvância do filtrado e a capacidade de adsorção, Tabela 5. O estudo de Silva, et al., (2021), que trabalhou com carvão oriundo do mesocarpo do fruto da castanha de caju, porém com o corante verde malaquita concluiu quando analisou a concentração inicial, que os dados analisados indicam que a capacidade de adsorção da sua pesquisa ( $Q_e$ , mg/g-1) e a eficiência de remoção do corante verde malaquita (Remoção %) demonstram tendências inversamente proporcionais, conforme aumenta a concentração de corante os valores de adsorção tentem a declinar se os valores de carvão se mantiverem baixos.

O estudo de Silva, et al., (2021), demonstra 99,2%, com capacidade de adsorção em  $Q_e = 248$ mg. g-1, na concentração 100 mg/L-1. Além desse, também indicou 99,6% e adsorção em  $Q_e = 248$  mg. g-1 para 120mg/L-1 em corante verde malaquita. Entretanto, deste ponto em diante esta



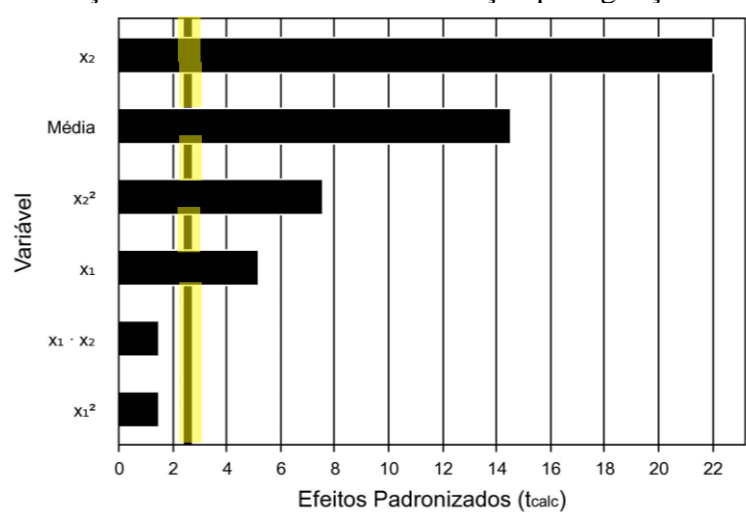
porcentagem decresce, de 99,6% para 79,07%. Por outro lado, a capacidade de adsorção aumenta, de  $Q_e = 248 \text{ mg/g-1}$  para  $Q_e = 553,5 \text{ mg/g-1}$ . Como podemos notar resultados bem próximos ao no presente estudo.

No estudo de Azevedo, (2015), onde vários corantes são testados podemos notar que a remoção do corante amarelo básico 02, decresce de 98,9% com  $100 \text{ mg/L-1}$  até 96% para a concentração de  $170 \text{ mg/L-1}$ . A partir deste ponto, o percentual de remoção decresce 83% para uma concentração inicial de  $300 \text{ mg/L-1}$ .

De acordo com Brandão, (2020), isto ocorre, pois, com o aumento da concentração inicial do corante, haveria mais espécies distribuídas na superfície do adsorvente, o que contribui para uma maior formação de ligações químicas na superfície. No entanto, a diminuição acontece pela competição entre as moléculas de adsorvato para agregação nos sítios do adsorvente nas concentrações finais.

Através dos resultados obtidos na Tabela 5, levou-se em consideração as duas variáveis independentes  $X_1$  e  $X_2$  (carvão ativado e vermelho de congo) e uma dependente (absorbância), com as quais foram realizadas uma análise estatística através do Diagrama de Pareto, Figura 14. De acordo com os resultados obtidos e a análise da Figura 14, podemos notar que com exceção da variável  $X_1^2$  e da variável de interação  $X_1 * X_2$ , todos os demais fatores apresentaram efeito significativo durante o processo de adsorção. Notamos isso pois eles ultrapassam a linha amarela, ambos com valores inferiores a 2 tcalc.

**Figura 14:** Representação do Diagrama de Pareto obtido a partir do Delineamento de Faces Centradas (DFC) na remoção de corante através de adsorção por agitação orbital horizontal.



Fonte: Autor, (2023).

Na Tabela 6 estão apresentados os coeficientes de regressão das variáveis estudadas na remoção do corante vermelho de congo. Foi considerado o efeito de interação entre as variáveis. Os efeitos significativos foram destacados a um nível de 95% de confiança.

**Tabela 6:** Coeficientes de Regressão do Planejamento DFC 2<sup>2</sup> obtidos da remoção de corante, em intervalo de 95% de confiança.

Fatores	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão	Tcalc	p-valor
Média	0,83	0,06	14,51	0,0000
X1	-0,23	0,05	-5,17	0,0036
X1 <sup>2</sup>	-0,10	0,07	-1,50	0,1950
X2	1,00	0,05	22,05	0,0000
X2 <sup>2</sup>	0,53	0,07	7,54	0,0006
X1.X2	-0,08	0,06	-1,52	0,1901

Fonte: Autor, (2023).

Após a geração dos coeficientes de regressão, obtidos a partir da matriz codificada, foi possível escrever o modelo ajustado que descreve a remoção de corante de vermelho de congo através de adsorção por agitação orbital horizontal, conforme Equação 6.

**Equação 6:**

$$Y_1 = 0,83 - 0,23 X_1 - 0,10 X_1^2 + 1 X_1 + 0,53 X_2^2 - 0,08 X_1 X_2$$

**Onde:**

X1 = Carvão ativado (g)

X2 = Vermelho de Congo (mg/L)

A Tabela 7 apresenta a análise de variância (ANOVA) para a absorção de corante vermelho de congo através de agitação orbital horizontal. Verifica-se através desta que o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) obtido por meio da regressão é de 99,13%. Em sequência se observarmos a figura 15 encontraremos a comparação entre os valores observados experimentalmente e aqueles preditos pelo modelo ajustado, ficando notório que a absorção teve um bom desempenho, tal se justifica pelo fato de os pontos estarem próximos a reta.

Para confirmação da significância dos parâmetros do modelo pela análise da ANOVA, foi realizado o teste F. O valor de Fcalculado (114,5) foi determinado pela expressão, Fcalculado = Quadrado médio regressão/Quadrado médio erro. Comparando o valor de Fcalculado (Fcal. = 114,5) para a regressão com o valor de Ftabelado (Ftab.b= 5,05), verifica-se uma regressão significativa.

Portanto, podemos afirmar que os dados experimentais estão bem representados pelo modelo ajustado, ou seja, o modelo obtido para as variáveis significativas pode ser utilizado para fins preditivos dentro do domínio dos fatores estudados. A mínima quantidade de absorbância foi obtida em condições de altas quantidades de carvão ativado e baixas quantidades de concentração de vermelho de congo, conforme observado na superfície de resposta gerada pelo modelo da Figura 19. De acordo com Pedroza et al., (2021), os dados experimentais são bem representados pelo modelo ajustado, ou seja, o modelo obtido para as variáveis significativas pode ser usado para fins preditivos dentro do domínio dos fatores estudados.

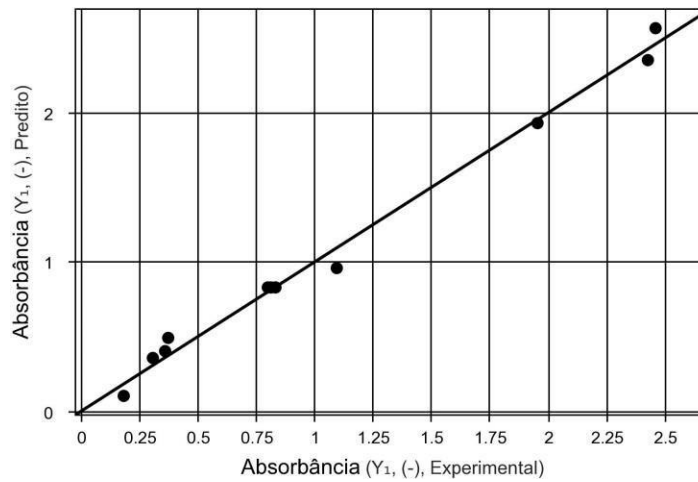
**Tabela 7:** ANOVA para a absorção de corante vermelho de congo através de adsorção por agitação orbital horizontal.

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	de Quadrado Médio	F calculado	p- valor
Regressão	7,0	5	1,4	114,5	0,00004
Resíduos	0,1	5	0,0	-	-
Falta de ajuste	0,1	3	0,0	66,2	0,01492
Erro Puro	0,0	2	0,0	0,1	-
<b>Total</b>	<b>7,1</b>	<b>10</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

$R^2 = 99,13\%$      $F_{\text{tabelado}}(5; 5; 0.05) = 5.05$

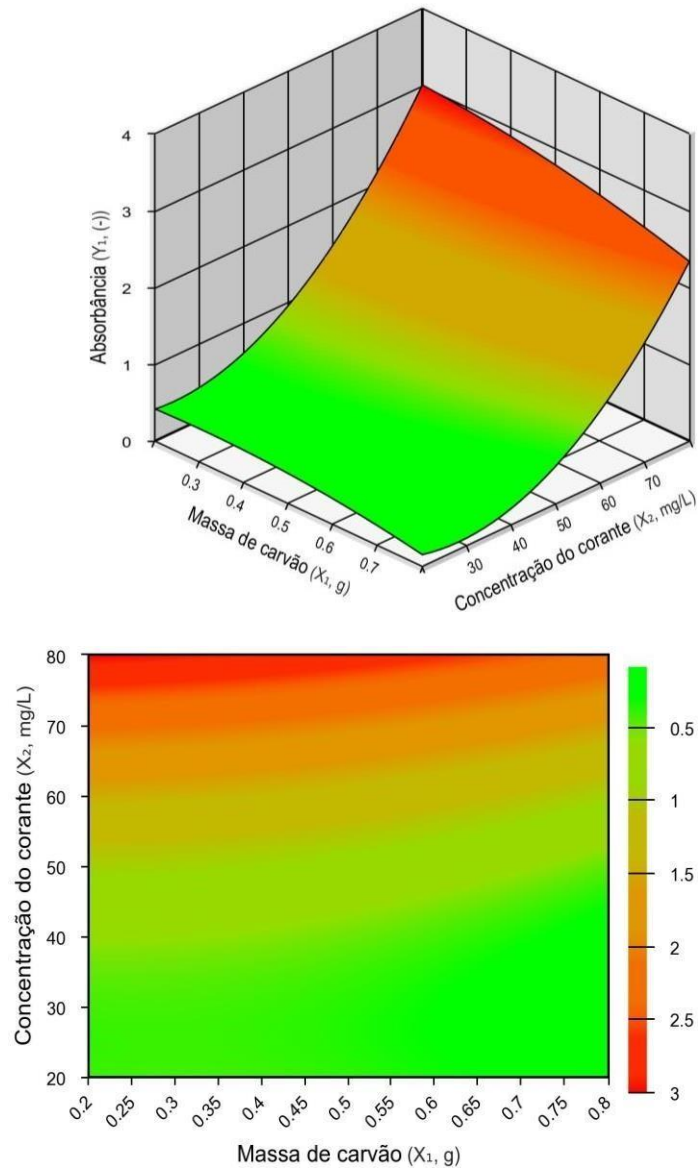
**Fonte:** Autor, (2023).

**Figura 15:** Valores observados versus valores previstos, para a remoção de vermelho de congo.



**Fonte:** Autor, (2023).

**Figura 16:** Superfície de resposta para a adsorção de corante, com os fatores quantidade de carvão ativado e concentração do vermelho de congo.



Fonte: Autor, (2023).

### 4.3 Razão de adsorção

Para a análise da razão de adsorção, que é a capacidade máxima de adsorção do carvão ativado, foi obtido um modelo de regressão linear, permitindo a análise das relações entre as variáveis. Na Tabela 8, estão apresentados os coeficientes de regressão do modelo para a razão de adsorção do corante vermelho de congo. Foi considerado o efeito de interação entre as variáveis, foram destacados a um nível de 95% de confiança.

**Tabela 8:** Coeficientes de Regressão do Planejamento DFC 2<sup>2</sup> obtidos da remoção de corante, em intervalo de 95% de confiança.

Fatores	Coefficientes de Regressão	Erro Padrão	Tcalc	p-valor
Média	2,95	0,22	13,72	0,0000
X1	-2,73	0,17	-15,94	0,0000
X1 <sup>2</sup>	1,64	0,26	6,24	0,0015
X2	1,98	0,17	11,55	0,0001
X2 <sup>2</sup>	-0,03	0,26	-0,13	0,9000
X1.X2	-1,34	0,21	-6,41	0,0014

Nível de significância: 5%

Fonte: Autor, (2023).

Após a geração dos coeficientes de regressão, obtidos a partir da matriz codificada, foi possível escrever o modelo ajustado que descreve a razão da adsorção do corante vermelho de congo através de adsorção por agitação orbital horizontal, conforme Equação 7.

#### Equação 7

$$Y_3 = 2,95 - 2,73X_1 - 1,64 X_1^2 + 1,98 X_2 - 0,03 X_2^2 - 1,34 X_1 X_2$$

#### Onde:

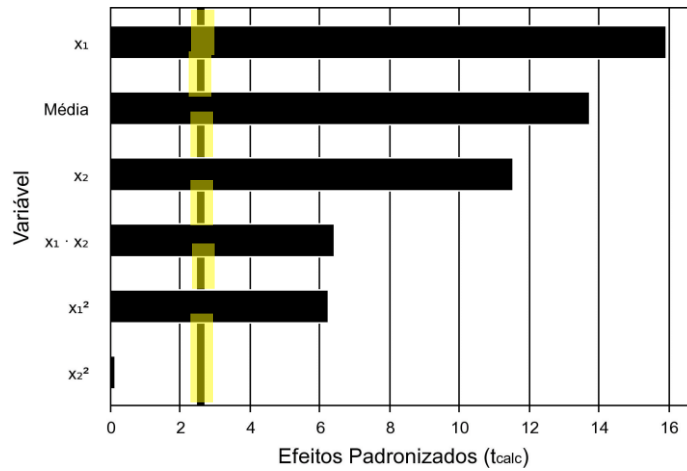
X1 = massa do carvão (g)

X2 = concentração de vermelho de Congo (mg/L)

O Diagrama de Pareto, representado na Figura 17, destaca as variáveis que têm os efeitos mais significativos na capacidade máxima de adsorção do carvão CCC. Com isso, percebe-se que as variáveis X1 e X2, massa do carvão (g) e concentração do vermelho de congo (mg/L), respectivamente, apresentam grande influência no resultado. Podemos notar que apenas X<sub>2</sub><sup>2</sup> não tem um resultado significativo para a razão de adsorção, a variável é a única que não ultrapassa a linha amarela.

A concentração de carvão (X1), ultrapassa os 15 tcal, e a concentração de corante vermelho de congo (X2) ultrapassa os 13 tcal. Na Figura 18, são apresentados os valores obtidos em comparação com os valores preditos para o teste de adsorção do índice de vermelho de congo, nesta etapa do experimento podemos notar quanto mais próximo da linha central os pontos melhores são os resultados obtidos, tendo em vista que todo experimento tem sua margue de erros, o experimento aqui apresentado tem excelentes resultados assim como o esperado.

**Figura 17:** Representação do Diagrama de Pareto obtido a partir do Delineamento de Faces Centradas (DFC) da adsorção por agitação orbital horizontal.



Fonte: Autor, (2023).

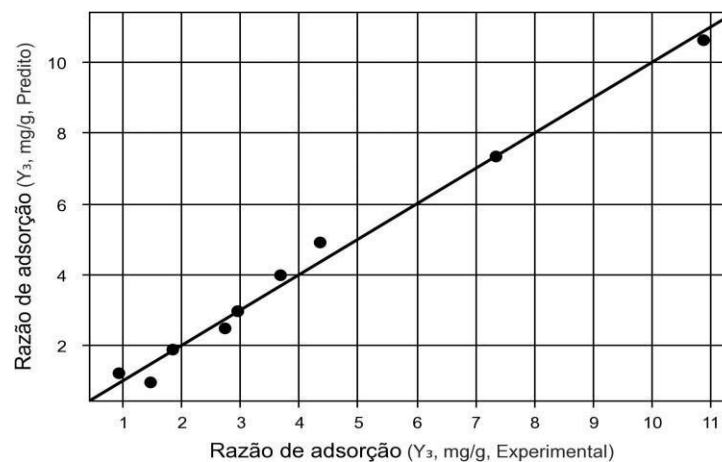
**Tabela 9:** ANOVA para a absorção de corante vermelho de congo através de adsorção por agitação orbital horizontal.

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calculado	p-valor
Regressão	82,7	5	16,5	94,1	0,00006
Resíduos	0,9	5	0,2	-	-
Falta de ajuste	0,9	3	0,3	265661,3	0,00000
Erro Puro	0,0	2	0,0	0,1	-
Total	83,6	10	-	-	-

$R^2 = 98,95\%$   $F_{\text{tabelado}}(5; 5; 0.05) = 5.05$

Fonte: Autor, (2023).

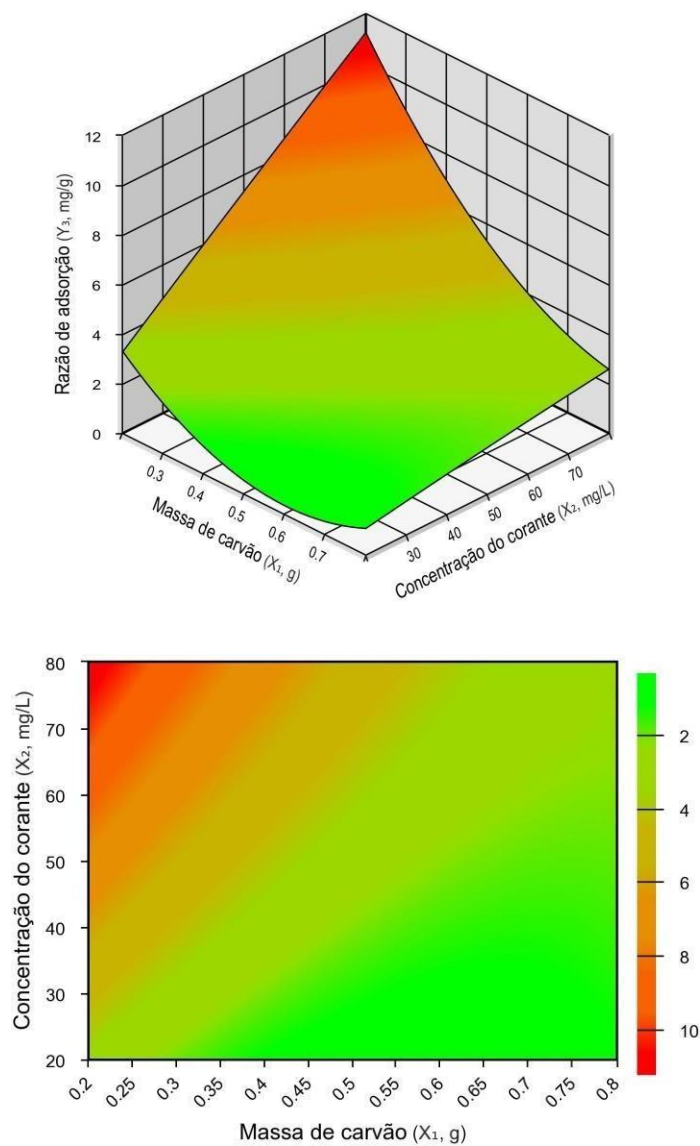
**Figura 18:** Valores observados versus valores previstos, para a adsorção de vermelho de congo.



Fonte: Autor, (2023).

A Tabela 9 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) para a capacidade máxima de adsorção das amostras de carvão CCC na adsorção de vermelho de congo. Através da análise do p-valor da regressão e  $R^2$ , conclui-se que o modelo é significativo, ou seja, ele se ajusta à amostra. Na Figura 19, é apresentada a superfície gerada por meio do planejamento experimental. Observa-se que a capacidade máxima de adsorção foi alcançada em condições de baixa quantidade de massa de carvão e alta concentração de corante, como evidenciado pelas regiões destacadas em verde.

**Figura 19:** Superfície para capacidade máxima de adsorção em relação à massa de carvão e concentração de corante.



Fonte: Autor, (2023).

#### 4.4 Eficiência de remoção do vermelho de congo

Para a análise da eficiência de remoção do carvão CCC frente ao corante vermelho de congo, foi utilizado o coeficiente de regressão do Planejamento DFC<sup>22</sup>, os dados obtidos estão inseridos na Tabela 10. Foi considerado o efeito de interação entre as variáveis. Os efeitos significativos foram destacados a um nível de 95% de confiança.

**Tabela 10:** Coeficientes de Regressão do Planejamento DFC 2<sup>2</sup> obtidos da eficiência de remoção, em intervalo de 95% de confiança.

Fatores	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão	Tcalc	p-valor
Média	98,31	0,10	949,53	0,0000
X1	0,47	0,08	5,69	0,0023
X1 <sup>2</sup>	0,19	0,13	1,49	0,1966
X2	-0,92	0,08	-11,21	0,0001
X2 <sup>2</sup>	-0,58	0,13	-4,60	0,0058
X1.X2	0,00	0,10	-0,03	0,9749

Fonte: Autor, (2023).

Após a geração dos coeficientes de regressão da eficiência de remoção do vermelho de congo que foram obtidos a partir da matriz codificada, foi possível escrever o modelo ajustado que descreve a eficiência de remoção do corante de vermelho de congo através de adsorção por agitação orbital horizontal, conforme Equação 8.

#### Equação 8

$$Y_2 = 98,31 + 0,47X_1 + 0,19 X_1^2 - 0,92 X_2 - 0,58 X_2^2 - 0 X_1 X_2$$

#### Onde:

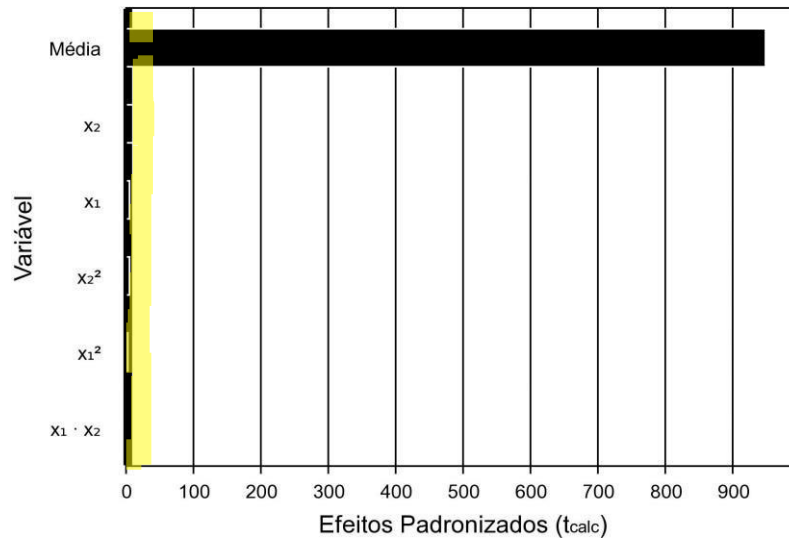
X1 = massa do carvão (g)

X2 = concentração de vermelho de Congo (mg/L)

O Diagrama de Pareto, representado na Figura 20, destaca as variáveis que têm os efeitos mais significativos na eficiência da remoção do carvão ativado vermelho de congo. Com isso, percebe-se que apenas a média tem uma representatividade na razão de adsorção, podemos notar isso pois ultrapassa a linha amarela, as demais variáveis X1, massa do carvão (g) e X2 concentração do vermelho de congo (mg/L), X2<sup>2</sup>; X1<sup>2</sup> e X1\*X2 isoladas dos demais meios de comparação não tem uma boa razão de adsorção, pois estão abaixo da linha amarela, tendo uma representatividade igual o inferior a 6 Fcalc chegando a resultados negativos, X2: -11,21; X2<sup>2</sup>: -4,60 e X1\*X2: -0,03.



**Figura 20:** Representação do Diagrama de Pareto obtido a partir do Delineamento de Faces Centradas (DFC) da adsorção por agitação orbital horizontal.



Fonte: Autor, (2023).

Para confirmação da significância dos parâmetros do modelo pela análise da ANOVA (Tabela 11), foi realizado o teste F. O valor de  $F_{\text{calculado}}$  (35,9) foi determinado pela expressão,  $F_{\text{calculado}} = \text{Quadrado médio regressão} / \text{Quadrado médio erro}$ . Comparando o valor de  $F_{\text{calculado}}$  ( $F_{\text{cal.}} = 35,9$ ) para a regressão com o valor de  $F_{\text{tabelado}}$  ( $F_{\text{tab.b}} = 5,05$ ), verifica-se uma eficiência significativa.

**Tabela 11:** ANOVA para a absorção de corante vermelho de congo através de adsorção por agitação orbital horizontal.

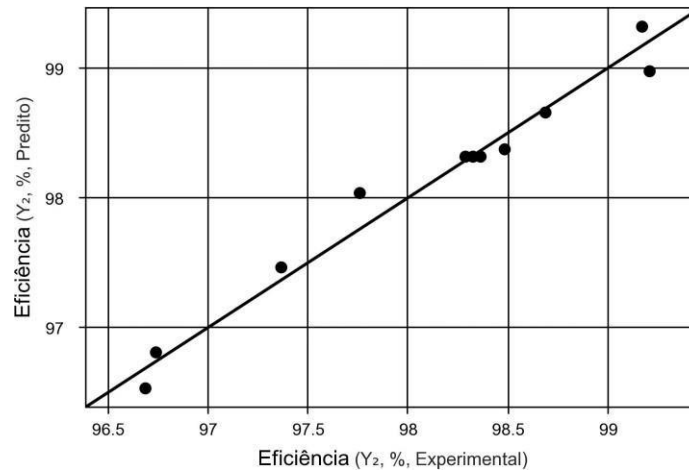
Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calculado	p- valor
Regressão	7,3	5	1,5	35,9	0,00064
Resíduos	0,2	5	0,0	-	-
Falta de ajuste	0,2	3	0,1	54,7	0,01799
Erro Puro	0,0	2	0,0	-	-
<b>Total</b>	<b>7,5</b>	<b>10</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

$R^2 = 97,29\%$   $F_{\text{tabelado}}(5; 5; 0.05) = 5.05$

Fonte: Autor, (2023).

Na Figura 21, são apresentados os valores obtidos em comparação com os valores preditos para o teste de eficácia de remoção do vermelho de congo, nesta etapa do experimento podemos notar quanto mais próximo da linha central os pontos melhores são os resultados obtidos, tendo em vista que todo experimento tem sua margem de erros, o experimento aqui apresentado tem excelentes resultados final, assim como o esperado.

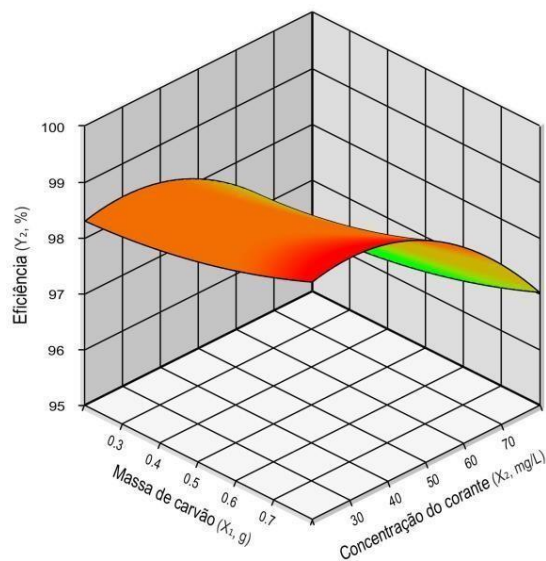
**Figura 21:** Valores observados versus valores previstos, para a eficiência de remoção do vermelho de congo.

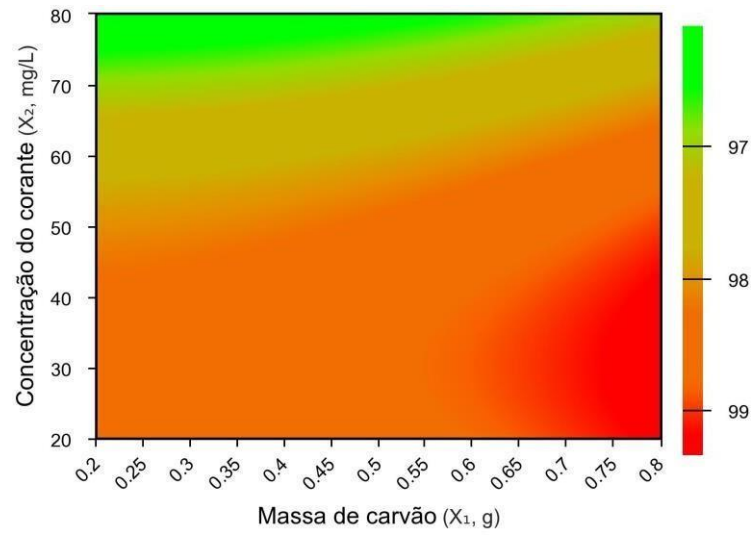


Fonte: Autor, (2023).

Através da análise do p-valor da regressão e  $R^2$ , conclui-se que o modelo é significativo, pois se ajusta à amostra. Na Figura 22, é apresentada a superfície gerada por meio do planejamento experimental. Observa-se que a capacidade máxima de eficiência foi alcançada em condições de alta quantidade de massa de carvão e baixa concentração de corante.

**Figura 22:** Superfície para capacidade máxima de adsorção em relação à massa de carvão e concentração de corante.





**Fonte:** Autor, (2023).

## 5 CONCLUSÃO

Diante do exposto no decorrer da pesquisa, fica notório que os experimentos foram finalizados com êxito. Durante o teste de adsorção de corante vermelho de congo, foi possível observar que para a obtenção de maior eficiência se faz necessário a aplicação de massa elevada de carvão ativado e baixa concentração de corante, para obtenção dos melhores resultados na resposta de absorbância do filtrado.

Concluiu-se que através dos dados que o carvão CCC da pesquisadora Maia, (2021), é extremamente eficaz no processo de adsorção do corante vermelho de congo, podendo assim ser utilizados no auxílio de remoção de resíduos indústrias despejados no meio ambiente, ajudando na preservação ambiental, bem como impactando na qualidade de vida da população humana os quais mediante os resultados do presente estudo tem uma alternativa acessível de tratamento ambiental, lembrando que tal produto só deve ser utilizado sobre supervisão e liberação dos órgãos competentes e aprofundamento das metodologias. Além das vantagens ambientais que a atualização do CCC traz, vale ressaltar que este é produzido a partir de resíduos da casca de castanha de caju assim a sua produção gera uma forma sustentável para o descarte dos resíduos industriais do fruto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Azevedo. (2015).** Adsorção de corantes básicos empregados na indústria têxtil por argila: Cinética e perfil de equilíbrio. **Fonte: Universidade Federal do Pará - Instituto de tecnologia - Programa de Pós-graduação em engenharia química.: Belém – Pará.**

**BRANDÃO.** (TESE DE MESTRADO - ENGENHARIA QUÍMICA de 2020). *Synthesis and characterization of chemically activated carbon with H3Po4 and naoh from the pequi bark (Caryocar brasiliense).* **Fonte: Brazilian Journal of Development : DOI:10.34117/bjdv6n8-493.**

EMBRAPA. (2018). *EMBRAPA.* **Fonte: Valorização da casca da castanha de caju por meio do aproveitamento do LCC e do resíduo sólido:** <https://www.embrapa.br/busca-de-projetos/-/projeto/211566/valorizacao-da-casca-da-castanha-de-caju-por-meio-do-aproveitamento-do-lcc-e-do-residuo-solido>

EMBRAPA. (23 de Janeiro de 2023). *Produção de castanha do caju cresce 33% em 2022.* **Fonte: EMBRAPA :** <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/78004497/producao-de-castanha-do-caju-cresce-33-em-2022>

ETENE. (Ano 7 de Nº 230 de 2022). *Caderno Setorial - ETENE .* **Fonte: Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste - ETENE 1:** [https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1328/1/2022\\_CDS\\_230](https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1328/1/2022_CDS_230)

FREITAS., et al. (2014). Revista Científica Unilago, 1, 2. **CARVÃO ATIVO: BREVE HISTÓRICO E ESTUDO DE SUA EFICIÊNCIA NA RETENÇÃO DE FÁRMACOS.**

FUNGARO, et al. (Vol. 6 - N. 12 – Porto Alegre – RS. Brasil. Índice 25 de Agosto de 2009). **REMOÇÃO DE VERMELHO DO CONGO DE SOLUÇÃO AQUOSA POR ZEÓLITAS DE CINZAS DE CARVÃO: ESTUDO CINÉTICO E ANÁLISE DE ISOTERMAS DE EQUILÍBRIO. Periódico Tchê Química. Vol. 6 - N. 12 – AGO/2009. Porto Alegre – RS. Brasil. Índice 25.**

**Maia. (2021).** APROVEITAMENTO DO CARVÃO ATIVADO OBTIDO DA CASCA DE CASTANHA DE CAJU NO PROCESSO DE TRATAMENTO DE ÁGUAS CINZAS. *UFT, TESE DE MESTRADO.*

Maia, et al. (13 de Fevereiro de 2021). **UTILIZAÇÃO DA CASCA DE CASTANHA DE CAJU POR PROCESSO DE PIRÓLISE COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL PARA GERAÇÃO DE NOVOS PRODUTOS.** . <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2021.14.1.70979>. Revista AIDIS De Ingeniería Y Ciencias Ambientales: vestigación, Desarrollo Y práctica.

Mazzetto, et al. (2009). **Óleo da castanha de caju: oportunidades e desafios no contexto do desenvolvimento e sustentabilidade industrial.** *Química Nova*, pp. Vol. 32, No. 3, 732-741.

NASCIMENTO, et al. (2014). *ADSORÇÃO: aspectos teóricos e aplicações ambientais*. Fortaleza, Ceará, Brasil: Imprensa Universitária da Universidade Federal do Ceará (UFC).

PADILLA, et al. (2018). **Potencial Energético da Casca de Coco (Cocos nucifera L.)** para uso na Produção de Carvão Vegetal por Pirólise. *Rev. Virtual Quim. [Vol 10] |No. 2| |334-345|*.

PARADELA, F. M. (Setembro de 2012). Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Química e Bioquímica. *Estudo da pirólise de misturas de resíduos de plásticos, pneus e biomassa. Faculdade de Ciências e Tecnologia*. Universidade nova de Lisboa .

PAZ, et al. (2016). **ESTUDO DE ADSORÇÃO DE CORANTE EM CARVÃO DA FIBRA DE COCO DA BAÍÁ, IN NATURA**. 7 ° *Jornada de Iniciação Científica e Extensão - IFTO*.

SCHNEIDER, E. L. (2008). *Adsorção de compostos fenólicos sobre carvão ativado*. Toledo - PR, Brasil.

SCHNEIDER, J. K. (fevereiro de 2018). **UTILIZAÇÃO DE BIOMASSAS BRASILEIRAS PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO DE ALTA QUALIDADE: CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO COMO ADSORVENTE**. Porto Alegre: Tese de Doutorado.

SCHNEIDER, J. K. (Fevereiro de 2018). **UTILIZAÇÃO DE BIOMASSAS BRASILEIRAS PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO DE ALTA QUALIDADE: CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO COMO ADSORVENTE**. *Tese de Doutorado* . Porto Alegre , RS .

**Silva, et al. (2021)**. *Carvão ativado oriundo do mesocarpo do fruto da castanha de caju (Anacardium occidentale) na remoção de corante em meio aquoso*. Fonte: **DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i3.13221>**

WERTHER J.; SAENGER, M.; HARTGE, E. U.; OGADA, T.; SIAGI, Z. **Combustion of agricultural residues**. Progress in energy and combustion science. Alemanha: Pergamon, v.26, p. 1-27, 2000.