



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

VITOR FALEIRO AMARAL

**PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA PODA DO JAMBOLEIRO
(*SYZYGIUM CUMINI* L.): CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO**

**PALMAS
2024**

VITOR FALEIRO AMARAL

**PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA PODA DO JAMBOLEIRO:
CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel no Curso Superior de Engenheiro Civil do Instituto Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes
Pedroza

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

A485p Amaral, Vitor Faleiro
 Produção de carvão ativado a partir da poda do jamboleiro:
 caracterização e aplicação / Vitor Faleiro Amaral. – PALMAS, TO,
 2024.
 48 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 jamboleiro. 2. Carvão ativado. 3. Adsorção. 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).

FOLHA DE APROVAÇÃO

VITOR FALEIRO AMARAL

PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA PODA DO JAMBOLEIRO: CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO

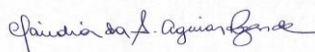
Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação do curso de Engenharia Civil Instituto Federal do Tocantins - Campus Palmas, como exigência à obtenção do grau em Engenheiro Civil.

Aprovado em: 13 / 06 / 2024

BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador (IFTO)



Prof.^a Dra. Cláudia da Silva Aguiar Rezende (IFTO)



Prof. MSc. Ranyere Nascimento Lobo

RESUMO

AMARAL, Vitor Faleiro. **Produção de carvão ativado a partir da poda do jamboleiro: caracterização e aplicação.** 2024. 48 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2024.

No Brasil, encontra-se uma vasta biodiversidade onde o crescimento das áreas urbanas surge como um desafio da gestão de resíduos. No entanto, esses resíduos podem ser aproveitados de forma sustentável, podendo ser utilizado como biomassa para a produção de carvão ativado, que possui diversas aplicações práticas. A produção de carvão ativado a partir da poda do jambolão surge como uma solução promissora, não apenas para reduzir os impactos, mas também para fornecer um adsorvente eficaz. Sendo assim, para realizar o processo de pirólise, é necessário converter a biomassa em carvão ativado. Para isso, a biomassa seca foi ressecada em estufa a 60 °C para ser caracterizada em análises imediatas de teor de carbono fixo (14,4%), teor de cinzas (2,3%), teor de material volátil (81,1%), e umidade (2,2%). Em seguida, a degradação térmica a poda de jambolão foi realizada em reator de leito fixo em temperaturas de 550 e 650 °C, durante o tempo de 30 min à uma taxa de 30 °C/min e após a obtenção do carvão ativado, foi feita a caracterização nos mesmos aspectos da amostra inicial da biomassa. Os rendimentos de carvão obtidos no ensaio de pirólise a 550 e 650 °C, foram respectivamente de 26,47% e 25,8%. Então foi desenvolvido o teste de adsorção do corante azul de metileno empregando o carvão ativado obtido a 650 °C da pesquisa, utilizando o 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 (0,54 e 5,96 mg/g) a partir de massa de material de (1,00 e 0,5 g). Assim, com base nos resultados obtidos, denota-se a eficácia do carvão ativado produzido a partir da poda de jambolão como um eficaz adsorvente de corantes químicos.

Palavras-chave: Jambolão, Pirólise de Biomassa Residual, Material Adsorvente, Corante Químico, Adsorção.

ABSTRACT

AMARAL, Vitor Faleiro. **Produção de carvão ativado a partir da poda do jangleiro: caracterização e aplicação.** 2024. 48 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2024.

In Brazil, there is a vast biodiversity where the growth of urban areas appears as a waste management challenge. However, this waste can be used sustainably and can be used as biomass for the production of activated carbon, which has several practical applications. The production of activated carbon from jambolão pruning appears as a promising solution, not only to reduce impacts, but also to provide an effective adsorbent. Therefore, to carry out the pyrolysis process, it is necessary to convert the biomass into activated carbon. For this, the dry biomass was dried in an oven at 60 °C to be characterized in immediate analyzes of fixed carbon content (14.4%), ash content (2.3%), volatile material content (81.1%), and humidity (2.2%). Then, the thermal degradation of jambolão pruning was carried out in a fixed bed reactor at temperatures of 550 and 650 °C, for a period of 30 min at a rate of 30 °C/min and after obtaining the activated carbon, the characterization in the same aspects as the initial biomass sample. The charcoal yields obtained in the pyrolysis test at 550 and 650 °C were 26.47% and 25.8% respectively. Then, the adsorption test for the methylene blue dye was developed using activated carbon obtained at 650 °C from the research, using the outlined planning of centered faces with 11 types of combinations of mass and dye concentration, obtaining minimum and maximum results of ratio of adsorption (0.54 and 5.96 mg/g) from material mass of (1.00 and 0.5 g). Thus, based on the results obtained, the effectiveness of activated carbon produced from jambolão pruning as an effective adsorbent of chemical dyes is demonstrated.

Keywords: Jambolão, Waste Biomass Pyrolysis, Adsorbent Material, Chemical Dye, Adsorption.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Fatores e níveis empregados.....	28
Tabela 2	Ordem dos experimentos no planejamento experimental.....	29
Tabela 3	Comparativo entre trabalhos de análise imediata da biomassa.....	32
Tabela 4	Comparativos entre rendimentos de carvão ativado 550 °C e 650 °C....	33
Tabela 5	Comparativo entre trabalhos de análise de carvão ativado.....	35
Tabela 6	Resultado do teste de adsorção em relação à massa de carvão e concentração de corante.....	36
Tabela 7	Coeficientes de regressão do Planejamento DFC para definição da Razão de adsorção do carvão ativado da poda de jambolão.....	38
Tabela 8	Resultado da razão de adsorção das amostras por ANOVA.....	40

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Fotografia do jambolão.....	14
Figura 2	Árvore <i>Syzygium cumini</i> (L.) (jambolão).....	15
Figura 3	Aparência externa e interna do fruto do jambolão, com a semente...	15
Figura 4	Composição química do fruto “jambolão”	16
Figura 5	Atividades realizadas durante a pesquisa.....	19
Figura 6	Biomassa a ser utilizada no processo de pirólise.....	20
Figura 7	Estufa a ser utilizada para secagem da amostra.....	21
Figura 8	Reator de leito fixo utilizado em processos de pirólise.....	24
Figura 9	Autoclave vertical.....	25
Figura 10	Sistema completo para pirólise.....	26
Figura 11	Frascos sendo preparados para o experimento.....	28
Figura 12	Mesa agitadora orbital modelo “Shaker TE 141”.....	29
Figura 13	Processo de filtração da substância adsorvida.....	30
Figura 14	Espectrofotômetro modelo Hach DR 6000 com amostra introduzida.	30
Figura 15	Solução de concentração 10mg/L antes e após a adsorção.....	37

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Contribuição das variáveis para a razão de adsorção.....	39
Gráfico 2	Gráfico de predição do modelo da razão de adsorção.....	39
Gráfico 3	Relação tridimensional entre a razão de adsorção e as variáveis.....	40
Gráfico 4	Relação Razão de adsorção x variáveis independentes.....	41

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS, ACÔNOMOS, SIGLAS E SIMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
cm	Centímetro
DCCR	Delineamento de Composto Central Rotacional
E	Eficiência de Remoção
FAS	Federação Agrícola Estrangeira
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia Estatística
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	Norma Brasileira
Q	Razão de Adsorção
RPM	Rotação por Minuto
USDA	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA	13
1.2. JUSTIFICATIVA	13
1.3. OBJETIVOS.....	14
1.3.1. Objetivo Geral.....	14
1.3.2. Objetivos Específicos	14
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1. JAMBOLÃO.....	14
2.2. PROPAGAÇÃO DO JAMBOLÃO NO BRASIL.....	17
2.3. PODA DE ÁRVORES COMO BIOMASSA PARA CARVÃO ATIVADO	17
2.4. DEGRADAÇÃO TERMOQUÍMICA.....	18
2.5. EXPERIMENTOS COM PIRÓLISE DA PODA DE JAMBOLÃO	18
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	19
3.1. COLETA DO MATERIAL.....	20
3.2. CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA	20
3.2.1. Umidade	21
3.2.2. Teor de cinzas	22
3.2.3. Material Volátil	22
3.2.4. Teor de carbono fixo.....	23
3.2.5. Densidade	23
3.3. PIRÓLISE DA PODA DE JAMBOLÃO.....	23
3.3.1. Balanço de massa	26
3.4. CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO OBTIDO.....	27
3.4.1. Densidade	27
3.4.2. Teor de cinzas	27
3.4.3. Umidade	27
3.4.4. Material volátil.....	27
3.4.5. Teor de carbono fixo.....	27
3.5. ENSAIO DE ADSORÇÃO.....	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1 Caracterização da Biomassa.....	31

4.1.1 Análise imediata.....	31
4.2 Rendimento do Carvão Ativado da Poda do Jambolão	33
4.3 Caracterização do Carvão	34
4.4. Ensaio de Adsorção.....	36
4.4.1 Razão de Adsorção (Q)	37
5. CONCLUSÕES	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1. INTRODUÇÃO

O Brasil tem a maior biodiversidade do mundo, que inclui um grande número de espécies frutíferas (LETERME *et al.*, 2006). Essa elevada produção de diferentes variedades de frutíferas nativas ou adaptadas é decorrência da extensão do território e sua inserção, em grande parte, nas zonas de clima tropical e temperado (GRANADA *et al.*, 2004).

À medida que a civilização se expande, há um encontro inevitável com a vasta biodiversidade que caracteriza nosso país. Este encontro muitas vezes resulta em mudanças significativas nos ecossistemas naturais, à medida que os seres humanos exploram, ocupam e modificam o ambiente para atender às suas necessidades. Logo, essa expansão também está intimamente ligada à geração crescente de resíduos urbanos. Conforme as populações vão se concentrando em áreas urbanas, a produção de resíduos aumenta exponencialmente.

Uma das práticas comuns em centros urbanos que contribuem para a carga de resíduos produzidos é a poda de árvores. A sua coleta e descarte muitas vezes pode representar desafios em termos de gestão dos resíduos e impactos ambientais, além de que se não gerenciados adequadamente, podem contribuir para a poluição do ar e solo. No entanto, esses resíduos de poda de árvores também podem ser uma fonte valiosa de materiais para compostagem ou produção de biomassa para energia renovável, se forem tratados e processados de forma adequada. Apesar dessa prática recorrente, a destinação sustentável dos resíduos gerados pela poda ainda é uma área pouco explorada (SANTOS, *et al.*, 2019).

Dentre inúmeras frutas, produzidas no país, o brinco de viúva é obtido de uma árvore pertencente à família *Myrtaceae*, botanicamente classificada como *Eugenia jambola*, e posteriormente reclassificada como *Syzygium cumini* (LAGO *et al.*, 2006). É conhecida popularmente como jambolão, jamelão, cereja, jalão, kambol, jambú, azeitona-do-nordeste, ameixa roxa, murta, baga de feira, guapê, jambuí, azeitona-da-terra, entre outros nomes. Sua árvore é de grande porte e muito bem adaptada às condições, apesar de ser originária da Indonésia, China e Antilhas, é também cultivada em vários países, pois cresce muito bem em diferentes tipos de solo (FETTER *et al.*, 2009).

A alta produção de frutos de jambolão (*Syzygium cumini*) durante a safra e a falta de informações sobre o seu processamento destacam a adequação de tecnologias convencionais e o desenvolvimento de novas tecnologias para o processamento dessa

fruta, de forma a promover um aproveitamento mais rentável, mediante a agregação de valor (LAGO *et al.*, 2006). Diferentes partes do desse fruto são amplamente utilizados na medicina popular em virtude de suas propriedades funcionais. Pesquisadores identificaram a presença de elevados teores antocianinas no seu fruto, demonstrando o seu potencial antioxidante e atividade antidiabetes, antifúngicas e antibacterianas. Além disso, apresentam outras substâncias com propriedades funcionais tais como outros compostos fenólicos, flavonoides, carotenoides e ácido elágico (AYYANAR; SUBASH-BABU, 2012).

Sabe-se, que quando industrializada, a fruta gera um enorme volume de resíduos que, quando não se tem um local adequado para o descarte, pode provocar danos ao meio ambiente (COELHO, 2012). Com isso as indústrias das áreas farmacêuticas, cosméticas e de alimentos têm grande interesse na obtenção de extratos e óleos a partir desses resíduos elaborando aromatizantes, antioxidantes, corantes, além de cosméticos e perfumes (MEZZOMO *et al.*, 2009).

Vê-se, então, a possibilidade de utilizar a poda de jambolão (*Syzygium cumini*) como biomassa para a produção de carvão ativado, onde desempenha diversas funções importantes em várias áreas, incluindo tratamento de água, purificação de ar, remediação ambiental, indústria farmacêutica, alimentícia, entre outras.

Em suma, a produção de carvão ativado a partir da poda de jambolão (*Syzygium cumini*) emerge como uma estratégia promissora e sustentável para o aproveitamento de resíduos agrícolas e o fornecimento de um adsorvente eficaz. Esta abordagem não apenas reduz o desperdício de recursos naturais, mas também oferece uma solução ambientalmente consciente para a geração de produtos de valor agregado. Além disso, ao empregar técnicas de produção de carvão ativado a partir da poda de jambolão, é possível promover a gestão sustentável dos recursos florestais, ao mesmo tempo em que se mitigam os impactos ambientais associados à disposição inadequada de resíduos. Portanto, a exploração dessa prática não apenas apresenta benefícios econômicos, mas também contribui para a preservação do meio ambiente e para o avanço rumo a uma economia circular e sustentável.

Para isso, a partir do processo de pirólise, isto é, a degradação termoquímica realizada na ausência parcial ou total de oxigênio, foi possível converter a biomassa em carvão ativado. Logo, esse trabalho tem como objetivo degradar a poda de jambolão termicamente, e avaliar a eficácia do carvão obtido como adsorvente de corante químico.

1.1.PROBLEMA DE PESQUISA

A busca por alternativas sustentáveis e eficientes para o aproveitamento de resíduos tem se intensificado nos últimos anos, impulsionada pelo crescente interesse em práticas ambientalmente conscientes e pela necessidade de otimizar recursos naturais. Considerando a grande quantidade de resíduos provenientes da poda do jambolão, a busca por medidas sustentáveis se torna um incentivo indispensável para sua utilização como biomassa na produção de carvão ativado.

Portanto, a utilização de poda de jambolão como biomassa para produção de carvão ativado por meio da pirólise seria uma solução?

1.2.JUSTIFICATIVA

Visto que no Brasil por se tratar de um país com clima tropical, torna-se local ideal para crescimento do jambolão, sendo compatível com praticamente todos os tipos de solo. Devido à sua abundância em ambientes urbanos e à facilidade de crescimento, uma quantidade significativa de resíduos é gerada, uma vez que a poda é necessária para manter a segurança e prevenir danos à infraestrutura da cidade.

Com base nisso, a utilização da poda de jambolão como biomassa para a produção de carvão ativado torna-se essencial, visto pelo aspecto sustentável, renovando e reaproveitando um recurso abundante e minimizando a quantidade de resíduos urbanos.

O Tocantins, possui a maior fábrica de carvão ativado de biomassa de resíduos da América Latina com produção de 300 toneladas/mês, comercializando com valor entre 5,00 - 12,00 R\$/kg em função da granulométrica do carvão ativado. As demandas de fornecimento são bastante diversificadas como indústria farmacêutica, indústria de alimentos, extração de ouro e de tratamento de águas (MACHADO, 2019). Nesse contexto, é interessante analisar o carvão ativado derivado dessa biomassa como um adsorvente, visando agregar valor a um resíduo industrial e fornecer uma alternativa adicional para a filtragem. Assim, o objetivo é investigar as propriedades do carvão produzido pela pirólise da poda de jambolão, com uma atenção especial ao seu poder de adsorção.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

Degradar termicamente a poda do jambolão para a produção de carvão ativado com a aplicação como adsorvente de corante químico.

1.3.2. Objetivos Específicos

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

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. JAMBOLÃO

Dentre inúmeras frutas, o jambolão é obtido de uma árvore pertencente à família Myrtaceae, botanicamente classificada como *Eugenia jambolana*, e, posteriormente, reclassificada, como *Syzygium cumini* (Figura 1) (LAGO *et al.*, 2006).

Figura 1- Fotografia do jambolão



Fonte: Giselda Person (2023)

O jambolão é originário da Indonésia, da China e das Antilhas, no entanto, é cultivado em vários países. Esta planta é encontrada em grande parte do Brasil, nas

planícies litorâneas, nas serras e nos planaltos, e cresce muito bem em vários tipos de solo (GOMES, 1983).

Sua árvore de grande porte pode alcançar vários metros de altura (Figura 2) com folhagem abundante, ramos de coloração acinzentada-claro, com fissuras escuras e cicatrizes foliares bastante aparentes (MIGLIATO *et al.*, 2007).

Figura 2 – Árvore *Syzygium cumini* (L.) (jambolão)



Fonte: VIZZOTTO (2008)

A frutificação ocorre de janeiro a maio e os frutos são do tipo baga, assemelhando-se bastante com as azeitonas. Sua coloração, inicialmente branca, torna-se vermelha e posteriormente preta, quando maduras. Sua semente fica envolvida por uma polpa carnosa e comestível, doce, mas adstringente, sendo agradável ao paladar. No Brasil, o fruto (Figura 3) é geralmente consumido *in natura*, porém esta fruta pode ser processada na forma de compotas, licores, vinhos, vinagres, geleias, tortas, doces entre outros (VIZZOTTO e FETTER, 2009).

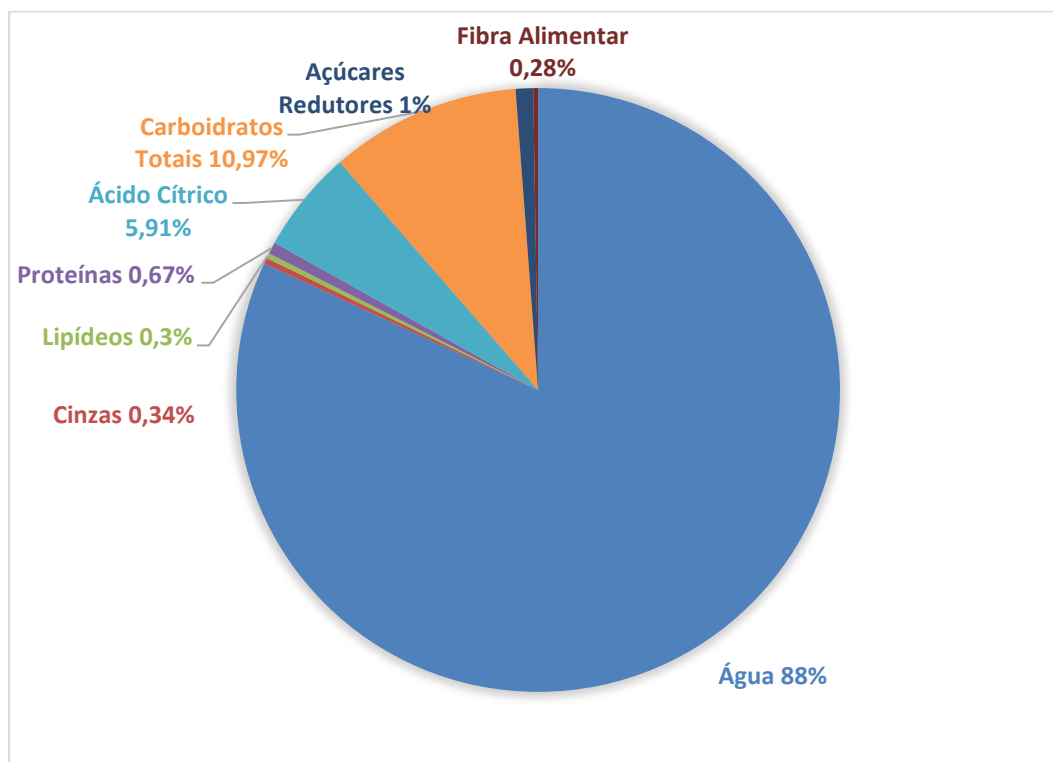
Figura 3: Aparência externa e interna do fruto do jambolão, com a semente.



Fonte: VIZZOTO (2008)

Em relação à composição química (Figura 4), este fruto apresenta aproximadamente 88% de água, 0,34% de cinzas, 0,30% de lipídeos, 0,67% proteínas, 5,91% de acidez (ácido cítrico), 10,7% de carboidratos totais, 1% de açúcares redutores, 0,28% de fibra alimentar, 9,0° Brix e pH de 3,9. O principal mineral encontrado nesta fruta é o fósforo e a vitamina em maior abundância é a vitamina C (VIZZOTO e FETTER, 2009).

Figura 4 – Composição química do fruto “jambolão”



Fonte: VIZZOTTO e FETTER (2009)

São inúmeros os efeitos reconhecidos dessas plantas, as folhas de *S. jambos* possuem ação hipotensiva, enquanto as folhas e brotos de flores da espécie *jambolanum* são considerados diuréticos. Ainda em relação à *S. jambolanum*, as cascas têm mostrado efeito antidiarréico bem como uma ação inibitória contra a atividade da protease HIV-1, enquanto as sementes têm mostrado efeito anticonvulsivante (PEPATO *et al.*, 2001).

2.2. PROPAGAÇÃO DO JAMBOLÃO NO BRASIL

A família *Myrtaceae* é pantropical, contendo aproximadamente 3.800 espécies arranjadas em perto de 130 gêneros (LUCAS *et al.*, 2005). Segundo Sobral *et al.* (2010), no Brasil esta família é representada por 26 gêneros e cerca de 1.000 espécies.

As *Myrtaceae*s, normalmente, não produzem madeiras valiosas, limitando-se ao uso como lenha e pequenas peças ou objetos, além de outras formas de uso local (MARCHIORI; SOBRAL, 1997). Normalmente, a propagação do jambolão é feita por sementes, (CAVALCANTI, 2010), sendo esta vantajosa para espécie pelo fato de apresentar a poliembrionia, possibilitando encontrar de 9 a 10 embriões por semente (GURGEL; SOUBICHE SOBRINHO, 1951). No Brasil é encontrada em diversos estados das regiões Sudeste, Nordeste e Norte (MORTON, 1992).

2.3. PODA DE ÁRVORES COMO BIOMASSA PARA CARVÃO ATIVADO

Pode-se definir biomassa como toda matéria orgânica de origem vegetal ou animal, e biomassa energética como os materiais que, por serem biomassa, podem ser utilizados para fins energéticos (MESA-PÉREZ, 2004). As podas de árvores podem ser submetidas a tratamento térmico para produção de carvão ativado, neste caso um material com característica físico-química que desenvolve grandes áreas superficiais ideais para adsorção de partículas líquidas e gasosas que são obtidas em material rico em carbono (MAMANÍ *et al.*, 2019).

É possível utilizar biomassa lignocelulósica para produção dos mesmos produtos originários do petróleo, como combustíveis, solventes e outros produtos químicos (YAMAN, 2004). As propriedades do carvão produzido por materiais lignocelulósicos dependem do precursor e do método de produção usado. A composição desses materiais em relação à celulose, hemicelulose e lignina determina até certo ponto, o desenvolvimento de porosidade do carvão ativado produzido (NABAIS *et al.*, 2013; THEYDAN; AHMED, 2012).

Uma alternativa viável para aproveitar os resíduos de podas de árvores é por meio da produção de carvão ativado, que é amplamente utilizado na indústria como adsorvente. A pirólise emerge como uma opção promissora para esse propósito.

2.4. DEGRADAÇÃO TERMOQUÍMICA

Em face aos problemas com relação à demanda mundial por combustíveis fósseis, a degradação termoquímica conhecida como pirólise da biomassa ganha espaço. É um método que torna possível a utilização de material de origem orgânica para produção de gás, óleo e carvão, elementos de alto valor energético com grande importância no atendimento das demandas energéticas globais.

A pirólise pode ser classificada de acordo com os parâmetros e condições do processo, denominadas de pirólise rápida e lenta. A pirólise rápida ocorre em temperaturas na faixa de 800 a 1300 °C, em taxas de aquecimento entre 10 a 200 °C, com intervalo de tempo relativamente curto entre 1 a 10 s. Já a pirólise lenta tipo convencional, ocorrerá em tempo de residências entre 5 a 30 min e taxas de aquecimentos entre 6 a 60 °C/min, com temperaturas variando entre 400 a 500 °C (ALBANESE *et al.*, 2019b; ELKHALIFA *et al.*, 2019b; MAMANÍ *et al.*, 2019; PEDROZA, 2011).

2.5. EXPERIMENTOS COM PIRÓLISE DA PODA DE JAMBOLÃO

Atualmente, há uma lacuna significativa na literatura científica quando se trata da exploração abrangente da pirólise do jambolão. A falta de estudos aprofundados especificamente sobre esse processo dificulta a identificação de experimentos já realizados. A escassez de pesquisas dedicadas à pirólise do jambolão limita o entendimento dos seus potenciais impactos e aplicações. No entanto, foi possível determinar alguns parâmetros de acordo com os resultados da pesquisa abaixo.

Para a produção de carvão ativado a partir de biomassa de jambolão (*Syzygium cumini*), de acordo com Lôbo (2021), a biomassa precursora possui teores de materiais voláteis (81,9%) e teor de carbono fixo (11,47%), bem como em sua análise elementar teor de cinzas (0,66%), por tanto, demonstra como material precursor ideal na produção de produtos carbonáceos.

A fração sólida do processo pirolítico demonstrou características convenientes dentre eles estão o aumento da relação de carbono e hidrogênio com base na biomassa, baixo teor de cinzas, pH alcalino, ponto de carga zero em torno do neutro demonstrando um material com equilíbrio de cargas elétricas, carvão com índice de iodo

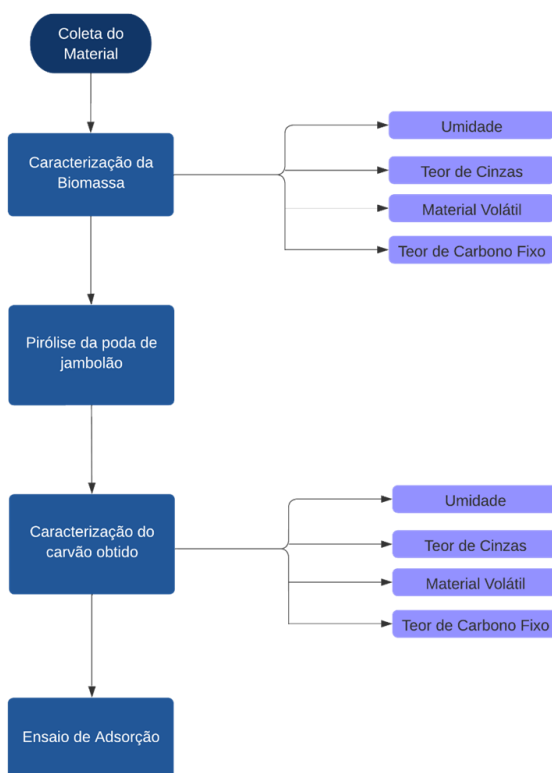
acima de 1162,07 Mgl₂/g (Iodeto de Magnésio por grama) confirmando como material ideal para adsorção de micro poluentes.

Fundamentando na produção de carvão em temperatura com menor rendimento, podemos considerar que 1 tonelada de poda de arborização da *Syzygium cumini* com rendimento médio de 16% obtemos 160 kg de carvão. Levando em consideração os valores comerciais por massa de carvão ativado pulverizado, esse rendimento possibilitara um ganho de R\$ 1.920,00 custando R\$ 12,00 por quilograma de carvão.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

As atividades desenvolvidas durante esta pesquisa estão apresentadas de forma cronológica na Figura 5. Os ensaios experimentais de caracterização da amostra foram realizados no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) do IFTO, campus Palmas.

Figura 5 – Atividades realizadas durante a pesquisa



Fonte: Autor (2024)

3.1. COLETA DO MATERIAL

A biomassa utilizada foi proveniente da parte referente à poda do caule do jambolão, apresentados na Figura 6, correspondendo também o material no local de sua retirada.

Figura 6 – Biomassa a ser utilizada no processo de pirólise



Fonte: Autor (2024)

3.2. CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

A poda de jambolão passou por uma série de análises com a finalidade de obtenção dos dados da amostra referentes à umidade, teor de cinzas, volatilidade do material e teor de carbono fixo. A amostra foi seca em estufa (Figura 7) a 60 °C e fragmentada em pequenas partes em formatos de meios cilindros.

Figura 7 – Estufa a ser utilizada para secagem da amostra



Fonte: Autor (2024)

3.2.1. Umidade

De acordo com a norma ASTM D 3173-85, foi utilizada como base para realizar a determinação da umidade. Foi pesada uma massa de aproximadamente 1 g da poda de jambolão triturada que foi adicionada a um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. Após isso, a amostra foi aquecida em uma estufa à temperatura de 105 °C por um período de 1 hora. Posteriormente o cadinho foi colocado em um dessecador por 15 minutos e pesado. A análise obteve o teor de umidade e foi determinado de acordo com a Equação 1:

$$\text{Umidade (\%)} = \frac{(A-B)}{(C)} * 100 \quad (\text{Equação.1})$$

A= peso do cadinho vazio + peso da amostra

B= peso do cadinho + peso amostra pós-aquecimento na estufa

C= peso da amostra

} (g)

3.2.2. Teor de cinzas

Para determinação do teor de cinzas 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 serem pesados. O teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma ASTM 2415-66/86 e seus resultados foram obtidos através da Equação 2:

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

A= peso do cadinho + peso amostra após calcinação

B= peso do cadinho vazio

C= peso da amostra

} (g)

3.2.3. Material Volátil

Para a determinação do teor de material volátil, foi necessária utilização do método sugerido por Sanchez *et al.*, (2009), onde a biomassa de poda de jambolão 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

C= peso da amostra

} (g)

3.2.4. Teor de carbono fixo

Para determinação do teor de carbono fixo presente na biomassa foi efetuada a diferença descrita de acordo com a Equação 4:

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

(Equação.4)

3.2.5. Densidade

Utilizando uma proveta de 100 mL, foi possível determinar a densidade aparente, acoplando à uma balança de precisão. Após isso, foi tarada a balança e adicionada a poda de jambolão previamente seca e triturada. Foram obtidas as massas (g) nas sucessivas adições dos respectivos volumes de 10, 20, 30, 40 e 50 mL. A densidade aparente foi obtida através da Equação 5:

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

(Equação.5)

3.3. PIRÓLISE DA PODA DE JAMBOLÃO

Para a realização da pirólise completa da biomassa de poda de jambolão, foi realizada a conversão térmica por meio de um reator de leito fixo tubular de aço, de 100 cm de comprimento e diâmetro externo de 10 cm. Abaixo, é possível observar o sistema de reator com leito fixo conforme Figura 8. A biomassa foi inserida ao reator na forma ressecada e cortada em seções, após passar por estufa a uma temperatura de 60 °C. O reator foi aquecido através de um forno bipartido reclinável, e será operado em regime de batelada, sendo empregado vapor de água como o gás de arraste.

Figura 8 – Reator de leito fixo utilizado em processos de pirólise



Fonte: Autor (2024)

O recipiente utilizado para acomodar a poda de jambolão dentro do reator foi uma barca de aço, capaz de suportar a temperatura e preservar o material restante. Sendo parte do sistema, foi utilizada uma autoclave vertical (Figura 9) para a produção de vapor de água, que serviu como gás de arraste no procedimento pirolítico. Com a passagem do vapor de água, em temperatura num intervalo de 133 °C a 139 °C, os produtos gasosos obtidos pela pirólise foram pressionados para fora do leito. Na extremidade de saída há um sistema de condensação desses gases, para que sejam convertidos em estado líquido.

Figura 9 – Autoclave vertical

Fonte: Autor (2024)

Dentro do reator, para este estudo da pirólise em poda de jambolão, inicialmente foi adotada uma temperatura de 150 °C com uma taxa de aquecimento de 20 °C/min. Após chegar na temperatura inicial, o reator (Figura 10) manteve a temperatura por 15 minutos e seguiu aquecendo com a mesma taxa até a temperatura de processo. Nessa pesquisa foram adotadas duas temperaturas de pirólise (550 e 650 °C). O tempo de reação após alcançar a temperatura determinada foi de 30 minutos.

Figura 10 – Sistema completo para pirólise



Fonte: Autor (2024)

3.3.1. Balanço de massa

Para a realização do balanço de massa foi considerada a massa de entrada e saída do processo pirolítico, seguindo o princípio da Lei de Conservação de Massa de Antoine Lavoisier. Foi, então, aferido o peso de biomassa que entrou no reator e o peso do carvão obtido após o procedimento, calculando o balanço de massa (Equação 6) e o rendimento (Equação 7).

$$M_c = M_e - M_s \quad (\text{Equação 6})$$

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{M_c}{M_e} * 100 \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

M_c = massa do carvão;

M_e = massa de entrada;

M_s = massa de saída (em gramas);

} **(g)**

3.4. CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO OBTIDO

A caracterização do carvão foi realizada de acordo com os métodos descritos a seguir, semelhante à da biomassa.

3.4.1. Densidade

O método utilizado para determinação da densidade aparente foi o mesmo definido para a determinação da densidade da poda de jambolão triturada.

3.4.2. Teor de cinzas

Para obtenção do teor de cinzas do carvão, foi descrito anteriormente para a determinação do teor de cinzas da poda de jambolão triturada.

3.4.3. Umidade

Seguindo a norma ASTM D 3173-85, foi determinada a umidade do carvão, de acordo com o método descrito anteriormente para a biomassa.

3.4.4. Material volátil

Foi possível obter o teor de material volátil descrito anteriormente para a determinação do teor de material volátil da biomassa.

3.4.5. Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi calculado através da metodologia descrita anteriormente na caracterização da biomassa.

3.5. ENSAIO DE ADSORÇÃO

Para a realização do teste de adsorção, o Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética – LARSEN – IFTO/ Campus Palmas foi local para o experimento. Foi utilizado uma mesa de agitação com o carvão ativado produzido nessa pesquisa obtido na temperatura de 650 °C e taxa de aquecimento igual a 30 °C/min, na forma de pó, com granulometria de 0,45 mm.

Foi aplicado um planejamento experimental do tipo Delineamento de Faces Centradas para se verificar os efeitos de duas variáveis independentes (massa de carvão e concentração da solução do corante) no teste de adsorção. A Tabela 1 representa os níveis dos fatores que foram empregados.

Tabela 1 – Fatores e níveis empregados

Fatores	Níveis		
	(-1)	(0)	(+1)
Massa do Carvão (g)	0,50	0,75	1
Concentração do Corante (mg/L)	20	60	100

Fonte: Autor (2024)

O número de experimentos necessários para a análise foi totalizado a 11 experimentações, englobando todas as combinações de níveis possíveis, além dos três pontos centrais. Desse modo, os frascos de Erlenmeyer foram numerados e preenchidos (Figura 11), seguindo a Tabela 2.

Figura 11 – Frascos sendo preparados para o experimento

Fonte: Autor (2024)

Foram realizados 11 ensaios, sendo 3 deles no ponto central do Planejamento Experimental, de acordo com a Tabela 2. As respostas obtidas foram: (a) absorvância do filtrado, (b) eficiência de remoção (E) e (c) razão de adsorção (Q).

Tabela 2 – Ordem dos experimentos no planejamento experimental

Ordem dos Experimentos	X ₁ (Massa de carvão)	X ₂ (Concentração do corante)
1	-1(0,50)	-1(20)
2	1(1,00)	-1(20)
3	-1(0,50)	1(100)
4	1(1,00)	1(100)
5	-1(0,50)	0(60)
6	1(1,00)	0(60)
7	0(0,75)	-1(20)
8	0(0,75)	1(100)
9	0(0,75)	0(60)
10	0(0,75)	0(60)
11	0(0,75)	0(60)

Fonte: Autor (2024)

O ensaio foi realizado em uma mesa agitadora orbital modelo “Shaker TE 141” (Figura 12), durante 30 minutos com uma rotação igual a 30 rpm.

Figura 12: Mesa agitadora orbital modelo “Shaker TE 141”

Fonte: Autor (2024)

Após o processo de agitação, os conteúdos dos recipientes foram despejados em funis de vidro com papel filtro qualitativo (Figura 13), com intuito de realizar a filtração, separando as partículas de carvão e o azul de metileno já adsorvido.

Figura 13 – Processo de filtração da substância adsorvida



Fonte: Autor (2024)

Após o teste de adsorção, as amostras filtradas em papel analítico foram analisadas em um espectrofotômetro (Figura 14), sendo responsável por medir a absorvância da substância para o comprimento de onda de 660 nm.

Figura 14: Espectrofotômetro modelo Hach DR 6000 com amostra introduzida



Fonte: Autor (2024)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização da Biomassa

As características químicas da poda do Jambolão são apresentadas a seguir. Os resultados foram obtidos utilizando metodologia aplicada (apresentada no capítulo três desta pesquisa). A caracterização química da biomassa foi feita através de várias análises, incluindo a determinação do teor de umidade, cinzas, materiais voláteis, carbono fixo e adsorção.

4.1.1 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 temperaturas próximas a 100 °C. Têm-se que a umidade está relacionada com a capacidade de combustão do material, sendo grandezas inversamente proporcionais. Almeida (2008) definiu que biomassas com umidade inferior a 10% como adequadas para processos de transformação termoquímica. Foi obtido um valor de 2,2% para o teor de umidade da poda do jambolão, levando a concluir que após a secagem, é uma biomassa adequada para combustão e processos como pirólise por apresentar uma baixa umidade.

O teor de cinzas diz respeito ao percentual de compostos inorgânicos na biomassa, dentre estes, cálcio, ferro, fósforo, magnésio e sódio, por exemplo. Para a obtenção desse valor, submete-se a biomassa a uma combustão em temperaturas na faixa de 800 °C, na qual os componentes orgânicos reagem com o oxigênio, restando somente material inorgânico. Para a poda do jambolão, o valor obtido para esse parâmetro foi de 2,3%. De acordo com Castro (2009), um baixo teor de cinzas é uma característica muito desejada em um bom precursor de carvões ativados. Assim, os resultados obtidos são satisfatórios, pois a biomassa apresentou características padronizadas e recomendadas pela literatura.

No caso do teor de material volátil, é obtido o percentual dos materiais que se volatilizam nas temperaturas de 850°C, o valor é diretamente proporcional à reatividade da biomassa. Nesse parâmetro, o valor obtido para a poda de jambolão foi de 81,1%.

O teor de carbono fixo da poda de jambolão triturado foi de 14,4%, e diz respeito ao material restante após a liberação dos materiais voláteis, sem a umidade e as cinzas. Esse parâmetro está diretamente associado ao teor de lignina, explicado possivelmente pelo fato deste composto ser mais resistente à degradação térmica, ao ser comparado com a celulose e à hemicelulose. O valor encontrado é bem superior ao encontrado por Pedroza *et al.* (2021) (7%), devido provavelmente às características químicas da biomassa empregada na pesquisa.

Lôbo (2021), produziu carvão ativado a partir da pirólise da poda de jambolão, e obteve resultados de adsorção que apontam para o uso no tratamento de águas cinzas. O autor obteve valores mais altos de umidade (5,97%) e valores semelhantes de material volátil (81,9%), da mesma forma que a poda de jambolão, indicando que essa biomassa é adequada para o processo de pirólise e o carvão obtido tem alto poder de adsorção.

A Tabela 3 expõe os valores de análise imediata da biomassa encontrados neste trabalho em comparação com outros autores.

Tabela 3 – Comparativo entre trabalhos de análise imediata da biomassa

Variável analítica	Biomassa desta pesquisa (<i>Syzygium cumini</i>)	Outros autores	
		Lôbo, (2021) ^(a)	Pedroza <i>et al.</i> (2021) (b)
Umidade (%)	2,2	5,97	6,4
Material volátil (%)	81,1	81,9	80,0
Teor de cinzas (%)	2,3	0,66	6,5
Carbono fixo (%)	14,4	11,47	7,1

^(a)Biomassa a partir da poda de jambolão;

^(b) Biomassa a partir de poda de árvores na região amazônica brasileira.

Fonte: Autor (2024)

4.2 Rendimento do Carvão Ativado da Poda do Jambolão

De acordo com Silva (2009), a eficiência dos carvões na adsorção é afetada pela presença de umidade, uma vez que uma parte dos poros que poderiam estar disponíveis para o processo de adsorção fica ocupada por moléculas de água. Além disso, quanto maior o teor de umidade menor o poder calorífico do carvão ativado (Basso, 2017). Segundo Marton (2002), o teor de umidade máximo de carvões ativados comerciais é de 10%, assim, os valores médios de teor de umidade dos carvões obtidos são considerados satisfatórios.

Os rendimentos de carvão obtidos no ensaio de pirólise a 550° e 650° foram de respectivamente 26,47% e 25,8%.

Após os processos de pirólise, o peso de carvão produzido foi obtido por diferença entre os pesos de entrada e saída dos procedimentos, analisando o rendimento, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Comparativos entre rendimentos de carvão ativado 550 °C e 650 °C

Temperatura de pirólise	Rendimento de carvão (%)	Outros autores	
		Lôbo, (2021) ^(a)	Pedroza <i>et al.</i> (2021) ^(b)
550°C	26,47	26,26	33,93
650°C	25,8	17,47	32,07

^(a) Carvão produzido a partir pirólise de jambolão a 650°C

^(b) Carvão produzido a partir de poda de árvores na região amazônica brasileira a 640°C

Fonte: Autor (2024)

Desse modo, percebe-se que o processo de pirólise a 550 °C produziu 17,08 g de carvão ativado, sendo a massa de entrada da poda de jambolão igual a 64,52 g apresentando, assim, um rendimento de 26,47%. Já o carvão produzido a 650 °C teve uma massa de 32,08, a partir de 125,3 g de biomassa inserida, resultando em 25,8% de rendimento.

Esses valores encontrados se assemelham ao de Lôbo (2021), que realizou 15 pirólises da poda de jambolão em diferentes condições, encontrando um rendimento

médio de 21,8%.

Assim, é perceptível que a eficiência produtiva encontrada neste trabalho é compatível com a literatura analisada. Dessa forma, com o rendimento médio constatado e com a análise da perda de massa, uma tonelada de poda de jambolão em base seca, seria capaz de gerar cerca de 264 kg de carvão ativado produzido a 550 °C ou 258 kg de carvão processado a 650 °C. Segundo Machado (2019), a produção atualmente de carvão ativado produzido pela Indústria Tobasa, chega à 300 toneladas/mês, com o preço estimando variando de 5,00 – 12,00 R\$/kg de acordo à granulometria do mesmo.

Dessa forma, o material utilizado da poda de jambolão, por ser um resíduo de matéria orgânica, ao ser transformado em carvão ativado, se torna um material de valor econômico agregado. Portanto, a partir de uma tonelada de poda de jambolão em base seca que é capaz de gerar cerca de 258kg de carvão ativado, é facilmente comercializado por em volta de R\$ 3.096,00.

4.3 Caracterização do Carvão

De forma análoga ao feito com a biomassa, os carvões ativados produzidos em nas duas temperaturas passaram pelos testes de análise imediata, na Tabela 5.

A poda do *Syzygium cumini* apresentou ser satisfatória em termos dos resultados de umidade para potencial calorífico do carvão ativado. Lôbo (2021) verificou por meio de ensaios que o teor de cinzas do carvão ativado comercial foi de 2,5%, logo fazendo uma breve comparação com os resultados obtidos, pode-se perceber que os carvões provenientes da pirólise da poda do jambolão a 550 e 650°C obtiveram bons resultados de teor de cinza, 9,1% e 9,7% respectivamente.

Tabela 5 – Comparativo entre trabalhos de análise de carvão ativado

Variável analítica	Carvão 1 (550 °C)	Carvão 2 (650 °C)	Outros autores	
			Lôbo, (2021) ^(a)	Pedroza et al. (2021) ^(b)
Umidade (%)	5,7	5,1	7,7	-
Material volátil (%)	25,5	18,0	25	24,5
Cinzas (%)	9,1	9,7	2,5	18,3
Carbono fixo (%)	59,7	67,2	64,8	57,2

^(a) Carvão produzido a partir pirólise de jambolão a 650°C

^(b) Carvão produzido a partir de poda de árvores a 640°C

Fonte: Autor (2024)

Após a pirólise da biomassa, o teor de material volátil teve uma redução de 77,8%, o teor de cinzas apresentou um aumento de 321,73% e o carbono fixo teve um incremento de 366,6%.

Lôbo (2021), também observou em seu trabalho com a poda de jambolão, redução no teor de umidade e no teor de material volátil, além de um aumento no teor de cinzas e no carbono fixo, apresentando assim, resultados esperados de um processo de pirólise.

Desse modo, os resultados obtidos na análise imediata dos carvões são semelhantes aos encontrados na literatura. Se comparado à biomassa, os carvões apresentaram um baixo teor de voláteis, cerca de 22%, já que boa parte dessas substâncias são volatilizadas durante a pirólise.

De acordo com Silva (2009), é recomendado que se tenha uma baixa umidade no carvão ativado, já que as moléculas de água ocupariam os espaços destinados a adsorção da substância alvo.

Segundo Scroder (2007), a presença de um teor de cinzas excessivo pode prejudicar o carvão, pois pode levar à obstrução dos poros do carvão ativado, reduzindo sua área superficial.

Assim, os resultados da análise imediata são adequados, tanto com relação ao comparativo com outros trabalhos, quanto com relação às recomendações de outros autores.

4.4. Ensaio de Adsorção

Para o ensaio de adsorção com o carvão ativado proveniente da pirólise da biomassa da poda de jambolão (650°C), foi obtido como resultado os parâmetros de absorvância (Y1) e capacidade de adsorção (Q), dado em mg/g, conforme a tabela.

Na Tabela 6 estão apresentados os resultados do ensaio de adsorção realizado com o delineamento de faces centradas, conforme apresentado na metodologia, para diferentes concentrações de corante e quantidade de carvão.

Tabela 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)	Absorvância (-)	Eficiência de remoção (%)	Razão de adsorção (mg/g)
1	0,50	20	0,08	94,95	1,14
2	1	20	0,16	90,33	0,54
3	0,50	100	0,05	99,41	5,96
4	1	100	0,02	99,74	2,99
5	0,50	60	0,05	98,97	3,56
6	1	60	0,12	97,52	1,76
7	0,75	20	0,08	95,14	0,76
8	0,75	100	0,02	99,82	3,99
9	0,75	60	0,04	99,22	2,38
10	0,75	60	0,10	98,01	2,35
11	0,75	60	0,04	99,16	2,38

Fonte: Autor (2024)

A Figura 15 mostra a solução de corante com concentração de 10mg/L antes e após o ensaio de adsorção com a massa de carvão de 1 g.

Figura 15 – Solução de concentração 10mg/L antes e após a adsorção



Fonte: Autor (2024)

Com a inserção desses dados no programa “Protimiza Experimental Design”, foi possível gerar modelos de regressão linear, para explicar a relação das respostas obtidas com as diferentes massas de carvão e concentração de corante experimentadas.

4.4.1 Razão de Adsorção (Q)

Na Tabela 7, estão apresentados os regressores descobertos para a produção do modelo relacionado à variável razão de adsorção (Q). Essa métrica está ligada à quantidade de corante retida em cada fração de carvão ativado, que foi separado durante o processo de filtração. Assim, alcançar razões altas é o ideal, pois elas indicam uma eficácia maior de adsorção.

Tabela 7 – Coeficientes de regressão do Planejamento DFC para definição da Razão de adsorção do carvão ativado da poda de jambolão

Fatores	Coeficiente de Regressão	Erro Padrão	t-calculado	p-valor
Média	2,37	0,05	43,81	0,0000
X ₁	-0,90	0,04	-20,80	0,0000
X ₁ ²	0,29	0,07	4,30	0,0077
X ₂	1,75	0,04	40,63	0,0000
X ₂ ²	0,00	0,07	0,04	0,9666
X ₁ – X ₂	-0,59	0,05	-11,25	0,0001

Fonte: Autor (2024)

Com isso, foi definida a equação de regressão linear para o modelo estatístico referente a razão de adsorção (Equação 8).

$$Q = 2,37 - 0,90_{x_1} + 0,29_{x_1^2} + 1,75_{x_2} + 0_{x_2^2} - 0,59_{x_1 * x_2} \quad (\text{Equação 8})$$

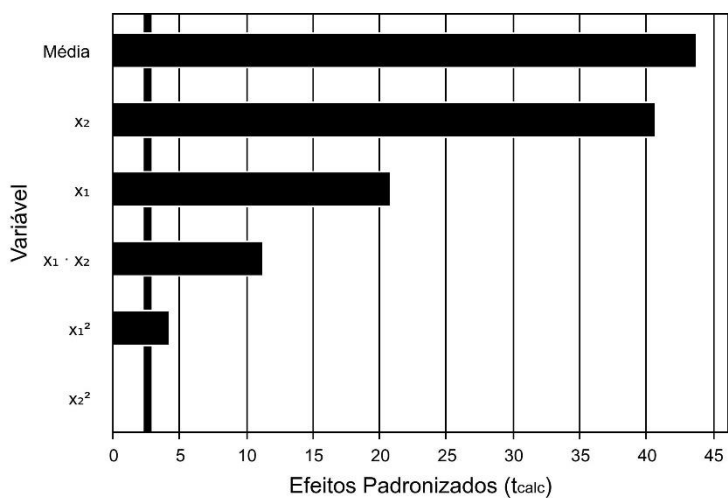
Onde:

Q = razão de adsorção;

x_1 = massa de carvão (codificada);

x_2 = concentração do corante (codificada);

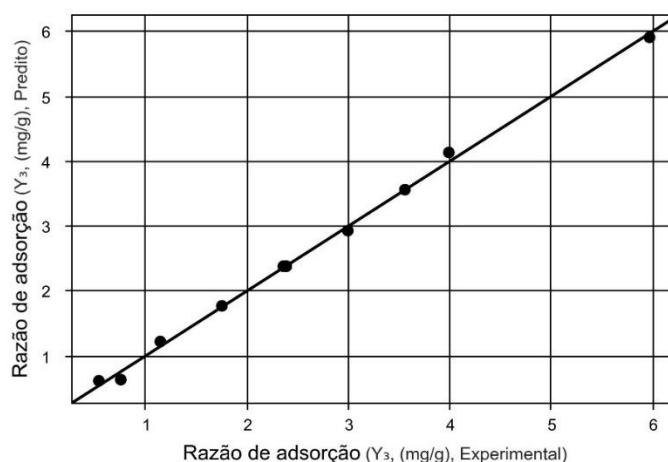
Por meio do Diagrama de Pareto do Gráfico 1, pode-se analisar as variáveis mais significativas do modelo para o valor da Razão de adsorção do carvão obtido da pirólise da poda do jambolão.

Gráfico 1 – Contribuição das variáveis para a razão de adsorção

Fonte: Autor (2024)

Assim, através do baixo p-valor associado e do gráfico de Pareto, pode-se observar que a concentração do azul de metileno (X_2) se destaca como a variável independente mais significativa estatisticamente para esta resposta, seguida da massa de carvão (X_1) utilizada.

Como é possível observar no gráfico de predição (Gráfico 2), os dados experimentais apresentam excelente aderência com os resultados previstos no modelo, com pontos interceptando ou muito próximos da diagonal de referência.

Gráfico 2 – Gráfico de predição do modelo da razão de adsorção

Fonte: Autor (2024)

A Tabela 8 informa os resultados do teste da análise de variância (ANOVA) para a razão da adsorção do carvão ativado, esta Tabela tem o intuito de demonstrar se o modelo é estatisticamente significativo.

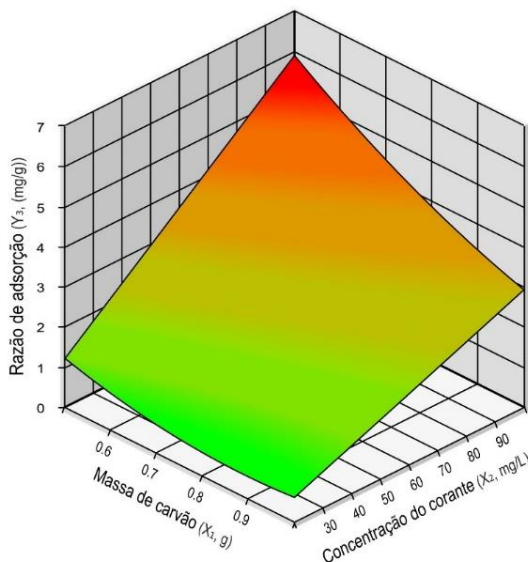
Tabela 8: Resultado da razão de adsorção das amostras por ANOVA.

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado Médio	F calculado	P valor
Regressão	24,9	5	5,0	446,0	0,0000
Resíduos	0,1	5	0,0	-	-
Falta de ajuste	0,1	3	0,0	68,6	0,01439
Erro puro	0,0	2	0,0	-	-
Total	24,9	10	-	-	-

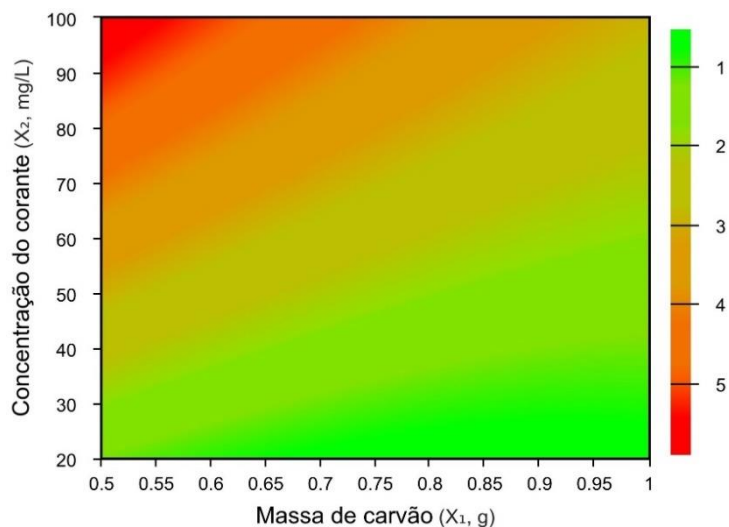
Fonte: Autor (2024)

Foi obtido, para esse modelo referente a adsorção, um coeficiente de determinação (R^2) de 99,78% através do teste. Tal valor é considerado bem satisfatório, pois uma porcentagem tão elevada indica que a formulação estatística foi capaz de explicar grande parte da variação presente nos dados experimentados, garantindo uma qualidade superior de ajuste do modelo à realidade.

Nos Gráficos 3 e 4, é apresentada a relação encontrada entre as variáveis: massa de carvão (X_1), concentração do corante (X_2), e a razão de adsorção (Q). Na escala de cores, o verde representa os valores de menor razão de adsorção e o vermelho de maior.

Gráfico 3 – Relação tridimensional entre a razão de adsorção e as variáveis

Fonte: Autor (2024)

Gráfico 4 – Relação Razão de adsorção x Variáveis independentes

Fonte: Autor (2024)

Nessa perspectiva, realizando uma análise gráfica, infere-se que o carvão ativado responde de forma eficiente em todas as quantias de massa estudadas, tendo um desempenho melhor com reduzidas quantidades de massa. Nesse sentido, quanto maior a concentração de azul de metileno disponível, maior a razão de adsorção desse carvão produzido a partir da pirólise a 650 °C.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados encontrados, a análise média das amostras de biomassa, devidamente testadas e caracterizadas se mostraram bastante satisfatórias quando comparadas às referências bibliográficas encontradas que são relacionadas ao tema. Evidencia-se que, o processo de adsorção do carvão aqui estudado demonstra ser uma alternativa economicamente e produtivamente viável para a comercialização, uma vez que o material utilizado se encontra em abundância sem utilidade econômica.

A biomassa utilizada apresentou baixo nível de teor de umidade (2,2%) e alto nível de teor de materiais voláteis (81,1%) em sua composição, características essenciais para o processo de pirólise, sendo mais eficiente havendo um menor consumo de energia.

A pirólise da poda de jambolão obteve carvões com especificações que tornam o processo ainda mais atrativo, como reduzidos teores de umidade e cinzas (<5%), aumentando ainda mais a adsorção das substâncias. O carvão ativado gerado a 650 °C demonstrou uma alta razão de adsorção (5,96 mg/g), utilizando a mínima quantidade de massa de carvão (0,50 g). Além disso, os processos termoquímicos ofereceram rendimentos adequados e compatíveis com a literatura (> 20%), conseguindo produzir, assim, cerca de 258 kg de carvão ativado para cada tonelada de biomassa em base seca.

Essas sugestões visam explorar plenamente o potencial do carvão ativado derivado da biomassa do *Syzygium cumini*, buscando não apenas consolidar sua eficácia em aplicações específicas, mas também promover a inovação e a sustentabilidade em escala mais ampla.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBANESE, L. *et al.* **Hydrodynamic cavitation as an energy efficient process to increase biochar surface area and porosity: A case study.** Journal of Cleaner Production, v. 210, p. 159–169, 10 fev. 2019b.

ALMEIDA, M. B. B. de. **Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana-de-açúcar e seu co-processamento com gás-óleo em craqueamento catalítico.** Dissertação (Mestrado em Ciências em tecnologia de processos químicos e bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 167, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11834: **Carvão ativado pulverizado.** Rio de Janeiro, 1991b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12073: **Carvão ativado pulverizado. Determinação do número de iodo.** Rio de Janeiro, 1991a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: **Resíduos sólidos Classificação.** Rio de Janeiro, 2004.

ASTM D3173 87. **Standard Method for Determination of Moisture Content in Biomass, Society of Testing Materials International.** West Conshohocken 2003.

ASTM D3174 04. **Standard method for ash in the analysis sample of coal and coke.** West Conshohocken, 2004.

ASTM D3175 07. **Standard method for volatile matter in the analysis sample of coal.** West Conshohocken, 2007.

AYYANAR, M.; SUBASH-BABU, P. *Syzygium cumini* (L.) **Skeels: a review of its phytochemical constituents and traditional uses.** Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine, v.2, p. 240-246, 2012.

BASSO, S. **Análise do Carvão Vegetal para Uso Doméstico**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, p. 42, 2017.

CASTRO, C. S. **Preparação de carvão ativado a partir de borra de café: uso como adsorvente e como suporte catalítico para a remoção de poluentes orgânicos em meio aquoso**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2009.

CAVALCANTI, N.B. **Influência de diferentes substratos na emergência e crescimento de plântulas de jambolão (*Syzygium jambolanum* lam.)**. Engenharia Ambiental – Espírito Santo do Pinhal, v. 7, n. 2, p. 241-251, 2010.

COELHO, E.M., AZEVEDO, L.C. **Comparação entre técnicas de secagem para obtenção de farinha a partir da casca de manga cv. Tommy Atkins**; VII CONNEPI, 2012.

FIGUEIREDO, T. A. R. **Caracterização Nutricional e de Compostos Bioativos Extraídos da Polpa com Casca da Fruta Jambolão- *Syzygium cumini***. Santos: Instituto Saúde e Sociedade, Universidade Federal de São Paulo; 2020.

GOMES, R.P. **Fruticultura brasileira**. 9. ed. São Paulo: Nobel, 1983. 269. p.

GRANADA, G. G.; ZAMBIAZI, R. C.; MENDONÇA, C. R. B. **Abacaxi: produção, mercado e subprodutos**. Boletim do Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos, Curitiba, v. 22, n. 2, p. 405-422, 2004.

GURGEL, J.T.A.; SOUBIHE SOBRINHO, J. **Poliembrionia em mirtáceas frutíferas**. Bragantia, v. 11, n. 4-6, p. 141-163, 1951.

LAGEM PEREZ, Juan Miguel. **Testes em uma planta de pirólise rápida de biomassa em leito fluidizado: critérios para sua otimização**. 2004.

LAGO, E. S; GOMES, E; SILVA, R. **Produção de geleia de jambolão (*Syzygium cumini* Lamarck): processamento, parâmetros físico-químicos e avaliação sensorial**. Centro de ciências e tecnologia de alimentos, Universidade Estadual Paulistas, 2006.

LETERME, P.; BULDGEN, A.; ESTRADA, F.; LONDOÑO, A. M. **Mineral content of tropical fruits and unconventional foods of the Andes and the rain forest of Colombia**. Food Chemistry, v.95, n.4, p. 644–652, 2006.

LÔBO, R. N. **Degradação térmica de podas de árvores (*Syzygium cumini*) visando a produção de carvão ativado para uso industrial**. / Ranyere do Nascimento Lôbo. – Palmas: Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas – Curso de Pós-Graduação (Mestrado) Profissional em Engenharia Ambiental, 2021.

LUCAS, E.J.; BELSHAM, S.R.; LUGHADHA, E.N.; ORLOVICH, D.A.; SAKURAGUI, C.M.; CHASE, M.W.; WILSON, P.G. **Phylogenetic patterns in the fleshy-fruited Myrtaceae – preliminary molecular evidence**. Plant Systematics and Evolution v. 251, n. 1, p. 35-51, 2005.

MACHADO, P. R. S. **Prospecção De Bioprodutos a Partir Da Degradação Termoquímica Do Sabugo De Milho Visando Aplicação Industrial**. p. 5–7, 2019.

MAMANÍ, A. *et al.* **Highly microporous carbons from olive tree pruning: Optimization of chemical activation conditions**. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 7, n. 1, 1 fev. 2019.

MARCHIORI, J.N.C.; SOBRAL, M. **Dendrologia das angiospermas - Myrtales**. Santa Maria: Editora UFSM, 1997. 304 p.

MARTON, J. M. **Avaliação de diferentes carvões ativos e das condições de adsorção no tratamento do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana para obtenção biotecnológica de xilitol**. Tese de Mestrado (Departamento de Biotecnologia - Pós-graduação em Biotecnologia Industrial). Lorena, p. 143, 2002.

MESA PEREZ, Juan Miguel. **Testes em uma planta de pirólise rápida de biomassa em leito fluidizado: critérios para sua otimização.** 2004

MEZZOMO, N.; MARTÍNEZ, J.; FERREIRA, S. R. S. **Supercritical fluid extraction of peach (*Prunus pérsica*) almond oil: Kinetics, mathematical modeling and scale-up.** J. of Supercritical Fluids, v. 51, p. 10-6, 2009.

MIGLIATO, K. F.; MOREIRA, R. R. D.; MELLO, J. C. P.; *et al.* (2007). **Controle da qualidade do fruto de *Syzygium cumini* (L.) Skeels.** Revista Brasileira de Farmacognosia, v. 17, p. 94-101.

MORTON, J. F. **The ocean-going noni, or Indian Mulberry (*Morinda citrifolia*, Rubiaceae) and some of its “colorful” relatives.** Economic Botany, v. 46, n. 3, p. 241-256, 1992.

NEVES, B. S. S. **Casca do jambolão: caracterização, planejamento e desenvolvimento de embalagens biodegradáveis ativas.** 2017. 139 f. Tese (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2017.

PEDROZA, Marcelo M. et al. **Produção de carvão ativado a partir de podas de árvores na região amazônica do Brasil para tratamento de águas cinzas.** J. appl. res. technol, Cidade do México, v. 1, pág. 49-65, 2021. Disponível em <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-64232021000100049&lng=es&nrm=iso>. Acesso em 15 mai. 2024. Epub 30 de julho de 2021.

PEPATO, M. T.; FOLGADO, V. B. B.; KETTELHUT, I. C.; BRUNETTI, I. L. **Lack of antidiabetic effect of *Eugenia jambolana* leaf decoction on rat streptozotocin diabetes.** Brazilian J. Med. Biol. Res. v. 34, n. 3, p. 389 – 395, 2001.

PERSON, Giselda. **Jambolão: o frutinho que tinge tudo de roxo**. G1 Globo, 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/campinas-regiao/terra-da-gente/noticia/2023/08/04/jambolao-o-frutinho-que-tinge-tudo-de-roxo.ghtml>. Acesso em: 25 mar. 2024.

SANTOS, V. M., et al. **Activated carbons from pequi and coconut shell biomass as adsorbents for Cr (VI) removal: Adsorption equilibrium and kinetic studies**. Chemosphere, p. 235, 573-582, 2019.

SCRODER, E. *et al.* **Experiment on the Generation of activated carbon from Biomass**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis Vol 79, 2007

SILVA, Marciéli. **Propagação de jamboleiro [Syzygium cumini (L.) Skeels]**. 2017. 111 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Área de Concentração: Produção vegetal), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

SILVA, J. da. **Estudo da eficiência e aplicabilidade de carvão ativado resultante de pirólise de casca de arroz em barreiras reativas na remoção de contaminantes em solos**. Tese de Doutorado (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) – UFRS. Porto Alegre, p. 204, 2009.

SOBRAL, M.; PROENÇA, C.; SOUZA, M.; MAZINE, F.; LUCAS, E. **Myrtaceae**. 2010. p. 1301-1330.

NABAIS, J; LAGINHAS, C.; RIBEIRO CARROTT, M. M. L.; CARROTT, P. J. M.; CRESPO AMORÓS, J. E.; NADAL GISBERT, A. V. **Surface and porous characterisation of activated carbons made from a novel biomass precursor, the esparto grass**. Applied Surface Science, 2013.

VIZZOTTO, M.; FETTER, R. **Jambolão: o poderoso antioxidante**. 2009. Disponível em: http://www.cpact.embrapa.br/imprensa/artigos/2009/jambolao_Marcia.pdf. Acesso em 25 mar 2024.

VIZZOTTO, M.; COUTO PEREIRA, M. **Caracterização das propriedades funcionais do jambolão**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2008. 26 p. (Embrapa Clima Temperado. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 79).

YAMAN, Serdar. **Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks**. Energy conversion and management, v. 45, n. 5, p. 651-671, 2004.