



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

VICTOR VINICIUS MENEZES SANTOS

**AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO DA CASCA DO
BABAÇU ATRAVÉS DO PROCESSO DE PIRÓLISE.**

**PALMAS
2023**

VICTOR VINICIUS MENEZES SANTOS

**AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO DA CASCA DO
BABAÇU ATRAVÉS DO PROCESSO DE PIRÓLISE.**

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

PALMAS

2023

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

S237a Santos, Victor Vinicius Menezes
Avaliação da produção de carvão ativado da casca do babaçu
através do processo de pirólise / Victor Vinicius Menezes Santos. –
Palmas, TO, 2023.
49 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, 2023.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Carvão ativado. 2. Babaçu. 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).

FOLHA DE APROVAÇÃO

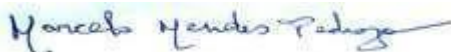
VICTOR VINICIUS MENEZES SANTOS

AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO DA CASCA DO BABAÇU ATRAVÉS DO PROCESSO DE PIRÓLISE.

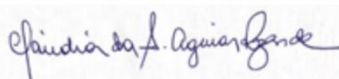
Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Coordenação do curso
de Engenharia Civil Instituto Federal
do Tocantins - Campus Palmas,
como exigência à obtenção do grau
em Engenheiro Civil.

Aprovado em: 25/09/2023

BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador (IFTO)



Prof.^a Dra. Claudia da Silva A. Rezende



Eng. Me. Ranyere do Nascimento Lôbo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Renata e a nossa filha Pietra, pelo amor incondicional que me proporcionaram ao longo dessa caminhada, e que sempre estiveram ao meu lado, compreendendo minhas ausências.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a DEUS, por ter me abençoado todos os dias da minha vida e que plantou dentro do meu coração a sementinha da sabedoria e a fez brotar.

Agradeço a minha mãe Betânia que foi minha base no início dessa trajetória e que sempre me incentivou a me tornar uma pessoa melhor, te amo mãe.

Agradeço minha vó Santana, que não media esforços para me ajudar sempre que podia e me dava conselhos sobre estudar, te amo vó.

Gostaria de agradecer aos meus falecidos (vô João e pai Genilson), que foram fontes de inspiração profissional, onde atingiram excelência no que faziam, nos limites em que lhes foram proporcionados.

Aos meus familiares e amigos, que sempre torceram por mim, me incentivando e me mostrando o quão importante é minha existência neste mundo.

Ao Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedrosa, meu orientador, grande pessoa e profissional que abraçou esse desafio, muito obrigado professor, pela dedicação, paciência e grande colaboração, seus ensinamentos foram de grande aprendizado e crescimento profissional.

A Prof.^a Dra. Claudia da Silva A. Rezende e ao Eng. Me. Ranyere do Nascimento Lôbo, que aceitaram participar da banca, contribuindo bastante com seus conhecimentos para o meu crescimento.

Aos meus professores, que compartilharam conhecimento e inspiração, moldando meu percurso acadêmico e intelectual.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO), Campus Palmas, e todos os envolvidos na concretização desse sonho.

A todos, meu imenso agradecimento!

RESUMO

O crescimento da produção nos setores industriais e agrícolas tem contribuído para o aumento da geração de resíduos, o que representa um problema global. Na indústria de processamento do coco babaçu, o foco principal está na extração do óleo das amêndoas, resultando em uma quantidade significativa de resíduos, principalmente as cascas. Infelizmente, esses resíduos costumam ser descartados de maneira inadequada. Além disso, a escassez de água tratada e a dificuldade de acesso à água potável por muitas pessoas tornam a produção de carvão ativado a partir das cascas do babaçu uma alternativa interessante para o tratamento de água, proporcionando uma destinação adequada para esses resíduos. O objetivo deste estudo será realizar a pirólise através da degradação térmica das cascas do coco babaçu, visando à obtenção de carvão ativado, que irá ser avaliado como adsorvente de corantes químicos. Para isso, a biomassa seca foi caracterizada por meio das análises imediatas, resultando nos seguintes valores: teor de umidade (8,63%), teor de cinzas (1,55%), material volátil (72,83%) e teor de carbono fixo (17,29%). As cascas do coco babaçu foram submetidas à pirólise em um reator de leito fixo, em duas temperaturas distintas (600 °C e 700 °C), durante 30 minutos de degradação, a uma taxa de aquecimento de 30 °C/min. O rendimento do carvão ativado foi de (23,68%) para a pirólise a 600 °C e de 22,21% para a pirólise a 700°C, o carvão ativado foi caracterizado por meio das análises imediatas, resultando nos seguintes valores: teor de umidade (2,07) e (2,65) para o carvão a 600 °C e 700°C, o teor de cinzas de (9,93 %) e (11,39%) para o carvão a 600 °C e 700°C , material volátil (17,94%) e (17,33%) para o carvão a 600 °C e 700°C e o teor de carbono fixo de (70,06%) e (68,63%) para o carvão a 600 °C e 700°C respectivamente. Utilizou-se um planejamento experimental do tipo Delineamento de Faces Centradas (DFC) para investigar os efeitos de duas variáveis independentes massa de carvão (X_1) e concentração da solução de corante (X_2). No teste de adsorção, foi obtido uma eficiência mínima de (98,78%) e máxima de (99,70%), bem como uma razão de adsorção máxima de 7,42 (mg/g), para o carvão ativado pirolisado a 700°C como adsorvente do azul de metileno. Os dados obtidos revelaram que a capacidade de adsorção deste carvão é amplificada significativamente em cenários com menor quantidade de massa e maior concentração de corante azul de metileno. Esses resultados ressaltam não apenas a versatilidade deste material como adsorvente, mas também sua eficiência energética, uma vez que requer uma menor quantidade de material para alcançar resultados notáveis.

Palavras-chave: Biomassa, Babaçu, Pirólise, Carvão ativado, Adsorvente

ABSTRACT

The growth in production in the industrial and agricultural sectors has contributed to an increase in waste generation, which represents a global issue. In the babassu coconut processing industry, the primary focus is on extracting oil from the kernels, resulting in a significant amount of waste, mainly the shells. Unfortunately, these waste materials are often inadequately disposed of. Furthermore, the scarcity of treated water and limited access to clean drinking water for many people make the production of activated carbon from babassu shell an interesting alternative for water treatment, providing a proper disposal method for these residues. The objective of this study is to conduct pyrolysis through the thermal degradation of babassu coconut shells, aiming to obtain activated carbon, which will be evaluated as an adsorbent for chemical dyes. To achieve this, the dried biomass was characterized through proximate analysis, resulting in the following values: moisture content (8.63%), ash content (1.55%), volatile matter (72.83%), and fixed carbon content (17.29%). Babassu coconut shells were subjected to pyrolysis in a fixed-bed reactor at two different temperatures (600°C and 700°C) for a degradation period of 30 minutes, with a heating rate of 30°C/min. The yield of activated carbon was 23.68% for pyrolysis at 600°C and 22.21% for pyrolysis at 700°C. The activated carbon was characterized through proximate analysis, resulting in the following values: moisture content (2.07) and (2.65) for carbon at 600°C and 700°C, ash content (9.93%) and (11.39%) for carbon at 600°C and 700°C, volatile matter (17.94%) and (17.33%) for carbon at 600°C and 700°C, and fixed carbon content (70.06%) and (68.63%) for carbon at 600°C and 700°C, respectively. An experimental design called Central Composite Design (CCD) was used to investigate the effects of two independent variables: carbon mass (X1) and dye solution concentration (X2). In the adsorption test, a minimum efficiency of 98.78% and a maximum of 99.70% were achieved, along with a maximum adsorption capacity of 7.42 (mg/g), for activated carbon pyrolyzed at 700°C as an adsorbent for methylene blue. The data obtained revealed that the adsorption capacity of this carbon is significantly enhanced in scenarios with a lower carbon mass and higher concentration of methylene blue dye. These results highlight not only the versatility of this material as an adsorbent but also its energy efficiency, as it requires a smaller amount of material to achieve remarkable results.

Keywords: Biomass, Babaçu, Pyrolysis, Activated Carbon, Adsorbent.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Percentual da massa que compõe o babaçu	19
Figura 2 - Regiões produtoras de babaçu no brasil.....	20
Figura 3 - Produção de amêndoas de babaçu no Brasil em toneladas	21
Figura 4 – Pirólise e a formação de novos biocombustíveis.....	22
Figura 5 - Atividades a serem realizadas durante a pesquisa	23
Figura 6 - Quebradeiras de coco babaçu	24
Figura 7 - Quebra do coco babaçu	24
Figura 8 - Estufa a ser utilizada para secagem da amostra	25
Figura 9 - Peneiras que serão utilizadas para peneirar a amostra.	25
Figura 10 – Balança de precisão	26
Figura 11 - Dessecador	27
Figura 12 - Aquecimento dos cadinhos a 850°C em forno mufla	28
Figura 13 - Autoclave	30
Figura 14 - Reator de leito fixo	30
Figura 15 - Sistema completo utilizado no processo de pirólise	31
Figura 16 - Shaker TE 141 para ensaio de adsorção	33
Figura 17 – Filtro de papel analítico	34
Figura 18 - Espectrofotômetro	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variáveis e níveis empregados no ensaio de adsorção.....	35
Tabela 2: Dosagem de carvão e concentração do corante para ensaio de adsorção.....	35
Tabela 3: Balanço de massa e rendimento do carvão ativado.	36
Tabela 4: Teor médio de umidade da biomassa e carvão.	37
Tabela 5: Teor médio de cinzas da biomassa e carvão.....	38
Tabela 6: Teor médio de material volátil da biomassa e carvão.	39
Tabela 7: Teor médio de carbono fixo da biomassa e carvão.	40
Tabela 8: Resultado do ensaio de adsorção.....	41
Tabela 9: Coeficientes de regressão para definição da capacidade de adsorção.	42
Tabela 10: ANOVA para a capacidade de adsorção das amostras de carvão ativado.....	44

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Diagrama de Pareto da capacidade de adsorção do carvão da casca do coco babaçu.	43
Gráfico 2: Valores experimentais X valores preditos quanto à capacidade de adsorção do carvão.	43
Gráfico 3: Superfície para capacidade de adsorção em relação à massa de carvão e concentração de corante.	44

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Formula do cálculo da umidade.....	26
Equação 2 – Formula do cálculo do teor de cinzas.....	27
Equação 3 –Formula do cálculo do material volátil.....	28
Equação 4 – Formula do cálculo do teor de carbono	29
Equação 5 – Formula cálculo do balanço de massa.....	31
Equação 6 – Equação resultante da regressão linear	42

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
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
pH	Potencial Hidrogeniônico
RPM	Rotação por Minuto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	PROBLEMA DA PESQUISA.....	16
3	JUSTIFICATIVA	17
4	OBJETIVOS	18
	4.1 Objetivo Geral.....	18
	4.2 Objetivos Específicos.....	18
5	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
	5.1 Características fisiológicas do babaçu	19
	5.2 Produção de babaçu no Brasil.....	20
	5.3 Biomassa para carvão ativado.....	21
	5.4 Pirólise através da degradação termoquímica	22
6	MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
	6.1 Coleta do material	24
	6.2 Caracterização da biomassa.....	25
	6.2.1 Umidade	26
	6.2.2 Teor de cinzas	27
	6.2.3 Material Volátil	28
	6.2.4 Teor de carbono fixo	29
	6.3 Pirólise da casca de babaçu	29
	6.3.1 Balanço de Massa	31
	6.4 Caracterização do carvão obtido.....	32
	6.4.1 Umidade	32
	6.4.2 Teor de cinzas	32
	6.4.3 Material volátil.....	32
	6.4.4 Teor de carbono fixo	32
7	ENSAIO DE ADSORÇÃO	33

8	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
8.1	Balanço de massa do carvão ativado	36
8.2	Umidade.....	36
8.3	Teor de cinzas.....	37
8.4	Teor de material volátil.....	39
8.5	Teor de carbono fixo	40
8.6	Adsorção	41
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

Silva *et al.* (2020), definem o carvão ativado como um material carbonáceo altamente poroso utilizado em vários processos industriais e que a sua produção é um tema de grande interesse, levando em consideração o seu preço e suas aplicações generalizadas.

Uma das principais aplicações do carvão ativado está nos processos de purificação de água e ar, suas propriedades de adsorção o torna eficaz na remoção de impurezas, toxinas entre outros. Além disso, o carvão ativado é comumente utilizado em estações de tratamento de águas residuais, removendo contaminantes orgânicos e melhorando a qualidade da água (VALENCIA, 2007).

Freiras (2014), menciona seu uso como adsorvente em produtos medicinais, no tratamento de overdoses de medicamentos e casos de envenenamento. Também é um componente crucial em máscaras de gás e filtros de ar, protegendo as pessoas de produtos químicos e poluentes.

Outra importante aplicação do carvão ativado é na indústria de alimentos e bebidas, ele atua como agente de purificação, removendo sabores indesejados, odores e impurezas de consumíveis. Também é usado na produção de bebidas alcoólicas para melhorar a claridade e o sabor, conforme destacado por (COSTA *et al.*, 2017).

Na indústria de processamento do coco babaçu, o foco principal é a herança do óleo das amêndoas, o que resulta em uma quantidade significativa de resíduos, especialmente cascas. Infelizmente, esses resíduos são geralmente descartados sem um uso adequado como destacou (SILVA *et al.*, 2020). Sendo assim, utilizar os resíduos provenientes dos processos industriais do coco babaçu é uma alternativa economicamente viável, pois diminui o custo com matéria prima e se torna uma opção sustentável, pois dá finalidade correta para o resíduo gerado.

Logo, o objetivo deste estudo é utilizar a pirólise para degradar termicamente a casca do babaçu, a fim de obter carvão ativado, e em seguida empregar o material adsorvente obtido nessa pesquisa em processo de adsorção.

2 PROBLEMA DA PESQUISA

Os resíduos gerados pela indústria são questões globais relevantes. Além disso, o carvão ativado possui aplicações em diversas cadeias produtivas gerando uma alta demanda, aliado a isto, a fabricação do carvão ativado por vezes é de alto custo por conta da origem e do valor da matéria-prima. Por outro lado, na indústria de processamento do coco babaçu, o foco está na extração do óleo proveniente das amêndoas, gerando uma quantidade significativa de resíduos, principalmente das cascas. Infelizmente, esses resíduos são descartados sem um uso adequado não havendo o aproveitamento integral do fruto.

Diante do exposto, surge a necessidade de avaliar a viabilidade e eficiência do carvão ativado obtido a partir das cascas de babaçu.

3 JUSTIFICATIVA

A produção de carvão ativado é um tema de grande interesse na pesquisa, como destacado por Silva *et al.* (2020), devido ao seu valor econômico e amplas aplicações industriais. Além disso, o carvão ativado, um material carbonáceo altamente poroso, desempenha um papel fundamental em diversos processos industriais, suas propriedades de adsorção o tornam eficaz na remoção de impurezas, toxinas e poluentes de líquidos e gases (VALENCIA, 2007).

No contexto da indústria de processamento do coco babaçu, o enfoque principal é a extração de óleo das amêndoas, o que resulta na geração de uma quantidade considerável de resíduos, especialmente cascas. Infelizmente, como ressaltado por Silva *et al.* (2020), esses resíduos são frequentemente descartados de forma inadequada, sem receber uma utilização adequada.

Portanto, a pesquisa proposta visa explorar a viabilidade econômica e ambiental de utilizar os resíduos provenientes do processamento do coco babaçu na produção de carvão ativado. Isso tem o potencial de reduzir os custos com matéria-prima e promover uma abordagem mais sustentável, ao dar um destino apropriado aos resíduos gerados. Essa pesquisa se justifica pela necessidade de encontrar soluções que agreguem valor econômico e promovam a sustentabilidade em processos industriais, alinhando-se com as demandas atuais por práticas sustentáveis e eficientes.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral

Avaliar o carvão ativado da casca do babaçu obtido através do processo de pirólise e aplicá-lo como adsorvente de corante químico.

4.2 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. Submeter o carvão ativado em processo de adsorção de corante químico.

5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1 Características fisiológicas do babaçu

Segundo Silva *et al.* (2020), babaçu é o nome dado às palmeiras oleaginosas pertencentes à família *Palmae*, especificamente aos gêneros *Orbignya* e *Attalea*. Essas palmeiras são especialmente encontradas nos estados brasileiros do Maranhão, Piauí e Tocantins, onde há extensas áreas de matas com domínio de babaçus, muitas vezes se formando de maneira nativa. Na Figura 1, pode-se observar as partes do fruto babaçu.

Figura 1 - Percentual da massa que compõe o babaçu



Fonte: (Adaptado de SILVA *et al.*, 2020.)

De acordo com Silva *et al.* (2020), a estrutura do babaçu é dividida em epicarpo (12,6%), mesocarpo (20,4%), endocarpo (58,4%) e amêndoas (8,7%). O epicarpo é a camada externa rija e fibrosa um excelente material para queima direta e para a geração de vapor e fonte de fibras. O mesocarpo é rico em amido, da mesma pode-se extrair um material farináceo, que contém grande quantidade

de amido, gera o etanol, além de encontrar aplicação na alimentação animal. O endocarpo que é a camada de estudo, é mais denso e por consequência mais resistente no qual pode-se extrair o carvão ativado. A amêndoa (semente), possui (60%) de óleo, o qual produz biodiesel, além disso, possui um emprego histórico como óleo alimentício e na indústria de cosméticos (EMMERICH *et al.*, 1996).

5.2 Produção de babaçu no Brasil

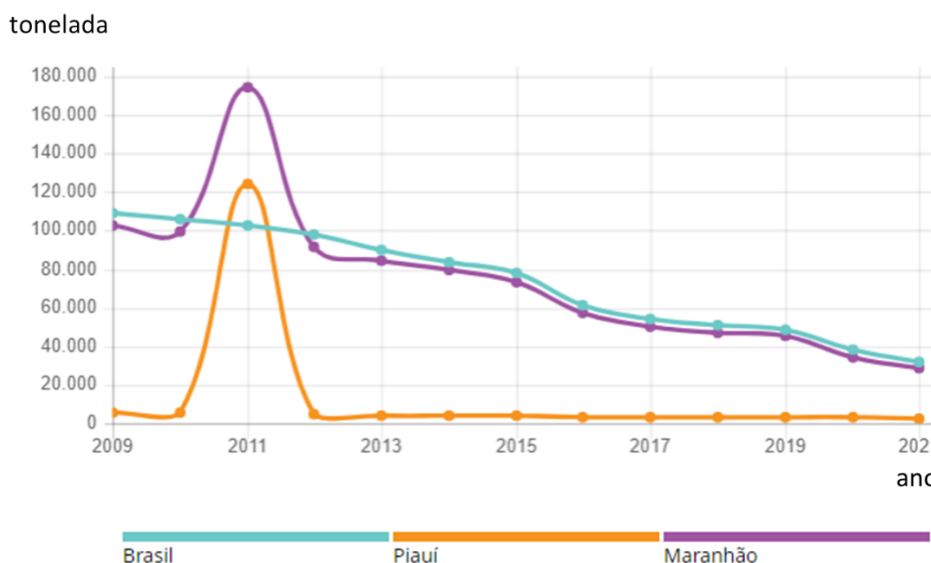
De acordo com Santos (2012), o babaçu é uma cultura nativa do Brasil, encontrada principalmente na região norte e nordeste predominantemente nos estados do Maranhão, Piauí e Tocantins. Essas regiões concentram as maiores extensões de babaçuais (ou cocais) do país, com destaque para o Maranhão, que abrigam aproximadamente um terço da área total dos babaçuais cultivados no Brasil, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Regiões produtoras de babaçu no Brasil



Fonte: (Adaptado de MIC/STI, 1982.)

De acordo com o IBGE (2019), a produção nacional de amêndoas do babaçu em 2019 foi de 48.706 toneladas conforme a Figura 3.

Figura 3 - Produção de amêndoas de babaçu no Brasil em toneladas

Fonte: (Adaptado de IBGE, acesso em 2023.)

Com base na proporção de 8,7% da massa do babaçu é atribuída às amêndoas, estima-se que tenha ocorrido uma produção de aproximadamente 559.839 toneladas do fruto. Além disso, aproximadamente 326.945 toneladas correspondem à produção do endocarpo. É importante destacar que, na maioria dos casos, o endocarpo é descartado durante o processo produtivo, resultando em um aproveitamento inadequado do potencial produtivo do fruto.

5.3 Biomassa para carvão ativado

Segundo Pérez *et al.* (2004), a biomassa pode ser definida como toda matéria orgânica proveniente de fontes vegetais ou animais, enquanto biomassa energética refere-se aos materiais derivados da biomassa que podem ser utilizados para fins energéticos. Sendo assim, a biomassa para carvão ativado é uma matéria-prima de origem biológica que são mantidas a um processo de pirólise, também conhecido como carbonização, para converter a biomassa em carvão.

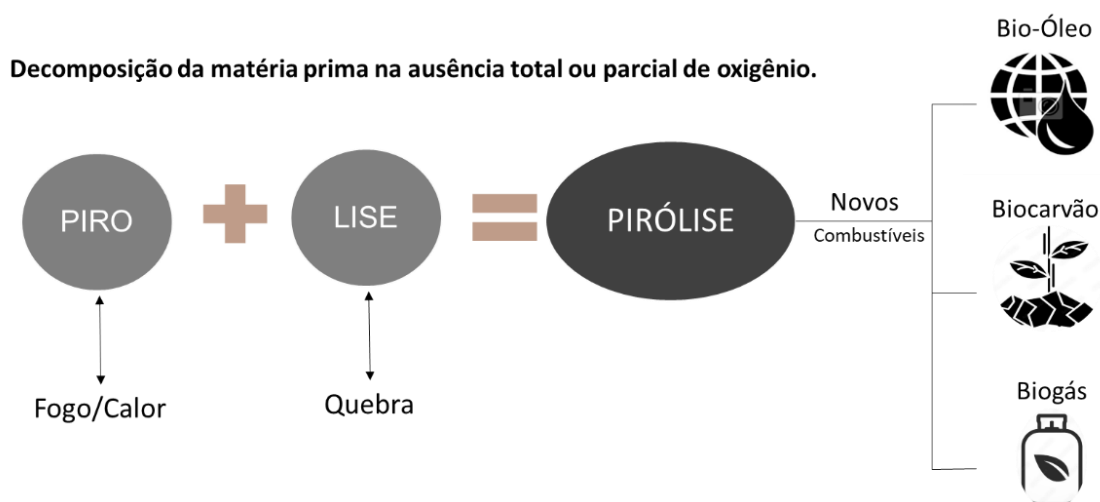
Durante a pirólise, a biomassa é mantida a altas temperaturas em um ambiente de baixo teor de oxigênio, o que resulta na radiação térmica dos componentes orgânicos da biomassa. O processo de pirólise remove a água e os compostos voláteis da biomassa, deixando para trás um produto carbonáceo

sólido, conhecido como carvão que é uma forma de carbono porosa, capaz de adsorver substâncias indesejadas, sendo amplamente utilizado em várias aplicações, como purificação de água, filtragem de ar, remoção de toxinas e tratamento de efluentes (TEIXEIRA, 2020).

5.4 Pirólise através da degradação termoquímica

Diante dos desafios relacionados à demanda global por combustíveis fósseis, a aplicação da pirólise, uma técnica de degradação termoquímica da biomassa, tem ganho importância. Segundo Teixeira (2020), essa abordagem permite a conversão de materiais orgânicos em gases, óleos e carvão, os quais possuem alto valor energético e são de grande importância para suprir as demandas energéticas globais, como mostra esquema na Figura 4.

Figura 4 – Pirólise e a formação de novos biocombustíveis



Fonte: Autor (2023)

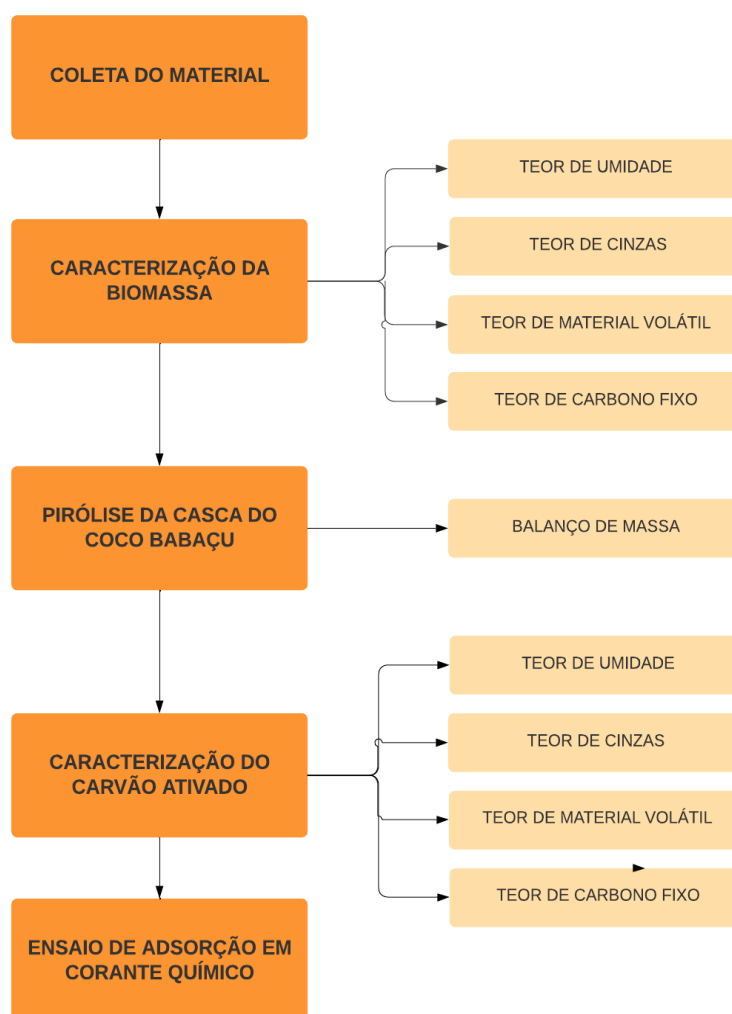
A pirólise é um processo de decomposição térmica de um material orgânico na ausência de oxigênio ou em um ambiente com baixa concentração de oxigênio. Existem dois tipos de pirólise: convencional e rápida, que diferem em termos de velocidade de aquecimento, temperatura, tempo de exposição da matéria sólida e gasosa, e nos produtos desejados. No caso da produção de carvão, utiliza-se principalmente o processo de pirólise convencional (PEDROZA, 2011).

6 MATERIAIS E MÉTODOS

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.

Sendo assim, as atividades que foram desenvolvidas durante esta pesquisa estão apresentadas na Figura 5, detalhando os processos de caracterização da biomassa e os métodos empregados para produzir carvão ativado através da pirólise da casca do coco babaçu.

Figura 5 - Atividades realizadas durante a pesquisa



Fonte: Autor (2023)

6.1 Coleta do material

O coco babaçu foi coletado na região de Taquaruçu -TO, onde existe uma cultura extrativista das famosas quebradeiras, que obtêm o óleo extraído da amêndoa para comercializar, como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Quebradeiras de coco babaçu



Fonte: (Adaptado de REPORTER BRASIL, acesso em 2023)

Em seguida, o fruto foi quebrado garantindo que os pedaços não ultrapassem 3,0 centímetros em seus lados maiores conforme Figura 7, devido às restrições do tamanho do forno do reator.

Figura 7 - Quebra do coco babaçu



Fonte: Autor (2023)

6.2 Caracterização da biomassa

Nestas etapas a casca do coco babaçu passou por procedimentos para a obtenção dos dados da amostra referentes à umidade, teor de cinzas, material volátil e teor de carbono fixo. A amostra seca em estufa a 60 °C, conforme mostra a Figura 8 e triturada em um liquidificador industrial. A parte da amostra a ser utilizada foi aquela referente ao material passante na peneira de malha #16 e retido na peneira de malha #20 conforme Figura 9.

Figura 8 - Estufa utilizada para secagem da amostra



Fonte: Autor (2023)

Figura 9 - Peneiras utilizadas para peneirar a amostra.



Fonte: Autor (2023)

6.2.1 Umidade

A determinação da umidade foi realizada de acordo com a norma ASTM D 3173-85. Com o auxílio de uma balança de precisão Figura 10, foi pesada uma massa de aproximadamente 1g de casca de babaçu triturada onde foi adicionada a um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. Em seguida 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 Figura 11 por 15 minutos e pesado. A análise foi realizada em triplicata e o teor de umidade foi determinado de acordo com a Equação 1.

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

A= peso do cadinho vazio + peso da amostra

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

C= peso da amostra

Figura 10 – Balança de precisão



Fonte: Autor (2023)

Figura 11 - Dessecador

Fonte: Autor (2023)

6.2.2 Teor de cinzas

O teor de cinzas foi calculado segundo o método sugerido por Sanchez *et al.* (2009), em que uma massa de aproximadamente 1g de casca de babaçu triturada em triplicata é adicionada a cadinhos de porcelana com peso constante pré-determinado. A amostra foi calcinada a uma temperatura de 710 °C durante 60 minutos em um forno mufla da marca EDG Equipamentos, modelo W-One. Em seguida os cadinhos foram colocados em um dessecador por 1 hora para esfriar e posteriormente foram pesados. O teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma ASTM 2415-66/86 e seus resultados foram obtidos através da Equação 2.

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

A= peso do cadinho + peso amostra após calcinação

B= peso do cadinho vazio

C= peso da amostra

6.2.3 Material Volátil

De acordo com método sugerido por Sanchez *et al.* (2009), a determinação do teor de material volátil da biomassa da casca de babaçu foi obtida em triplicata pesando cerca de 1g de amostra em um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. A amostra foi aquecida em um forno mufla (Figura 12) à temperatura de 850° C, na ausência de oxigênio durante 7 minutos. O teor de material volátil foi obtido de acordo com a Equação 3.

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

A= peso do cadinho vazio + peso da amostra

B= peso do cadinho + peso amostra pós-aquecimento em forno mufla

C= peso da amostra

Figura 12 - Aquecimento dos cadinhos a 850°C em forno mufla



Fonte: Autor (2023)

6.2.4 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.

$$\text{Carbono Fixo} = 100 - [\text{Umidade}(\%) - \text{Cinzas}(\%) - \text{Material Volátil}(\%)] \quad \text{Eq. 4}$$

Logo, nesta etapa é calculado o teor de carbono fixo com os dados obtidos anteriormente.

6.3 Pirólise da casca de babaçu

Foi realizada a conversão térmica a um reator de leito fixo tubular de quartzo, de 100 cm de comprimento e diâmetro externo de 10 cm. A biomassa foi inserida ao reator na forma ressecada e triturada após passar por estufa a uma temperatura de 60 °C. O reator foi aquecido através de um forno bipartido reclinável, e operado em regime de batelada, sendo empregado vapor de água como o gás de arraste.

O tubo de quartzo é o compartimento onde foi introduzida a casca de babaçu triturada. Com o auxílio de uma autoclave Figura 13, vapor de água atravessa todo o comprimento do tubo, e transportará os produtos gasosos obtidos na pirólise para fora do leito. Na extremidade de saída há um sistema de condensação para que parte dos vapores produzidos na reação sejam convertidos em líquidos.

Durante a pirólise, foi empregada uma faixa de temperatura de 150 a 600 °C e uma taxa de aquecimento de 30°C/min⁻¹ e outra faixa de temperatura de 150 a 700 °C e uma taxa de aquecimento de 30°C/min⁻¹. O reator de pirólise a empregado nos ensaios encontra-se na Figura 14. O tempo de reação em todos os experimentos será de 45 minutos para cada faixa.

Figura 13 - Autoclave



Fonte: Autor (2023)

Figura 14 - Reator de leito fixo



Fonte: Autor (2023)

Figura 15 - Sistema completo utilizado no processo de pirólise



Fonte: Autor (2023)

6.3.1 Balanço de Massa

O balanço de massa é originado se baseando na Lei de Conservação de Massa de Antoine Lavoisier, que descreve que a massa não pode ser criada e nem destruída. Sendo assim, o balanço de massa foi dado de acordo com a massa que entrou e que saiu do reator, no caso, a parte sólida e líquida. Portanto, a equação utilizada para determinação do balanço da parte sólida pode ser expressa pela Equação 5:

$$M = M1 - M2 \quad \text{Eq.5}$$

Onde:

M = massa de carvão, em gramas;

M1 = massa final, em gramas;

M2 = massa do recipiente tarado, em gramas.

Para fins de Balanço de Massa, após resfriamento da planta de Pirólise, todos os produtos foram pesados e armazenados. O bio-óleo foi coletado após o sistema de condensação de vapores e o carvão diretamente do reator.

6.4 Caracterização do carvão obtido

A caracterização do carvão foi realizada de acordo com os métodos descritos a seguir.

6.4.1 Umidade

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

6.4.2 Teor de cinzas

O teor de cinzas do carvão foi obtido de acordo com o método de Sanchez *et al.* (2009), descrito anteriormente para a determinação do teor de cinzas da casca de babaçu triturada.

6.4.3 Material volátil

O teor de material volátil foi obtido ao utilizar o método de (SANCHEZ *et al.*, 2009), descrito anteriormente para a determinação do teor de material volátil da biomassa.

6.4.4 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi calculado através da diferença descrita segundo a Equação 5 descrita anteriormente na caracterização da biomassa.

7 ENSAIO DE ADSORÇÃO

Com o auxílio de uma mesa de agitação (Shaker TE 141) como mostra a Figura 16, foi feita a adsorção por 30 min a 70 RPM do carvão obtido através da pirólise na temperatura de 700 °C e taxa de aquecimento igual a 30 °C/min, na forma de pó, com granulometria de 0,45 mm. Este ensaio foi realizado no LARSEN-IFTO/Campus Palmas.

Figura 16 - Shaker TE 141 para ensaio de adsorção



Fonte: Autor (2023)

A solução corante (Azul de Metileno), de fórmula química $C_{16}H_{18}N_3S \cdot 3H_2O$ foi empregado no teste, sendo utilizados um volume padrão de 30 mL de solução em todos os testes. Após o teste de adsorção, as amostras foram filtradas em papel analítico Figura 17 e a concentração de azul de metileno resultante foi determinada em espectrofotômetro, a 660 nm (Figura 18).

Figura 17 – Filtro de papel analítico



Fonte: Autor (2023)

Figura 18 - Espectrofotômetro



Fonte: Autor (2023)

Foi utilizado um planejamento experimental do tipo Delineamento de Faces Centradas (DFC) para investigar os efeitos de duas variáveis independentes, a massa de carvão (X_1) e a concentração da solução do corante

(X₂), no teste de adsorção. Com o auxílio do software *Protimiza Experimental Design*, foi realizada a análise dos resultados do ensaio. Os níveis dos fatores utilizados estão apresentados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1: Variáveis e níveis empregados no ensaio de adsorção.

Variável	Unidad e	Código	Nível		
			-1	0	1
Massa de Carvão Ativado	g	X1	0,4	0,6	0,8
Concentração do corante Azul de Metileno	Mg/L	X2	20	60	100

Fonte: Autor (2023).

Foram definidas duas respostas para o planejamento, a saber: (a) a absorbância do filtrado e (b) a capacidade de adsorção (Q). Realizou-se 11 ensaios, conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2: Dosagem de carvão e concentração do corante para ensaio de adsorção.

Ensaio	Variáveis	
	Massa de carvão ativado X1 (g)	Concentração do corante X2 (mg/L)
1	0,4	20
2	0,8	20
3	0,4	100
4	0,8	100
5	0,4	60
6	0,8	60
7	0,6	20
8	0,6	100
9	0,6	60
10	0,6	60
11	0,6	60

Fonte: Autor (2023).

8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos por meio dos ensaios de caracterização da biomassa da casca do coco babaçu, dos ensaios de pirólise a 600 °C e 700 °C e da caracterização dos carvões obtidos.

8.1 Balanço de massa do carvão ativado

A Tabela 3 a seguir, demonstra o balanço de massa e o rendimento do carvão nas duas faixas de temperatura, após o procedimento de pirólise.

Tabela 3: Balanço de massa e rendimento do carvão ativado.

Temperatura de pirólise (°C)	Barca vazia M2 (g)	Massa inicial do conjunto (g)	Massa final do conjunto M1 (g)	Massa do carvão M (g)	Rendimento do carvão (%)
600	61,49	124,54	76,42	9,81	23,68
700	61,97	123,87	75,72	6,455	22,21

Fonte: Autor (2023).

Pode-se perceber que o rendimento do carvão ativado, após a realização da degradação térmica da casca do coco babaçu nas temperaturas de 600 °C e 700 °C, é de aproximadamente 24% e 22%, respectivamente. Com isso, é evidente que o rendimento do carvão ativado é inversamente proporcional à temperatura empregada no ensaio de pirólise.

8.2 Umidade

Na Tabela 4 abaixo, estão registrados tanto os dados utilizados para o cálculo do teor de umidade quanto os respectivos resultados obtidos.

Tabela 4: Teor médio de umidade da biomassa e carvão.

Amostra em triplicata		A	B	C	Umidade (%)	Média (%)
		(g)	(g)	(g)		
Biomassa	1	33,406	33,299	1,266	8,42%	8,63%
	2	33,074	32,958	1,399	8,26%	
	3	34,1509	33,995	1,696	9,21%	
Carvão 600 °C	1	34,5421	34,520	1,025	2,14%	2,07%
	2	35,7161	35,697	0,949	1,99%	
	3	34,101	34,080	1,018	2,07%	
Carvão 700°C	1	34,3747	34,347	1,041	2,70%	2,65%
	2	35,457	35,430	1,027	2,64%	
	3	34,0186	33,988	1,189	2,60%	

Fonte: Autor (2023).

Em relação ao teor de umidade, vale ressaltar que valores inferiores a 10% na biomassa são amplamente reconhecidos como a faixa ideal para submetê-la a processos termoquímicos, como a pirólise. Esse limiar é crucial devido ao fato de que a presença excessiva de umidade na matéria-prima pode comprometer significativamente a eficiência desses processos, resultando em perdas de energia e deterioração na qualidade dos produtos, conforme destacado por (ALMEIDA, 2008). Portanto, ao atingir um teor médio de umidade de apenas 8,63% no estudo, pode-se concluir que, a casca do babaçu demonstra ser uma biomassa de excelente qualidade para a realização da pirólise, tornando-a uma escolha promissora para aplicações termoquímicas.

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 2,07% e 2,65% para 600 °C e 700 °C respectivamente são considerados excelentes.

8.3 Teor de cinzas

A Tabela 5 a seguir, apresenta os resultados obtidos através do ensaio do teor de cinzas.

Tabela 5: Teor médio de cinzas da biomassa e carvão

Amostra em triplicata		A (g)	B (g)	C (g)	Teor de Cinzas	
					Média (%)	(%)
Biomassa	1	32,166	32,140	1,2656	1,99%	1,55%
	2	31,688	31,675	1,3989	0,94%	
	3	32,484	32,455	1,696	1,73%	
Carvão 600 °C	1	33,612	33,517	1,025	9,28%	9,93%
	2	34,857	34,767	0,9493	9,50%	
	3	33,195	33,083	1,018	11,02%	
Carvão 700 °C	1	33,424	33,333	1,0413	8,70%	11,39%
	2	34,546	34,431	1,0265	11,21%	
	3	32,999	32,829	1,189	14,27%	

Fonte: Autor (2023).

O teor de cinzas é um critério essencial para avaliar a qualidade do carvão ativado, servindo como um indicador importante. Valores que ultrapassam a marca de 15% sugere a presença significativa de componentes inorgânicos. Essa presença pode potencialmente afetar negativamente as interações entre o material de absorção e a substância adsorvida, conforme (JAGUARIBE *et al.*, 2005). É relevante notar que, no âmbito deste estudo, os adsorventes analisados apresentaram consistentemente teores de cinzas inferiores a 15%, o que indica que esses adsorventes têm potencial para aplicações adsorptivas, alinhando-se com as observações feitas por esses autores.

Além disso, Sousa (2018) realizou uma análise que revelou um teor de cinzas de 1,56% para a amostra *in natura* do endocarpo do coco babaçu, enquanto Hoppen *et al.* (2017) determinou um teor de cinzas de 7,4% para o carvão ativado obtido a partir da casca do coco babaçu. Ao compararmos esses resultados com os teores médios de cinzas encontrados no presente estudo 1,55% para a amostra *in natura*, 9,93% para o carvão obtido a 600 °C e 11,39% para o carvão obtido a 700 °C, podemos inferir que os valores obtidos neste estudo estão em conformidade com os dados anteriormente relatados na literatura e validando os resultados encontrados.

8.4 Teor de material volátil

Os dados utilizados para a obtenção de material volátil, bem como seus resultados, estão apresentados na Tabela 6 abaixo.

Tabela 6: Teor médio de material volátil da biomassa e carvão.

Amostra em triplicata		A (g)	B (g)	C (g)	Material Volátil (%)	Média (%)
Biomassa	1	33,299	32,378	1,266	72,83%	72,53%
	2	32,958	31,921	1,399	74,15%	
	3	33,995	32,797	1,696	70,61%	
Carvão 600 °C	1	34,520	34,333	1,025	18,22%	17,94%
	2	35,697	35,511	0,949	19,57%	
	3	34,080	33,917	1,018	16,02%	
Carvão 700 °C	1	34,347	34,161	1,041	17,82%	17,33%
	2	35,430	35,233	1,027	19,21%	
	3	33,988	33,810	1,189	14,95%	

Fonte: Autor (2023).

Conforme definido por Oliveira *et al.* (1982), o teor de material volátil é conceituado como o conjunto de substâncias que se desprendem da madeira na forma gasosa durante o processo de carbonização. É importante notar que a velocidade da combustão é influenciada positivamente quando o teor de material volátil na biomassa é elevado, o que, conforme indicado por Silva (2018), beneficia significativamente o processo de pirólise.

Sousa (2018), realizou uma análise que revelou um teor de materiais voláteis de 84,5% para a amostra *in natura* do endocarpo do coco babaçu e 17,83% para o carvão ativado, enquanto Hoppen *et al.* (2017) determinou 11,6% para o carvão ativado obtido a partir da casca do coco babaçu. Ao compararmos esses resultados com os teores médios de cinzas encontrados no presente estudo 72,56% para a biomassa, 17,94% para o carvão obtido a 600 °C e 17,33% para o carvão obtido a 700 °C, podemos constatar que os valores obtidos neste estudo estão em coerência com os demais.

8.5 Teor de carbono fixo

Para o cálculo do teor de carbono fixo, foi utilizado os resultados de tabelas anteriores, conforme Tabela 7.

Tabela 7: Teor médio de carbono fixo da biomassa e carvão.

Amostra em triplicata		Umidade (%)	Material Volátil (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)	Média (%)
Biomassa	1	8,42	72,83	1,99	16,76	17,29
	2	8,26	74,15	0,94	16,66	
	3	9,21	70,61	1,73	18,45	
Carvão 600 °C	1	2,14	18,22	9,28	70,36	70,06
	2	1,99	19,57	9,50	68,94	
	3	2,07	16,02	11,02	70,88	
Carvão 700 °C	1	2,70	17,82	8,70	70,78	68,63
	2	2,64	19,21	11,21	66,94	
	3	2,60	14,95	14,27	68,18	

Fonte: Autor (2023).

De acordo com Costa *et al.* (2015), o teor de carbono fixo é uma medida que representa a quantidade de carbono presente em uma amostra de material que permanece após a remoção de substâncias voláteis e materiais inorgânicos durante um processo de aquecimento controlado. O carbono fixo é uma parte essencial da composição do material e é frequentemente utilizado como um indicador da capacidade de um material em liberar calor durante a queima ou a pirólise.

Sousa (2018), realizou uma análise que revelou um teor de carbono fixo de 5,10% para a amostra *in natura* do endocarpo do coco babaçu e 50,90% para o carvão ativado, enquanto Hoppen *et al.* (2017) determinou 73,4% para o carvão ativado obtido a partir da casca do coco babaçu. Dessa forma, ao comparar os teores médios de carbono fixo no presente estudo 17,29% para a biomassa, 70,06% para o carvão a 600 °C e 68,63% para o carvão a 700 °C, demonstra consistência entre os resultados.

8.6 Adsorção (Q)

Para o ensaio de adsorção com o carvão ativado proveniente da pirólise da casca do babaçu (700°C), foi obtido como resultado os parâmetros de concentração residual de azul de metileno (Y1, (-)) e capacidade de adsorção (Q, mg/g).

O método escolhido foi o Delineamento de Faces Centradas (DFC) definido no Planejamento Experimental (descrito nos procedimentos metodológicos) considerou que as variáveis investigadas para o teste de adsorção do índice de azul de metileno são: massa do carvão (X₁) e concentração do corante (X₂). Os resultados são apresentados na Tabela 8 a seguir.

Tabela 8: Resultado do ensaio de adsorção.

Ensaio	Variáveis		Absorbância do filtrado (Y1)	Eficiência de remoção (%)	Capacidade de adsorção Q (mg/g)
	Massa de carvão ativado X1 (g)	Concentração do corante X2 (mg/L)			
1	0,4	20	0,04	99,03	1,49
2	0,8	20	0,03	99,09	0,74
3	0,4	100	0,89	98,95	7,42
4	0,8	100	0,65	99,20	3,72
5	0,4	60	0,59	98,75	4,44
6	0,8	60	0,02	99,70	2,24
7	0,6	20	0,05	98,96	0,99
8	0,6	100	0,53	99,31	4,97
9	0,6	60	0,10	99,57	2,99
10	0,6	60	0,06	99,64	2,99
10	0,6	60	0,21	99,38	2,98

Fonte: Autor (2023).

De acordo com Maia (2021), a eficácia do carvão ativado nas condições específicas de sua aplicação é evidenciada pelo nível de sua capacidade máxima de adsorção. Na Tabela 9, são apresentados os efeitos da interação entre as variáveis deste estudo para o resultado de capacidade máxima de adsorção do carvão ativado originário da pirólise da casca do coco. A Equação

6, estabelece uma relação estatística entre os fatores apresentados anteriormente:

Tabela 9: Coeficientes de regressão para definição da capacidade de adsorção.

Fatores	Coeficiente de regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	2,98	0,06	46,87	0,0000
X1	-1,11	0,05	-21,85	0,0000
X1 ²	0,36	0,08	4,63	0,0057
X2	2,15	0,05	42,39	0,0000
X2 ²	0,00	0,08	-0,06	0,9570
X1.X2	-0,74	0,06	-11,92	0,0001

Fonte: Autor (2023).

$$Q = 2,98 - 1,11 X_1 + 0,36 X_1^2 + 2,15 X_2 + 0 X_2^2 - 0,74 X_1 X_2 \quad \text{Eq.6}$$

Onde:

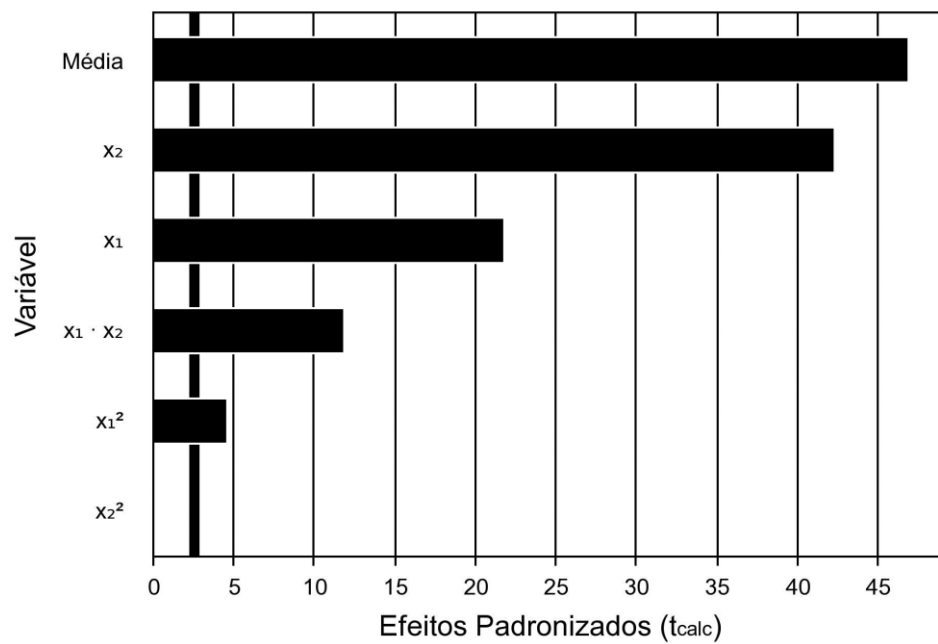
Q = Adsorção;

X₁ = massa de carvão, em gramas;

X₂ = concentração do corante azul de metileno (mg/L).

O Diagrama de Pareto, representado no Gráfico 1, destaca as variáveis que têm os efeitos mais significativos na capacidade de adsorção do carvão ativado derivado da degradação térmica da casca do coco babaçu. Com isso, percebe-se que a variável concentração do corante (X₂), apresenta grande influência no resultado.

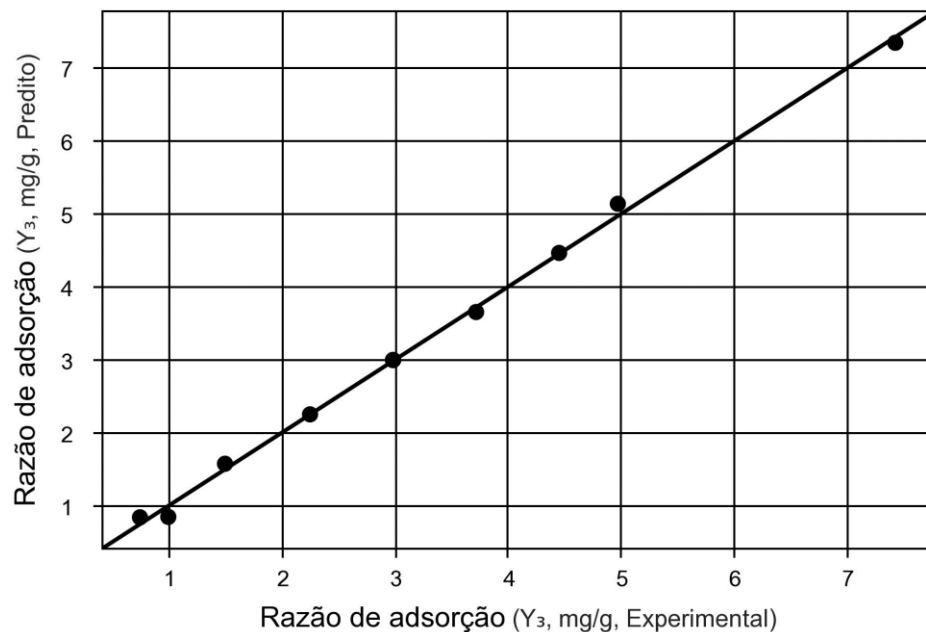
Gráfico 1: Diagrama de Pareto da capacidade de adsorção do carvão da casca do coco babaçu.



Fonte: Autor (2023).

Já o Gráfico 2, confirma que houve uma discrepância mínima entre os valores observados e os valores previstos pelo modelo, como evidenciado pela proximidade dos pontos agrupados em torno da linha representativa.

Gráfico 2: Valores experimentais X valores preditos quanto à capacidade de adsorção do carvão.



Fonte: Autor (2023).

A Tabela 10, apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) para a capacidade de adsorção (Q) das amostras de carvão ativado da casca do coco babaçu na utilização do corante azul de metileno.

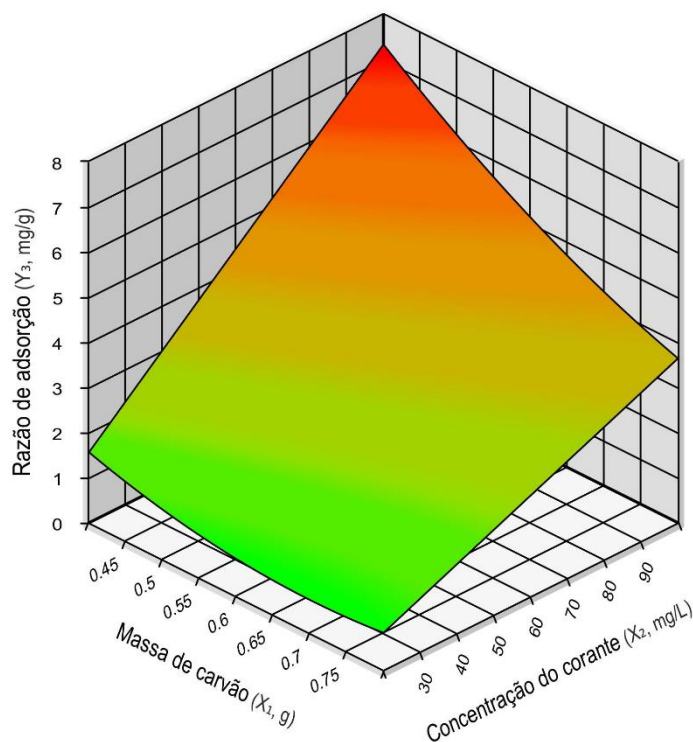
Tabela 10: ANOVA para a capacidade de adsorção das amostras de carvão ativado.

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Fcalc	p-valor
Regressão	37,6	5	7,5	487,8	0,00000
Resíduos	0,1	5	0	-	-
Falta de ajuste	0,1	3	0	1643,2	0,00061
Erro puro	0	2	0	-	-
Total	37,7	10	-	-	-
R²	99,80%	-	-	-	-

Fonte: Autor (2023).

O valor R^2 de 99,80%, é uma indicação de que o modelo apresenta um ajuste de alta qualidade aos dados. No Gráfico 3, é apresentada a superfície gerada por meio do planejamento experimental.

Gráfico 3: Superfície para capacidade de adsorção em relação à massa de carvão e concentração de corante.



Fonte: Autor (2023).

Observa-se que, a capacidade de máxima de adsorção do carvão ativado da casca do coco babaçu foi alcançada em condições de baixa quantidade de massa de carvão e alta concentração de corante, como evidenciado pelas regiões destacadas de vermelho. Além disso, Maia (2021) encontrou uma capacidade máxima de adsorção de 5,78 mg/g para a concentração mais alta de corante 100 mg/L e a menor massa de carvão 0,5 g, para o carvão ativado da casca de castanha de caju, mostrando que o resultado condiz com a literatura.

Vale ressaltar que, a capacidade de adsorção foi alcançada em condições de baixa quantidade de massa de carvão e alta concentração de corante como mostra a Tabela 8.

A eficiência do processo oscilou entre 98,75% para a menor massa de carvão (4g) e 99,70% para a maior massa de carvão (8g). Contudo, a discrepância na eficiência entre essas massas de carvão não se mostra substancial. Nesse sentido, ao considerarmos o aumento na massa de carvão, optamos pela menor quantidade de carvão emergente como uma alternativa mais economicamente viável, visto que tal escolha não acarreta em uma alteração substancial na eficiência do processo.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação dos resultados da caracterização da biomassa da casca do coco babaçu, incluindo umidade, teor de cinzas, teor de material volátil e teor de carbono fixo, revela que os valores obtidos estão em conformidade com o que é relatado na literatura.

É relevante salientar que, ao considerarmos uma quantidade de 1000 kg de biomassa destinada à produção de carvão ativado, é possível obter aproximadamente 236 kg de carvão ativado a 600 °C e cerca de 222 kg a 700 °C. Isso evidencia uma relação inversamente proporcional entre a temperatura de pirólise e o rendimento do carvão ativado obtido. Em outras palavras, à medida que a temperatura de pirólise da casca do coco babaçu aumenta, o rendimento do carvão ativado diminui, no presente estudo houve uma queda de rendimento de aproximadamente 6,21% quando foi incrementado 100 °C na temperatura de pirólise.

Ademais, o carvão ativado estudado demonstrou teores de umidade e inferiores a 2,07% e 2,65%, respectivamente. Além disso, seu conteúdo de material volátil é menor em comparação com o material precursor, mostrando uma redução de aproximadamente 3,40% quando incrementado 100 °C na temperatura. Esse fenômeno pode ser atribuído à liberação de compostos de fácil degradação, resultando em uma diminuição de 2,04% no teor de carbono fixo com o aumento da temperatura.

Além disso, observou -se que a capacidade de máxima de adsorção do carvão ativado da casca do coco babaçu foi alcançada em condições de baixa quantidade de massa de carvão (4g) e alta concentração de corante (100 mg/L). Além do mais, a capacidade de adsorção foi alcançada em condições de baixa quantidade de massa de carvão e alta concentração de corante. Como também, é evidente que não há uma alteração significativa na eficiência do processo ao utilizarmos uma menor massa de carvão

Esta abordagem não apenas propicia a otimização de recursos, mas também contribui para a promoção da sustentabilidade ambiental tendo em vista que, a disponibilidade abundante da biomassa proveniente da casca de coco babaçu nas regiões norte e nordeste do Brasil representa um recurso valioso que frequentemente é subutilizado e descartado de forma inadequada.

Portanto, os resultados deste estudo não apenas validam cientificamente a eficácia do processo, mas também instigam à ação, promovendo a conscientização e a aplicação da casca de coco babaçu como um recurso valioso para a construção de um futuro mais sustentável.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, MBB de. **Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana-de-açúcar e seu co-processamento com gasóleo em craqueamento catalítico**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2008.

COSTA, P. D.; FURMANSKI, L. M.; DOMINGUINI, L. **Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de casca de nozes para adsorção de azul de metileno**. Revista Virtual de Química, v. 7, n. 4, p. 1272-1285, 2015.

EMMERICH, FG; LUENGO, CA. **Carvão de babaçu: matéria-prima renovável, sem enxofre e termo redutora para a produção de aço**. Biomassa e Bioenergia, v. 10, n. 1, pág. 41-44, 1996.

HOPPEN, Mariana Irene et al. **Adsorção e dessorção do ácido acetilsalicílico em carvão ativado de casca de coco de babaçu in natura e funcionalizado com HNO₃**. Curitiba: Dissertação de Mestrado. UTFP, 2017.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Quebradeiras de coco babaçu censo de 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. < Disponível em: <https://censoagro2017.ibge.gov.br/2012-agencia-de-noticias/noticias/23624-quebradeiras-de-coco-babacu-preservam-tradicao-no-interior-do-maranhao...> > Acesso em: 10 de maio de 2023.

JAGUARIBE, Emerson Freitas et al. **The performance of activated carbons from sugarcane bagasse, babassu, and coconut shells in removing residual chlorine**. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 22, p. 41-47, 2005.

MAIA, Danielma Silva. **Aproveitamento do carvão ativado obtido da casca de castanha de caju no processo de tratamento de águas cinzas**. Palmas: UFT, 2021.

MARTON, José Marcelo et al. **Avaliação de carvões ativos e das condições de adsorção no tratamento do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana empregando planejamento de experimentos**. Revista Analytica, n. 3, p. 45-53, 2003.

PEREZ, Juan Miguel Mesa et al. **Testes em uma planta de pirólise rápida de biomassa em leito fluidizado: critérios para sua otimização**. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Agrícola, 2004.

OLIVEIRA, J. B. de; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. **Propriedade do carvão vegetal. Carvão vegetal: destilação, carvoejamento e controle da qualidade.** Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, Belo Horizonte, MG, 1982^a

PEDROZA, M. M. **Bio-óleo e Biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo.** Tese de Doutorado, UFRN, programa de Pós-graduação em Engenharia Química, 2011.

SANTOS, Lucélia Neves dos. **Arranjos produtivos do coco de babaçu e qualidade de vida na Região do Bico do Papagaio-TO.** Palmas: UFT, 2012

SÁNCHEZ, ME et al. **Efeito da temperatura de pirólise na composição dos óleos obtidos de lodo de esgoto.** biomassa e bioenergia, v. 33, n. 6-7, pág. 933-940, 2009.

SILVA, Jailson dos Santos et al. **Produção de carvão ativado da casca do babaçu e sua eficiência no tratamento de água para o consumo humano.** Engenharia Florestal: Desafios, Limites E Potencialidade, v. 1, n. 1, p. 654-685, 2020.

SOUSA, Micaelli Ciane Sobrinho de. **Adsorção de azul de metileno utilizando carvão ativado produzido a partir do endocarpo do coco babaçu.** Bagé: UFP, 2018

TEIXEIRA, Josué da Luz. **Obtenção e caracterização de carvão ativado a partir da casca de coco verde.** Porto Alegre: UFRG, 2020.

VALENCIA, C. A. V. **Aplicação da adsorção em carvão ativado e outros materiais carbonosos no tratamento de águas contaminadas por pesticidas de uso agrícola.** Rio de Janeiro: PUC, 2007.