

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

CAMPUS PALMAS

CURSO SUPERIOR EM ENGENHARIA CIVIL

VICTOR EDUARDO CARDOSO DA COSTA

**PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA PODA DE FLAMBOYANT
(*DELONIX REGIA*): CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO**

PALMAS - TO

2024

VICTOR EDUARDO CARDOSO DA COSTA

**PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA PODA DE FLAMBOYANT
(*DELONIX REGIA*): CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil do
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Tocantins – *Campus* Palmas,
como requisito parcial à obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

PALMAS - TO

2024

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

C838p Costa, Victor Eduardo Cardoso da
Produção de carvão ativado a partir da poda de flamboyant
(Denolix Regia): caracterização e aplicação / Victor Eduardo Cardoso
da Costa. – PALMAS, TO, 2024.
43 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, PALMAS, TO, 2024.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Poda de flamboyant. 2. Carvão ativado. 3. Pirólise. 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).

VICTOR EDUARDO CARDOSO DA COSTA

**PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA PODA DE FLAMBOYANT
(*DELONIX REGIA*): CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil do
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Tocantins – *Campus* Palmas,
como requisito parcial à obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 27 /06 /2024

BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza (Orientador) - IFTO



MSe Evanuzia Miranda da Silva - IFTO



Dra. Elaine da Cunha Silva Paz - IFTO

Dedico esse trabalho a Deus e
a minha família que sempre
me apoiou nos meus sonhos.

RESUMO

COSTA, Victor Eduardo Cardoso. **Produção de carvão ativado da poda de Flamboyant (*Delonix Regia*): Caracterização e aplicação**. 2024. 42p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2024.

O aumento da urbanização brasileira, contribui para o crescimento e investimento no setor de jardinagem e paisagismo, levando em consideração o nosso clima tropical e de elevadas temperaturas, uma das opções bastante usadas para amenizar essas sensações térmicas e contribuir para o cenário a fim de deixar as cidades com uma bela paisagem, é o plantio de árvores Flamboyant. Além disso, a dificuldade de acesso à água potável por uma grande proporção de indivíduos torna a produção de carvão ativado a partir das podas de flamboyant uma ótima opção para o tratamento de águas, de modo a permitir uma destinação adequada para o rejeito. O propósito deste trabalho é degradar de forma termicamente a poda de flamboyant por meio da pirólise, a fim de obter carvão ativado, que posteriormente será utilizado como adsorvente de corantes químicos. Para isso, a amostra foi ressecada em estufa e cortada em pequenos pedaços e obter o peso da mesma para ficar no tamanho adequado para o ensaio, na qual foi obtido o teor de carbono fixo (14,4%), teor de cinzas (2,3%), teor de material volátil (81,1%) e umidade (2,2%). Em seguida, a poda foi pirolisada por meio de um reator de leito fixo em temperaturas de 550 e 650°C, e após a obtenção do carvão ativado, foi feita a caracterização nos mesmos aspectos da amostra inicial, excluindo a cinética de perda de massa, onde obteve-se os rendimentos de 34,00% e 24,80% respectivamente. O teste de adsorção foi feito em uma mesa de agitação com o carvão ativado produzido nessa pesquisa obtido na temperatura de 650 °C e taxa de aquecimento igual a 20 °C/min, foi realizado um planejamento delineado de faces centradas com 11 tipos de combinações de massa e concentração de corante, obtendo resultados mínimos e máximos de razão de adsorção (0,60 e 7,47 mg/g) a partir de massa de material de (1,00 e 0,4 g). O teste de adsorção do corante Azul de Metileno com carvão ativo foi conduzido nesta pesquisa. Dessa forma, este estudo tem como objetivo explorar essa técnica, analisando a eficiência do carvão ativado produzido a partir da poda de flamboyant como adsorvente de corantes químicos.

Palavras-chave: Carvão ativado. Poda. Pirólise. Flamboyant. Adsorvente.

ABSTRACT

COSTA, Victor Eduardo Cardoso. **Production of activated carbon from Flamboyant (Delonix Regia) pruning: Characterization and application.** 2024. 42p. Course Completion Work – Bachelor's Degree in Civil Engineering – Federal Institute of Education, Science and Technology of Tocantins. Palmas, 2024.

The increase in Brazilian urbanization contributes to growth and investment in the gardening and landscaping sector, taking into account our tropical climate and high temperatures, one of the options widely used to alleviate these thermal sensations and contribute to the scenario in order to leave the cities with a beautiful landscape, is the planting of Flamboyant trees. Consequently, with the need for maintenance and pruning of urban trees, the amounts of waste generated by this gardening service most of the time do not have an adequate destination. Furthermore, the difficulty in accessing drinking water for a large proportion of individuals makes the production of activated carbon from flamboyant prunings a great option for water treatment, in order to allow adequate disposal of waste. To do this, the sample was dried in an oven and cut into small pieces and weighed to make it the appropriate size for the test, in which the fixed carbon content (14.4%), ash content (2.3%), volatile material content (81.1%) and moisture (2.2%). Then, the pruning was pyrolyzed using a fixed bed reactor at temperatures of 550 and 650°C, and after obtaining the activated carbon, characterization was carried out in the same aspects as the initial sample, excluding the mass loss kinetics. , where yields of 34.00% and 24.80% were obtained respectively. The adsorption test was carried out on a shaking table with the activated carbon produced in this research obtained at a temperature of 650 oC and a heating rate equal to 20 oC/min, an outlined planning of centered faces was carried out with 11 types of mass combinations. and dye concentration, obtaining minimum and maximum results of adsorption ratio (0.60 and 7.47 mg/g) from a material mass of (1.00 and 0.4 g). The adsorption test of Methylene Blue dye with active carbon was conducted in this research. Therefore, this study aims to explore this technique, analyzing the efficiency of activated carbon produced from flamboyant pruning as an adsorbent for chemical dyes.

Keywords: Activated carbon. Pruning. Pyrolysis. Flamboyant. Adsorbent.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Árvore Delonix Regia (flamboyant).....	17
Figura 2 - Atividades a serem desenvolvidas durante a pesquisa.....	20
Figura 3 - Estufa a ser utilizada para a secagem da amostra	21
Figura 4 - Pedacos de poda de Flamboyant.....	24
Figura 5 - Reator de leito fixo	24
Figura 6 - Mesa agitadora orbital (presente no laboratório LARSEN)	26
Figura 7 - Espectrofotômetro (presente no laboratório LARSEN).....	26
Figura 8 - Processo de filtração da substância adsorvida	28
Figura 9 - Solução de concentração 100mg/L antes e após a adsorção	33
Figura 10 - Contribuição das variáveis para a razão de adsorção.....	35
Figura 11 - Gráfico de predição do modelo da razão de adsorção	36
Figura 12 - Relação tridimensional entre a razão de adsorção e as variáveis	37
Figura 13 - Relação razão de adsorção x variáveis independentes	38

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fatores e níveis empregados	27
Quadro 2 - Ordem dos experimentos no planejamento experimental	27
Quadro 3 - Comparativo entre trabalhos de análise imediata da biomassa	30
Quadro 4 - Comparativos entre rendimentos de carvão ativado 550 °C e 650 °C....	31
Quadro 5 - Comparativo entre trabalhos de análise de carvão ativado	32
Quadro 6 - Resultado do teste de adsorção em relação à massa de carvão e concentração de corante	33
Quadro 7 - Coeficientes de regressão do Planejamento DFC para definição da Razão de adsorção do carvão ativado da poda de Flamboyant	34
Quadro 8 - Resultado da razão de adsorção das amostras por ANOVA.....	36

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ASTM – Sociedade Americana de Teste e Materiais

cm – Centímetro

DCCR – Delineamento de composto Central Rotacional

E – Eficiência de remoção

FAS – Federação Agrícola Estrangeira

IFTO – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins

Km – Quilômetro

LARSEN – Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética

g – Grama

min – Minuto

mL – Mililitro

mm – Milímetro

nm – Nanômetro

MPa – Mega – Pascal

NBR – Normas Brasileiras

Q – Razão de adsorção

RPM – Rotações por minuto

USDA – Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América

Sumário

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Problemas de pesquisa	14
1.2 Justificativa.....	14
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 Objetivo Geral	15
2.2 Objetivos específicos	15
3 REVISÃO DE LITERATURA	16
3.1 Arborização Urbana	16
3.2 Flamboyant	16
3.3 Biomassa para carvão ativado.....	17
3.4 Pirólise	18
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
4.1. Caracterização da Biomassa.....	21
4.1.1 Umidade	21
4.1.2 Teor de cinzas.....	22
4.1.3 Material volátil	22
4.1.4 Teor de carbono fixo	23
4.2 Pirolise da Poda de Flamboyant.....	23
4.3 Caracterização do carvão obtido.....	25
4.3.1 Teor de cinzas.....	25
4.3.2 Umidade	25
4.3.3 Material volátil	25
4.4 Ensaio de adsorção.....	25
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
5.1 Caracterização da biomassa	29
5.1.1 Análise imediata	29

5.2 Rendimento do carvão ativado da poda de flamboyant	30
5.3 Caracterização do carvão.....	32
5.4 Ensaio de adsorção.....	32
5.4.1 Razão de adsorção (Q)	34
6 CONCLUSÃO.....	39
REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

As árvores na cidade, conforme Silva, Paiva e Gonçalves (2007), desempenham um papel fundamental na melhoria da qualidade do ar, na redução da poluição sonora, na regulação da temperatura, na promoção da biodiversidade, na redução do estresse e na promoção da saúde emocional e física das pessoas. Além disso, elas contribuem para a beleza estética das áreas urbanas e para a promoção de espaços de lazer e convivência.

A *Denolix regia*, que é a nomenclatura científica do Flamboyant, é uma árvore nativa da ilha de Madagascar, que posteriormente foi espalhada para diversas regiões, principalmente devido à cor vermelha de suas flores. Possui uma ampla copa, um longo ciclo de vida, um rápido desenvolvimento, podendo atingir até 1,5 metro por ano. É aplicável tanto em regiões de baixa umidade quanto em regiões de alta umidade. Devido à sua beleza e abundância, é amplamente cultivada em áreas urbanas (Julceia, 2014).

Contudo, com a necessidade de manutenções e podas dessas árvores, por terem um grande porte, acabam gerando uma grande quantidade de resíduos, assim como de outras espécies, que necessitam de um destino adequado para um bom e produtivo aproveitamento desse material (Brasil, 2012).

No Brasil, grande parte dos resíduos de podas de árvores são destinados a trituração, logo após, tendo o seu descarte em áreas verdes ou em aterros (Cortez, 2011). Esse resíduo, pode ser amplamente aproveitado para ser usado como matéria prima para produção de carvão ativado, através do processo de pirolise, no qual é o processo que a matéria orgânica será decomposta termicamente em ambiente desprovido de oxigênio (Pedroza, 2011).

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo investigar a produção de carvão ativado a partir da poda de flamboyant (*Delonix regia* Raf), uma espécie arbórea exótica amplamente distribuída em regiões tropicais, principalmente no Brasil. A caracterização físico-química do carvão produzido e a avaliação de suas propriedades de adsorção foram realizadas, visando identificar seu potencial de aplicação em processos de purificação de água, tratamento de efluentes e remediação ambiental.

A pesquisa proposta pretende contribuir para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e inovadoras, promovendo a valorização de resíduos vegetais e a produção de um material de grande utilidade em diversas aplicações

industriais. Espera-se que os resultados obtidos possam fornecer subsídios para a criação de novas oportunidades de aproveitamento de recursos naturais e a mitigação de impactos ambientais decorrentes da produção e utilização de materiais adsorventes convencionais.

1.1 Problemas de pesquisa

A escassez de água potável e a grande quantidade de resíduos orgânico provenientes de podas de árvores sem uma destinação adequada, cria-se uma necessidade de elaborar um plano de aproveitamento para ambos, trazendo em pauta a utilização de poda de flamboyant para a produção de carvão ativado.

Portanto, uma vez que essa biomassa é descartada no meio ambiente, podendo acumular água parada e trazendo diversos malefícios ao meio onde a poda é desprezada, qual o nível de aproveitamento pode-se obter utilizando a poda de flamboyant para a produção de carvão ativado?

1.2 Justificativa

Devido à grande quantidade de podas de flamboyant serem descartadas sem uma finalidade adequada, é necessário dar um destino proveitoso para esse material. Portanto, deseja-se estudar a eficácia dessa biomassa para a produção de carvão ativado, que posteriormente será aproveitada para diversas finalidades.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Utilizar as podas de flamboyant para a preparação de carvão ativado através do processo de pirólise.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a biomassa em estudo;
- Realizar a pirólise da biomassa em reator de leito fixo;
- Caracterizar o carvão ativado obtido;
- Aplicar o carvão ativado em processo de adsorção de corante químico.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Arborização Urbana

Um dos encantos de cidades “verde” é sua grande quantidade de árvores, em ruas, praças e em residências. Manter um jardim frondoso embeleza o bairro e as casas, mas traz muitas responsabilidades que, infelizmente, estão sendo lesadas por grande parte da população e por seus administradores.

A arborização urbana desempenha um papel fundamental em nossas cidades, não apenas por questões estéticas, mas também por seus benefícios ambientais e sociais. As árvores contribuem para a melhoria da qualidade do ar, reduzem a temperatura ambiente, oferecem sombra e proteção contra os raios solares, além de proporcionarem um ambiente mais agradável e saudável para os moradores.

No entanto, o descarte inadequado de folhas e podas de árvores pode trazer sérias consequências para o meio ambiente e para a saúde da população. Quando esses resíduos são deixados em locais impróprios, como ruas, rios e terrenos baldios, podem obstruir bueiros e causar alagamentos, favorecer a proliferação de insetos e animais indesejados, além de gerar mau cheiro e poluição visual.

Além disso, a decomposição dessas folhas e galhos descartados de forma inadequada libera metano, um gás altamente prejudicial ao meio ambiente e que contribui para o aquecimento global. Portanto, é fundamental que os municípios promovam a coleta seletiva desses resíduos, incentivando a compostagem e a reciclagem, e conscientizando a população sobre a importância de um descarte correto.

Assim, é essencial que a arborização urbana seja valorizada e mantida de forma adequada, com a destinação correta dos resíduos provenientes da poda das árvores, garantindo um ambiente saudável e sustentável para todos. A conscientização e a colaboração de todos são essenciais para preservarmos esses recursos naturais tão preciosos em nosso meio urbano.

3.2 Flamboyant

Além de sua beleza ornamental, o flamboyant (*Denolix regia*) também possui propriedades medicinais. Diversas partes da árvore, como casca, flores, folhas

e sementes, são utilizadas na medicina tradicional para o tratamento de diversas doenças, como problemas digestivos, inflamatórios, respiratórios, entre outros.

Além disso, o flamboyant é uma espécie que atrai muitos pássaros e insetos polinizadores, contribuindo para a biodiversidade local. Sua sombra densa é muito apreciada em regiões quentes e ensolaradas, proporcionando um ambiente mais agradável para os seres humanos e outros animais.

No entanto, é importante ressaltar que o flamboyant é uma espécie invasora em algumas regiões, competindo com espécies nativas e alterando ecossistemas naturais. Portanto, seu plantio deve ser feito de forma consciente e responsável, levando em consideração o impacto ambiental que pode causar.

Em resumo, o flamboyant é uma árvore exuberante, com uma beleza única e múltiplos usos, que enriquece o ambiente urbano e natural. Seu cultivo deve ser realizado de forma sustentável, respeitando o meio ambiente e a biodiversidade local, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Árvore Delonix Regia (flamboyant)



Fonte: Cobasi (2021)

3.3 Biomassa para carvão ativado

A biomassa para carvão ativado é um material utilizado na produção de carvão ativado, que é um material poroso de alto poder de adsorção utilizado em diversas aplicações, como purificação de água, tratamento de efluentes, e até mesmo em máscaras faciais.

Segundo Rios *et al.* (2015), a biomassa para carvão ativado pode ser obtida a partir de diversos materiais, como cascas de coco, caroço de açaí, bagaço de cana-de-açúcar, entre outros resíduos agrícolas. Esses materiais são submetidos a um processo de pirólise, que consiste na queima controlada na ausência de oxigênio, gerando um material carbonizado que pode ser ativado quimicamente para aumentar sua capacidade de adsorção.

De acordo com Zeni *et al.* (2020), a biomassa para carvão ativado apresenta vantagens em relação ao carvão ativado tradicional, pois é um material de baixo custo e produzido a partir de resíduos, contribuindo para a redução do impacto ambiental. Além disso, a diversidade de biomassa disponível permite a produção de carvão ativado com diferentes propriedades físico-químicas, adaptando-se a diferentes aplicações.

Portanto, a biomassa para carvão ativado é um material promissor na produção de carvão ativado, com potencial para ampliar seu uso em diversas áreas.

3.4 Pirólise

A pirólise é o processo pelo qual a matéria orgânica será decomposta termicamente em ambiente desprovido de oxigênio, onde não ocorra a gaseificação acentuada desta matéria (Pedroza, 2011) e, segundo Lima *et al.*, 2012, o rendimento final desse processo será determinado pelas condições de operação do sistema. Os produtos resultantes da pirólise são compostos que se apresentam em diversas formas, sendo elas: gás, líquido e resíduos sólidos ricos em carbono que, no caso deste trabalho, é o produto de maior interesse.

O processo de pirólise pode ser de dois tipos: rápida, onde seu produto é o bio-óleo, ou convencional, onde o produto é especificamente o carvão. (Vieira, 2009 *apud* Pedroza, 2011).

Quando se trata da pirólise onde a matéria orgânica é, especificamente, a madeira, o processo é altamente complexo, composto por uma série de reações químicas e envolve, ainda, etapas de transferência de massa e calor (Yang *et al.*, 2007). Nesse caso, a pirólise será um processo do tipo físico-químico e os produtos serão em maior parte o carvão vegetal, representando o resíduo sólido rico em carbono, e uma outra parte chamada de fração volátil, que é composta tanto por vapores orgânicos condensáveis quanto por gases não condensáveis (Antália, 2003).

De maneira geral, a pirólise de uma biomassa é considerada como a sobreposição da decomposição dos seus componentes. No caso da madeira, especificamente, além de ocorrer a perda de água do material, os componentes decompostos são a celulose, as hemiceluloses e as ligninas.

A celulose é um polissacarídeo formado por unidades de β -D-anidroglicopirranose que, por sua vez, são unidas por ligações glicosídicas do tipo $\beta(1-4)$ (Sjostrom, 1993; Rowell *et al.*, 2005) e em temperaturas entre 315 a 400°C ocorre a degradação deste polímero (Yang *et al.*, 2007). Na maioria das madeiras, considerando a porção de matéria seca que as compõem, a celulose é o componente presente em maior quantidade, representando de 40 a 45% da sua constituição.

As hemiceluloses são polímeros amorfos que apresentam baixo peso molecular e sua estrutura é composta por uma cadeia central, de unidades repetitivas, juntamente com diversas cadeias laterais e ramificações (Sjostrom, 1993; Rowell *et al.*, 2005). Sua degradação ocorre em temperaturas compreendidas entre 190 e 360°C (Shen *et al.*, 2010). Na maioria das madeiras, em se tratando da porção de massa seca, as hemiceluloses são componentes presentes na sua constituição em uma proporção que varia entre 20 e 30% da sua massa total (Sjostrom, 1993).

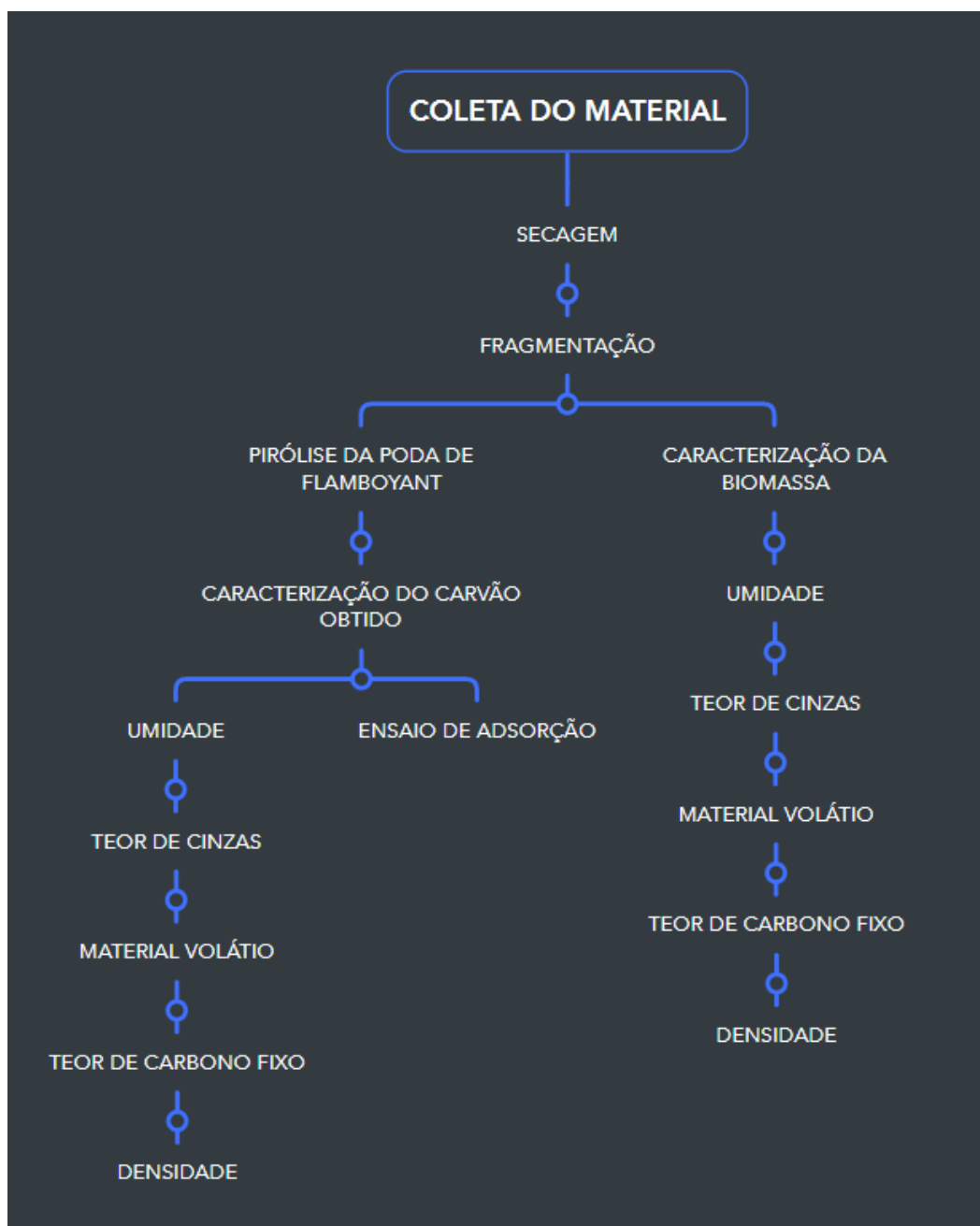
As ligninas, por sua vez, são macromoléculas amorfas, tridimensionais e ramificadas que tem como unidade básica o fenilpropano, as ligações da sua cadeia são dos tipos carbono-carbono (C-C) e éter (C-O-C) (Rowell *et al.*, 2005). Pode-se considerar que a degradação térmica das ligninas se dá como um conjunto de diversas reações que ocorrem paralelamente, as temperaturas envolvidas neste processo possuem uma variação de grande amplitude, iniciando em 100°C e podendo alcançar temperaturas propínquas à 900°C (Muller-Hagedorn *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2007).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa foi dividida em três momentos, na qual todas já foram desenvolvidas, portanto são elas; (a) coleta e preparação do resíduo, (b) pirólise do material e por último (c) caracterização do carvão obtido no processo.

Todos os ensaios foram realizados no laboratório de inovação em aproveitamento de resíduos e sustentabilidade energética (LARSEN), localizado no Instituto Federal do Tocantins (campus palmas). A Figura 2 representa um fluxograma para o desenvolvimento do trabalho.

Figura 2 - Atividades a serem desenvolvidas durante a pesquisa



Fonte: Autor (2024)

4.1. Caracterização da Biomassa

A poda de flamboyant foi examinada para a obtenção dos dados de amostras referentes à umidade, teor de cinzas, material volátil e teor de carbono fixo. A biomassa em questão foi secada em estufa a 80°C, de acordo com a Figura 2. Logo após uma parte da amostra foi reservada para a análise descrita e a outra parte para a pirólise conforme mostra a Figura 3.

Figura 3 - Estufa a ser utilizada para a secagem da amostra



Fonte: Autor (2024)

4.1.1 Umidade

A umidade foi determinada de acordo com a norma ASTM D 3173-85. Uma parte da poda de flamboyant será pesada, obtendo o seu peso em gramas, que foi acrescentada a um cadinho de porcelana com um peso fixo pré-determinado. Posteriormente, a amostra foi aquecida em uma estufa a uma temperatura de 105°C por um período de 1 hora. Em seguida, o cadinho foi mantido em um dessecador por um período de 15 minutos e será pesado. A avaliação foi realizada em três etapas, de acordo com a Equação 1.

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

Equação 1

Onde:

A = Peso do cadinho vazio + peso da amostra;

B = Peso do cadinho + peso da amostra pós aquecido na estufa;

C = Peso da amostra.

Observação: Todas as medidas serão em gramas (g)

4.1.2 Teor de cinzas

Conforme a sugestão de Sanchez *et al.* (2009), foi calculado o teor de cinzas contidas em cadinhos de porcelana com peso pré-determinado. A amostra foi calcificada em um forno mufla da marca EDG Equipamentos, modelo W-One, por um período de 60 minutos. Em seguida, foram colocados em um dessecador por 1 hora para esfriar e, depois pesados. O teor de cinzas foi estabelecido de acordo com a norma ASTM 2415-66/86 e seus resultados foram obtidos através da Equação 2.

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

Onde:

A = Peso do cadinho vazio + peso da amostra;

B = Peso do cadinho vazio;

C = Peso da amostra.

Observação: Todas as medidas serão em gramas (g).

4.1.3 Material volátil

De acordo com a proposta de Sanchez *et al.* (2009), a determinação do teor de compostos voláteis na biomassa da poda de flamboyant foi feita por meio da triplicação do peso da amostra em um cadinho de porcelana com peso pré-determinado. A amostra foi aquecida em um forno mufla à temperatura de 850o C, sem oxigênio, por um tempo de 7 minutos. O conteúdo de material volátil foi determinado de acordo com a Equação 3.

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

Onde:

A = Peso do cadinho vazio + peso da amostra;

B = Peso do cadinho vazio + peso da amostra pós aquecida em forno mufla;

C = Peso da amostra.

Observação: Todas as medidas serão em gramas (g).

4.1.4 Teor de carbono fixo

Para determinar o teor de carbono fixo na biomassa, foi feita a diferença descrita de acordo com a Equação 4.

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

Equação 4

4.2 Pirolise da Poda de Flamboyant

Foi feito a conversão térmica de um reator de leito fixo de quartzo, com comprimento de 100 cm e diâmetro externo de 10 cm. A biomassa foi adicionada ao reator de forma ressecada e em pequenos pedaços (Figura 3) após passar por estufa a uma temperatura de 80°C. O reator foi aquecido por um forno bipartido reclinável, e operado em regime de batelada, sendo usado vapor de água como gás de arraste.

O tubo de quartzo é o compartimento onde os pequenos pedaços de poda foram introduzidos. O vapor de água atingiu todo o comprimento do tubo e transportou os produtos gasosos obtidos durante a pirólise para fora do leito. Há um sistema de condensação na extremidade de saída que possibilita a conversão de uma fração dos gases produzidos durante a reação em líquidos.

Durante a pirólise, foi utilizada uma faixa de temperatura de 150 a 650°C e uma taxa de aquecimento de 20°C por minuto, na primeira etapa a biomassa ficou nos 150°C por 15 minutos, logo após o passar desse tempo o reator continuou aquecendo até alcançar a temperatura de 650°C, ficando na mesma por 30 minutos até a conclusão do experimento. As Figuras 4 e 5 ilustram o reator de pirólise que foi empregado nos testes. O tempo de resposta para todos os experimentos foi em torno de 50 minutos.

Figura 4 - Pedacos de poda de Flamboyant



Fonte: Autor (2024)

Figura 5 - Reator de leito fixo



Fonte: Autor (2024)

4.3 Caracterização do carvão obtido

A caracterização do carvão ativado obtido foi feita de acordo com os métodos descritos abaixo:

4.3.1 Teor de cinzas

A determinação do teor de cinzas no carvão foi feita utilizando o método descrito anteriormente por Sanchez *et al.* (2009) para a determinação do teor de cinzas em pedaços de poda de flamboyant.

4.3.2 Umidade

A umidade do carvão foi determinada de acordo com a norma ASTM D 3173-85, pela mesma maneira do método descrito anteriormente para a biomassa.

4.3.3 Material volátil

O valor de carbono fixo foi estimado por meio da diferença descrita na equação descrita anteriormente durante a caracterização da biomassa.

4.4 Ensaio de adsorção

Para que o ensaio de adsorção pudesse ser realizado, o local para a realização do mesmo foi no LARSEN – IFTO, campus Palmas. Primeiramente, foi empregada uma mesa de agitação (Shaker TE 141) com o carvão ativo obtido durante a pesquisa, com à temperatura de 650°C e com uma taxa de aquecimento de 20°C/min, com granulometria de 0,45 mm, conforme mostra a Figura 6.

Figura 6 - Mesa agitadora orbital (presente no laboratório LARSEN)



Fonte: Autor (2024)

O teste foi conduzido com a utilização de uma solução corante (Azul de Metileno), cuja fórmula química é $C_{16}H_{18}ClN_3S \cdot 3H_2O$, sendo usados 30 mL de solução padrão em todos os testes.

Após o teste de adsorção, as amostras foram filtradas em papel analítico. De acordo com o espectrofotômetro presente na Figura 7, a concentração de azul de metileno resultante foi de 660 nm.

Figura 7 - Espectrofotômetro (presente no laboratório LARSEN)



Fonte: Autor (2024)

Foi empregado um plano experimental do tipo Delineamento de Faces Centradas para avaliar a influência de duas variáveis independentes (massa de carvão e concentração da solução corante) no teste de adsorção. A temperatura da solução do corante foi ajustada para 7. O tempo de adsorção foi de 30 minutos. O Quadro 1 apresenta as escalas dos elementos que serão empregados.

Quadro 1 - Fatores e níveis empregados

Fatores	Níveis		
	(-1)	(0)	(+1)
Massa do carvão (g)	0,20	0,60	1,0
Concentração do corante (mg/L)	10	15	20

Fonte: Autor (2024)

Foram conduzidos onze testes, sendo três deles no ponto central do Planejamento Experimental, conforme indicado no Quadro 2. As respostas apresentadas são: (a) absorbância do filtrado, (b) eficiência de remoção (E) e (c) razão de adsorção (Q).

Quadro 2 - Ordem dos experimentos no planejamento experimental

Ordem dos experimentos	X1 (massa do carvão)	X2 (concentração do corante)
1	-1(0,20)	-1(10)
2	1(1,00)	-1(10)
3	-1(0,20)	1(20)
4	1(1,00)	1(20)
5	-1(0,20)	0(15)
6	1(1,00)	0(15)
7	0(0,60)	-1(10)
8	0(0,60)	1(20)
9	0(0,60)	0(15)
10	0(0,60)	0(15)
11	0(0,60)	0(15)

Fonte: Autor (2024)

Após o agitar dos recipientes, os materiais foram transferidos para funis de vidro contendo papel filtro qualitativo, conforme mostra a Figura 8, com o objetivo de realizar a filtração e separar as partículas de carvão e o azul de metileno já absorvido.

Figura 8 - Processo de filtração da substância adsorvida



Fonte: Autor (2024)

Após o teste de adsorção, as amostras filtradas do papel analítico foram analisadas com um espectrofotômetro com comprimento de onda de 660 nm.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização da biomassa

A seguir estão as características químicas da poda de Flamboyant. Os resultados foram obtidos por meio da aplicação da metodologia. Várias análises foram usadas para caracterizar quimicamente a biomassa. Essas análises incluíram a determinação do teor de umidade, cinzas, materiais voláteis, carbono fixo e adsorção.

5.1.1 Análise imediata

O teor de umidade é o percentual de massa de água perdida em relação à massa total quando a amostra é submetida a uma temperatura próxima a 100 °C. Acredita-se que a umidade do material e sua capacidade de combustão sejam inversamente proporcionais. Segundo Almeida (2008), biomassas com umidade inferior a dez por cento podem ser utilizadas em processos de transformação termoquímica. Têm-se um teor de umidade com valor de 6,1% na poda de flamboyant, que após a secagem, a biomassa torna-se adequada para a combustão por meio da pirólise, por apresentar um baixo teor de umidade.

O teor de cinzas refere-se à porcentagem de compostos inorgânicos na biomassa, como cálcio, ferro, fósforo, magnésio e sódio, entre outros. Para obter esse valor, a biomassa é queimada a 800 °C. Isso faz com que o oxigênio reaja com os componentes orgânicos, deixando apenas o material inorgânico. Na poda de flamboyant, o valor obtido para esta análise foi de 1,9%. Um requisito essencial para um bom precursor de carvões ativados é um baixo teor de cinzas, de acordo com Castro (2009). Portanto, os resultados são satisfatórios porque a biomassa apresentou características padrão e sugeridas pela literatura.

O percentual dos materiais que se volatizam a 850°C é encontrado no teor de material volátil. O valor é diretamente proporcional à reatividade da biomassa. Neste contexto, o valor obtido na poda de flamboyant foi de 82,4%.

O parâmetro a seguir está diretamente relacionado ao teor de lignina. Isso pode ser devido à maior resistência do composto à degradação térmica em comparação com a celulose e a hemicelulose. Devido provavelmente às características químicas da biomassa utilizada na pesquisa, o valor encontrado foi significativamente maior do que o encontrado por Pedroza et al. (2021) (7%). Portanto, o teor de carbono fixo da poda de flamboyant foi de 9,6%.

Pedroza et al. (2023) fez carvão ativado a partir da pirólise de vagens de flamboyant e obteve resultados de adsorção que sugerem que pode ser usado para o tratamento de águas cinzas. O autor encontrou valores semelhantes de material volátil (84,56 por cento) na mesma forma que a poda de flamboyant. Isso indica que essa biomassa é adequada para o processo de pirólise e que o carvão que foi extraído tem alto poder de adsorção.

Os valores de análise imediata da biomassa encontrados neste estudo em comparação com outros autores são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Comparativo entre trabalhos de análise imediata da biomassa

Variável analítica	Biomassa desta	Outros autores	
	pesquisa (<i>Delonix Regia</i>)	Pedroza et al. (2023) ^(a)	Maia (2020) ^(b)
Umidade (%)	2,2	-	6,1
Material volátil (%)	81,1	84,56	75,1
Teor de cinzas (%)	2,3	3,87	2.00
Carbono fixo (%)	14,4	11,57	16.80

^(a)Biomassa a partir da vagens de flamboyant;

^(b) Biomassa a partir da casca de castanha de caju;

Fonte: Autor (2024)

5.2 Rendimento do carvão ativado da poda de flamboyant

Silva (2009) afirma que, porque as moléculas de água ocupam uma parte dos poros que poderiam ser abertos para o processo de adsorção, a presença de umidade afeta a eficiência da adsorção dos carvões. Além disso, o poder calorífico do carvão ativado diminui com o teor de umidade (Basso, 2017). Os valores médios de teor de umidade dos carvões obtidos são considerados satisfatórios, pois Marton (2002) afirma que os carvões ativados comerciais têm um teor de umidade máximo de 10%.

Os rendimentos de carvão da poda de flamboyant encontrados nos ensaios de pirólise a 550° e 650° foram de 34,00 % e 24,8% respectivamente.

O Quadro 4 mostra o peso de carvão produzido após os processos de pirólise. Isso foi feito calculando a diferença entre os pesos de entrada e saída dos procedimentos.

Quadro 4 - Comparativos entre rendimentos de carvão ativado 550 °C e 650 °C

Temperatura de pirólise	Rendimento de carvão (%)	Outros autores	
		Vargas et al. (2011) ^(a)	Silva (2021) ^(b)
550°C	34,00	22,27	37,65
650°C	24,80	29,71	54,08

^(a)Carvão produzido a partir pirólise de serragem de Angelim pedra a 550°C e 350°C

^(b) Carvão produzido a partir de poda de castanha do Brasil a 550°C e 350°C

Fonte: Autor (2024)

Desse modo, percebe-se que o processo de pirólise a 550 °C produziu 17,00 g de carvão ativado, sendo a massa de entrada da poda de flamboyant igual a 50,00 g apresentando, assim, um rendimento de 34,00%. Já o carvão produzido a 650 °C teve uma massa de 12,70g, a partir de 51,3 g de biomassa inserida, resultando em 24,80% de rendimento.

Esses valores encontrados diferem um pouco dos autores em questão para base de comparação, onde o rendimento do carvão a 650°C se mostrou um pouco baixo, que foi de 24,8%. Entretanto, já o valor a 550°C se mostrou com maior rendimento, sendo de 34,00%, mas ambos se mostrando dentro da média entro os outros em questão.

Portanto, é evidente que a eficiência produtiva demonstrada neste estudo é compatível com a literatura examinada. Uma tonelada de poda de flamboyant em base seca seria capaz de produzir cerca de 340 quilos de carvão ativado a 550°C ou 240 quilos de carvão processado a 650°C, com base no rendimento médio e na análise da perda de massa. Atualmente, a produção de carvão ativado da Indústria Tobasa chega a 300 toneladas por mês, com preços estimados de 5,00 a 12,00 R\$/kg, dependendo da granulometria, segundo Machado (2019).

Por ser um resíduo de matéria orgânica, o material utilizado da poda de flamboyant se torna um material agregado de valor econômico porque é transformado em carvão ativado. Como resultado, uma tonelada de poda de flamboyant em base seca é capaz de produzir aproximadamente 340 quilos de carvão ativado, o que resulta em um preço fácil de venda de cerca de R\$ 2.720,00 (dois mil setecentos e vinte reais).

5.3 Caracterização do carvão

O Quadro 5 apresenta as características químicas dos carvões obtidos nessa pesquisa nas temperaturas de 550 e 650°C.

A poda do flamboyant apresentou resultados de umidade satisfatórios para o potencial calorífico do carvão ativado. Por meio de ensaios, Pedroza (2023) constatou que o carvão ativado comercial tinha um teor de cinza de 2,5%. Em seguida, fazendo uma breve comparação com os resultados, foi possível observar que os carvões provenientes da pirólise de poda de flamboyant a 550 e 650°C obtiveram teores de cinza de 10,20% e 11,50%, respectivamente.

Quadro 5 - Comparativo entre trabalhos de análise de carvão ativado

Variável analítica	Carvão 1 (550 °C)	Carvão 2 (650 °C)	Outros autores		
			Pedroza et al. (2023) ^(a)	Maia (2020) ^(b)	
Umidade (%)		2,2	2,3	-	6,95
Material volátil (%)		30,4	21,1	84,56	83,32
Teor de cinzas (%)		10,2	11,5	3,87	9,54
Carbono fixo (%)		57,2	65,1	11,57	1,19

^(a)Biomassa a partir da vagens de flamboyant;

^(b) Biomassa a partir da casca de castanha de caju;

Fonte: Autor (2024)

5.4 Ensaio de adsorção

O carvão ativado obtido da pirólise da biomassa da poda de flamboyant a 650 °C foi empregado no teste de adsorção empregando um Planejamento Experimental, do tipo Delineamento de Faces Centradas (DFC). As respostas desses ensaios foram: (a) absorbância, (b) eficiência de remoção e (c) razão de adsorção em mg/g.

Os resultados do ensaio de adsorção utilizando o delineamento de faces centrado conforme apresentado na metodologia para diferentes concentrações de corante e quantidades de carvão estão apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 - Resultado do teste de adsorção em relação à massa de carvão e concentração de corante

Ensaio	Massa do Carvão (g)	Concentração do Corante (mg/L)	Absorbância (-)	Eficiência de remoção (%)	Razão de adsorção (mg/g)
1	0,40	20	0,01	99,32	1,49
2	1	20	0,01	99,26	0,60
3	0,40	100	0,04	99,56	7,47
4	1	100	0,01	99,89	3
5	0,40	60	0,02	99,63	4,48
6	1	60	0,01	99,84	1,80
7	0,70	20	0,01	99,38	0,85
8	0,70	100	0,02	99,83	4,28
9	0,70	60	0,01	99,84	2,57
10	0,70	60	0,02	99,61	2,56
11	0,70	60	0,02	99,69	2,56

Fonte: Autor (2024)

A Figura 09 mostra a solução de corante antes e após o ensaio de adsorção com uma concentração de 100mg/L. A massa de carvão foi de 0,40 g.

Figura 9 - Solução de concentração 100mg/L antes e após a adsorção



Fonte: Autor (2024)

Ao inserir esses dados no programa "Protimiza o Design Experimental", foi possível criar modelos de regressão linear para explicar a relação das respostas encontradas com as diversas massas de carvão e concentrações de corante experimentadas.

5.4.1 Razão de adsorção (Q)

Os coeficientes de regressão encontrados para a produção do modelo relacionado à variável razão de adsorção (Q) são apresentados no Quadro 7. Essa medida está associada à quantidade de corante retida em cada fração de carvão ativado que foi separada durante o processo de filtração. Portanto, razões altas são ideais porque indicam maior eficácia de adsorção.

Quadro 7 - Coeficientes de regressão do Planejamento DFC para definição da Razão de adsorção do carvão ativado da poda de Flamboyant

Fatores	Coeficiente de Regressão	Erro Padrão	t-calculado	p-valor
Média	2,56	0,10	25,39	0,0000
X ₁	-1,34	0,08	-16,69	0,0000
X ₁ ²	0,57	0,12	4,64	0,0056
X ₂	1,97	0,08	24,47	0,0000
X ₂ ²	0,00	0,12	-0,01	0,9934
X ₁ – X ₂	0,89	0,10	-9,08	0,0003

Fonte: Autor (2024)

Assim, a equação de regressão linear para o modelo estatístico da razão de adsorção Equação 6 foi encontrada.

$$Q = 2,56 - 1,34_{x_1} + 0,57_{x_1^2} + 1,97_{x_2} + 0_{x_2^2} - 0,89_{x_1 * x_2} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

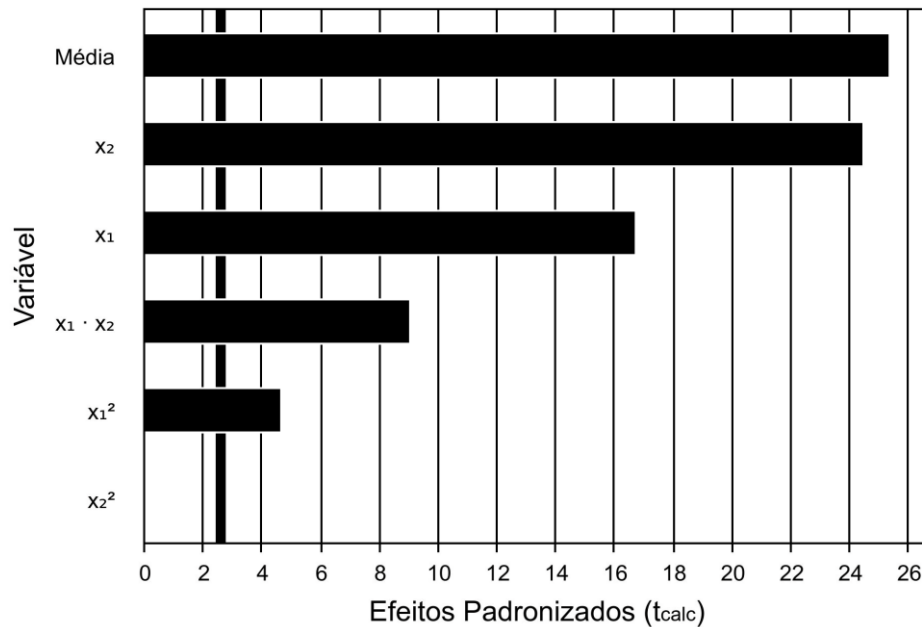
Q = razão de adsorção;

x₁ = massa de carvão (codificada);

x₂ = concentração do corante (codificada);

As variáveis mais importantes do modelo para o valor da razão de adsorção do carvão obtida da pirólise da poda de flamboyant podem ser analisadas usando o Diagrama de Pareto conforme a Figura 10.

Figura 10 - Contribuição das variáveis para a razão de adsorção

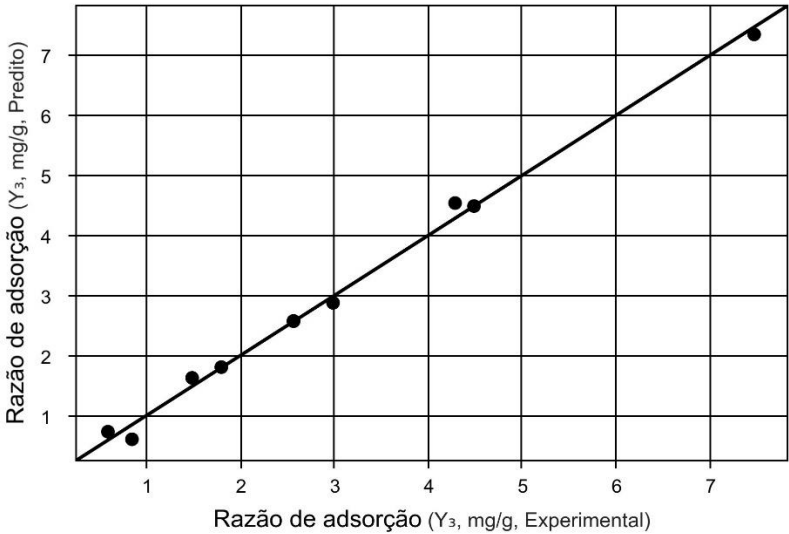


Fonte: Autor (2024)

Como resultado, o baixo p-valor associado e o gráfico de Pareto mostram que a concentração de azul de metileno (X_2) é a variável independente mais significativa estatisticamente para esta resposta. A massa de carvão (X_1) é a variável independente usada a seguir.

O gráfico de predição, conforme a Figura 11, que mostra os dados do experimento estão muito alinhados com os resultados previstos no modelo, com pontos interceptando ou muito próximos da diagonal de referência.

Figura 11 - Gráfico de predição do modelo da razão de adsorção



Fonte: Autor (2024)

Os resultados do teste da análise de variância (ANOVA) para a razão da adsorção do carvão ativado são apresentados no Quadro 8. O objetivo deste Quadro é verificar se o modelo é estatisticamente significativo.

Quadro 8 - Resultado da razão de adsorção das amostras por ANOVA.

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado Médio	F calculado	valor
Regressão	38,1	5	7,6	196,6	0,00001
Resíduos	0,2	5	0,0	-	-
Falta de ajuste	0,2	3	0,1	7482,3	0,00013
Erro puro	0,0	2	0,0	-	-
Total	38,3	10	-	-	-

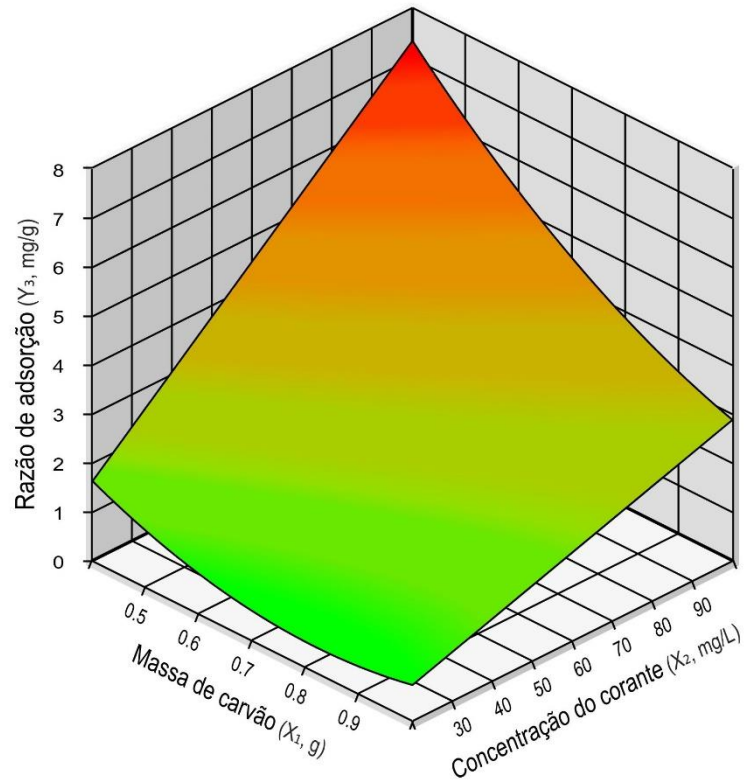
Fonte: Autor (2024)

O teste resultou em um coeficiente de determinação (R2) de 99,78% para esse modelo referente a adsorção. Uma porcentagem tão alta indica que a formulação estatística foi capaz de explicar grande parte da variação nos dados experimentados, garantindo uma qualidade superior de ajuste do modelo às circunstâncias. Portanto, esse valor é considerado bem satisfatório.

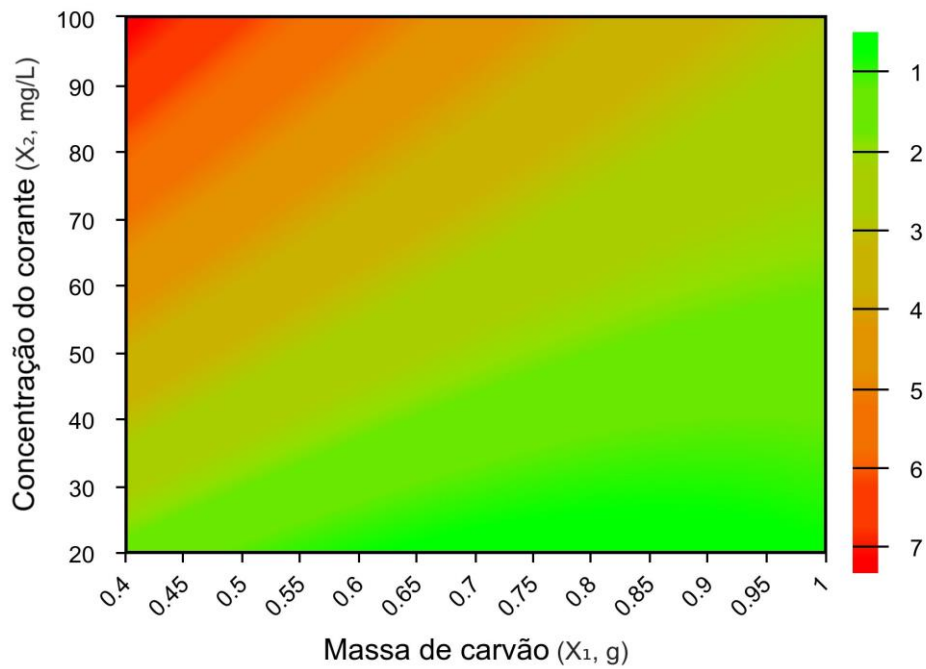
A massa de carvão (X1), a concentração de corante (X2) e a razão de adsorção (Q) são mostradas nas Figuras 12 e 13. Na escala de cores, os valores de

menor razão de adsorção são representados pelo verde e pelo vermelho, respectivamente.

Figura 12 - Relação tridimensional entre a razão de adsorção e as variáveis



Fonte: Autor (2024)

Figura 13 - Relação razão de adsorção x variáveis independentes

Fonte: Autor (2024)

A partir dessa perspectiva, a análise gráfica mostra que o carvão ativado funciona bem com qualquer quantidade de massa estudada, sendo mais eficaz em pequenas quantidades de massa. Nesse sentido, a razão de adsorção do carvão produzido pela pirólise a 650°C aumenta com a concentração de azul de metileno disponível.

6 CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos no presente estudo, podemos concluir que a produção de carvão ativado a partir da poda de flamboyant se mostra como uma alternativa viável e sustentável. A biomassa utilizada apresentou características que favorecem o processo de pirólise, resultando em carvões com especificações que o tornam atrativo para uso em adsorção de substâncias.

A alta razão de adsorção obtida a partir do carvão ativado gerado a 650°C demonstra a eficácia do processo, possibilitando a utilização de uma quantidade mínima de massa de carvão para a adsorção de substâncias. Além disso, os rendimentos alcançados foram compatíveis com a literatura, gerando uma quantidade significativa de carvão ativado a partir de cada tonelada de biomassa em base seca.

Dessa forma, o presente estudo contribui para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e eficientes na produção de carvão ativado, destacando a importância de utilizar recursos renováveis e de aproveitar resíduos de forma inteligente. A poda de flamboyant se mostra como uma fonte promissora para a produção de carvão ativado, abrindo novas possibilidades para a valorização de resíduos e para a redução do impacto ambiental.

REFERÊNCIAS

American Society for Testing and Materials (ASTM). D 3173-85: **Standard Test of Humidity**, 1985.

ANTÁLIA. MJ 2003. **Pirólise de biomassa: uma revisão da literatura, Parte I pirólise de carboidratos**, Em **Avanços em Energia Solar**, (Boer, KW, Duffie, JA, Eds.), American Solar Energy Society: Boulder.

D. SHEN , Adsorção 2010 , **6** (4), 275-286.

JULCEIA. **Flamboyant [Delonix regia (Bojer ex Hook.) Raf.** Disponível em: <<https://www.aplantadavez.com.br/2014/10/flamboyant-delonix-regia-ex-hook.html>>. Acesso em: 17 jul. 2021.

LIMA, A. C. A. **Adsorção de ânions presente em efluente usando pó da casca de coco verde modificado**. 2012. 90 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental) – Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

MÜLLER-HAGEDORN, M. et al. **A comparative kinetic study on the pyrolysis of three different wood species**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v.68, n.1, p.231-249, 2003.

PEDROZA, M. M. **Bio-óleo e Biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo**. Tese de Doutorado, Universidade do Rio Grande do Norte, 210 p, 2011.

RIOS, N. G., Pécora, J. C. L., & Sales, D. (2015). **Carvão ativado: produção e obtenção de suas características**. Ciência e Natura, 37(3), 840-866.

ROWELL, R. M. et al. **Cell wall chemistry**. In: ROWELL, R.M. (Ed.). **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC Press, 2005. p.121-138.

Política Nacional de Resíduos Sólidos. Lei nº 12.305, 2 de agosto de 2010. Presidência da República, Departamento da Casa Civil. Brasília.

PEDROZA, M. M. **"Bio-óleo e Biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo"**, Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte, p. 210, 2011.

PEDROZA, M. M.; SILVA, A. C. da .; BARROS, P. A. P. C. .; REZENDE, C. da S. A. .; LÔBO, R. do N. .; ARRUDA, M. G. . **PREPARAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA PIRÓLISE DE VAGENS DE FLAMBOYANT (Delonix regia).** *Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, [S. l.], v. 16, n. 3, p. 779–796, 2023. DOI: 10.22201/iingen.0718378xe.2023.16.3.83265.

SANCHEZ, M. E., MENÉNDEZ, J. A., DOMÍNGUEZ, A., PIS, J. J., MARTÍNEZ, O., CALVO, L. F., BERNAD, P. L. **Effect of pyrolysis temperature on the composition of the oils obtained from sewage sludge.** *Biomass and Bioenergy*, 33, p.933-940, 2009.

SILVA, Aderbal Gomes da; PAIVA, Haroldo Nogueira de; GONÇALVES Wantuelfer. **Avaliando a arborização urbana.** Viçosa: Aprenda Fácil. 2007

SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry – fundamentals and applications.** London: Academic Press, 1993. 293p.

VIEIRA, G. E. G. et al. **Low temperature conversion (LTC) – An alternative method to treat sludge generated in an industrial wastewater treatment station – Batch and continuous process comparison.** *Bioresource Technology*, v. 100, p. 1544–1547, 2009.

YANG H, Yan R, Chen H, Lee DH, Zheng C. **Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis.** *Fuel*. 2007; 86(12-13) :1781-88. doi:10.1016/j.fuel.2006.12.013.

ZENI, M., Santos, V. M. R. D., Rodrigues, A. P., & Dallago, R. M. (2020). **Características de biomassa em carvão ativado obtido do mesocarpo do coco verde**. Revista Agrogeoambiental, 12(1), 197-204.