



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

CAMPUS PALMAS

CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL

IGOR ADRIANO DOS SANTOS PRAXEDES

**DEGRADAÇÃO TÉRMICA DA PODA DE IPÊ VISANDO A PRODUÇÃO DE
CARVÃO ATIVADO**

PALMAS

2023

IGOR ADRIANO DOS SANTOS PRAXEDES

**DEGRADAÇÃO TÉRMICA DA PODA DE IPÊ VISANDO A PRODUÇÃO DE
CARVÃO ATIVADO**

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

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

**PALMAS-TO
2023**

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

P919d Praxedes, Igor Adriano Dos Santos
Degradação térmica da poda de ipê visando a produção de
carvão ativado / Igor Adriano Dos Santos Praxedes. – Palmas, TO,
2023.
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, 2023.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Carvão Ativado. 2. Pirólise. 3. Poda de Ipê. 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

IGOR ADRIANO DOS SANTOS PRAXEDES

DEGRADAÇÃO TÉRMICA DA PODA DE IPÊ VISANDO A PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO

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

Aprovado em: 07/12/2023

BANCA AVALIADORA



Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador - IFTO



Dr^a. Elaine da Cunha Silva Paz - IFTO



Me. Ranyere do Nascimento Lôbo - UFT

DEDICATÓRIA

Dedico à toda minha família, em especial à minha mãe Marlene, essa conquista também é dela, é seu sonho ver os filhos formados em curso superior e é meu dever honrá-la por seu sacrifício e entrega que sempre teve sem hesitar nem sequer uma única vez, se manteve forte e me trouxe força, assim com meu pai Luiz, e a meus irmãos Állisson e Sávio, pois me apoiaram de forma incondicional e abraçam minhas conquistas como sendo deles. Aos amigos que fiz por conta da integração esportiva no instituto e que levarei por toda vida, de mesma forma aos amigos que fiz em sala de aula, que tornaram a experiência do curso mais leve.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por me manter firme no objetivo, mesmo com todas adversidades enfrentadas.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais Marlene e Gonzaga, e ao meu irmão Sávio, ao que dividi residência durante todos esses anos, que fez o que estava ao seu alcance sempre para me fazer buscar estudo e que me apoiou de todas as formas.

Agradeço a meu orientador Marcelo Pedroza pelos ensinamentos, por toda paciência e pela oportunidade de poder desenvolver um trabalho de expressão. Também agradeço à minha banca por todo conselho, correções e cuidado para que esta pesquisa tivesse excelência.

Aos amigos que fiz durante toda essa trajetória.

RESUMO

PRAXEDES, Igor Adriano. **Degradação Térmica da poda de Ipê Visando a Produção de Carvão Ativado**. 2023. 48 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2023.

Este trabalho se concentra na produção de carvão ativado a partir da degradação térmica dos resíduos provenientes da poda do ipê amarelo. O ipê é uma das árvores mais cultivadas no Brasil, e sua poda gera consideráveis resíduos, seja por questões de saúde estrutural da árvore ou por motivos estéticos. Esses resíduos podem ser aproveitados, processados e integrados ao mercado em diversos setores, tais como: tratamento de água, tratamento de ar, resíduos industriais, adsorção de gases, tratamento de efluentes e indústria alimentícia. O objetivo principal deste estudo foi realizar a degradação térmica da poda de Ipê por meio da pirólise, visando obter carvão ativado para posterior teste como adsorvente de corante químico. A caracterização da biomassa, resultou em teores de umidade de 3,16%; densidade (0,145 g/mL); cinética de perda de massa (38,97%), material volátil (67%), cinzas (3,24%) e carbono fixo (7,88%). Para a pirólise, foram empregadas duas temperaturas diferentes para as duas etapas de ativação do carvão. Uma das ativações ocorreu à temperatura controlada de 650°C, que teve rendimento em massa de 25,87% e a outra a 550°C com rendimento em massa de 26,04%, ambas pré-aquecidas a 200°C, com uma taxa de aquecimento de 30°C/min até atingir as temperaturas desejadas. Após a degradação térmica, o carvão então, foi submetido a moagem para obtenção do pó, ao qual foi utilizado em ensaios de adsorção com Azul de Metileno como corante, em 3 concentrações diferentes, sendo elas: 20; 60 e 100mg/L. Assim como diferentes massas de carvão foram usadas para o ensaio de adsorção, sendo: 0,4; 0,7 e 1,0g, aferindo a eficiência de cada razão de adsorção entre Massa de Carvão Versus Concentração de corante por espectrofotometria, ao qual se obteve o melhor resultado através do experimento com massa 0,40g e concentração de corante de 100mg/L, trazendo uma razão de 2,99mg/g e possuindo uma eficiência de remoção de 99,81%. Os resultados obtidos dão indícios de aplicação na indústria para o carvão produzido.

Palavras-chave: Carvão Ativado, Pirólise, Poda de Ipê, Biomassa.

ABSTRACT

PRAXEDES, Igor Adriano. **"Thermal Degradation of Ypê Pruning for Activated Carbon Production"**, 2023. 48 p. Course Conclusion Paper - Bachelor of Civil Engineering - Federal Institute of Education, Science and Technology of Tocantins. Palmas, 2023.

This work focuses on the production of activated carbon from the thermal degradation of residues derived from pruning yellow ipê trees. The ipê is one of the most cultivated trees in Brazil, and its pruning generates significant waste, either due to structural health issues or aesthetic reasons. These residues can be utilized, processed, and integrated into the market in various sectors, such as water treatment, air treatment, industrial waste, gas adsorption, effluent treatment, and the food industry. The main objective of this study was to perform the thermal degradation of ipê pruning through pyrolysis, aiming to obtain activated carbon for subsequent testing as a chemical dye adsorbent.

The characterization of the biomass resulted in moisture content of (3.16%); density (0.145 g/mL); mass loss kinetics (38.97%), volatile matter (67%), ash content (3.24%), and fixed carbon (7.88%). For pyrolysis, two different temperatures were employed for the two stages of carbon activation. One activation occurred at a controlled temperature of 650°C, with a mass yield of 25.87%, and the other at 550°C with a mass yield of 26.04%, both preheated to 200°C, with a heating rate of 30°C/min until reaching the desired temperatures.

After thermal degradation, the carbon was then subjected to grinding to obtain powder, which was used in adsorption tests with Methylene Blue as a dye, at three different concentrations: 20mg/L, 60mg/L, and 100mg/L. Different carbon masses were also used for the adsorption test, namely: 0.4g, 0.7g, and 1.0g, measuring the efficiency of each adsorption ratio between Carbon Mass (g) x (mg/L) Dye Concentration by spectrophotometry. The best result was obtained through the experiment with a mass of 0.40(g) and a dye concentration of 100(mg/L), yielding a ratio of 2.99mg/g and an efficiency of removal of 99.81%. The results obtained indicate potential applications in the industry for the produced carbon.

Keywords: Activated Carbon, Pyrolysis, Ipê Pruning, Biomassa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Uso Final da Biomassa	13
Figura 2 - Esquema de ilustração Simplificada de Ativação Física	15
Figura 3 - Esquema de ilustração Simplificada de Ativação Química	15
Figura 4 - Estágios de Desenvolvimento do Ipê Amarelo.....	18
Figura 5 - Comportamento do Ipê nas transições de estações	18
Figura 6 - Desenho esquemático das etapas do trabalho experimental.....	19
Figura 7 – Material <i>in natura</i> utilizado no experimento	20
Figura 8 – Amostra em forma de cubo para Pirólise	20
Figura 9 - Ensaio de densidade aparente da biomassa	21
Figura 10 - Adição da biomassa ao cadinho de porcelana.....	22
Figura 11 - Estufa que aqueceu a amostra	23
Figura 12 - Mufla a ser utilizada para a obtenção do material volátil.....	24
Figura 13 - Balança analítica utiliza e cadinho com Biomassa.....	26
Figura 14 - Sistema que foi usado para efetuar a pirólise	26
Figura 15 - Mesa de Agitação - Shaker TECNAL, Modelo TE-141	28
Figura 16 - Espectrofotômetro HACH, modelo DR 6000	28
Figura 17 - Curva de Cinética de Perda de Massa.....	33
Figura 18 – Massas Biomassa e Carvão 650°C.....	34
Figura 19 - Conteúdo do Corante Azul de Metileno pós adsorção Enumeradas.....	39
Figura 20 - Diagrama de Pareto da Razão de Adsorção.....	41
Figura 21 - Valores Obtidos x Previstos para Razão de Adsorção.....	42
Figura 22 - Gráfico de Superfície para a Razão de Adsorção	43
Figura 23 - Curvas de Níveis para Razão de Adsorção	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores e Níveis do Experimento	29
Tabela 2 - Combinação de Níveis e Ordem dos Experimentos.....	29
Tabela 3 - Dados Umidade Biomassa.....	30
Tabela 4 - Teor de Cinzas Biomassa	31
Tabela 5 - Teor Material Volátil	31
Tabela 6 - Dados Carbono Fixo Biomassa.....	32
Tabela 7 - Densidade Média da Biomassa.....	32
Tabela 8 - Dados de Rendimento do Carvão	34
Tabela 9 - Comparação de Rendimento em relação a carvões de outros autores....	35
Tabela 10 - Características dos Carvões Obtidos	35
Tabela 11 - comparação de parâmetros do carvão com o de outros autores	36
Tabela 12 - Teores de Umidades Médias	36
Tabela 13 - Valores Médios Teor de Cinzas	37
Tabela 14 - Médias de Material Volátil	38
Tabela 15 - Média de Carbono Fixo	38
Tabela 16 - Dados do Teste de Adsorção	38
Tabela 17 - Coeficientes de Regressão para Razão de Adsorção do Carvão	40
Tabela 18 - ANOVA para Razão de Adsorção	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLA

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
°C	Graus Celsius
CA	Carvão Ativado
CF	Carbono Fixo
cm	Centímetros
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
g	Grama
H ₂	Hidrogênio
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
H ₃ PO ₄	Ácido Fósforico
IFTO	Instituto Federal do Tocantins
AM	Azul de Metileno
LARSEN	Laboratório e Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética
mg/L	Miligrama por litro
mL	Mililitro
NBR	Norma Brasileira
%	Porcentagem
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
ZnCl ₂	Cloreto de Zinco
°C/min	Graus Celsius por minuto
h	Hora

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Problema de pesquisa.....	11
1.2 Justificativa.....	11
1.3 Objetivos.....	12
1.3.1 Objetivo Geral.....	12
1.3.2 Objetivos Específicos.....	12
2- REVISÃO LITERÁRIA.....	12
2.1 Biomassa.....	12
2.1.1 Biomassa de Resíduos Urbanos.....	13
2.1.2 Biomassa de Resíduos Florestais.....	13
2.1.3 Biomassa de Resíduos Agrícolas.....	14
2.2 Produção do carvão ativado.....	14
2.3 Uso do carvão ativado na indústria.....	15
2.3.1 Tratamento de água e efluente.....	15
2.3.2 Filtragem de ar.....	16
2.3.3 Processo químico e farmacêutico.....	16
2.3.4 Recuperação de solventes.....	16
2.3.5 Processamento de alimentos e bebidas.....	16
2.3.6 Odorização e desodorização.....	17
2.3.7 Catálise.....	17
2.4 Ipê Amarelo (<i>Handroanthus Ochraceus</i>).....	17
3 - PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	18
3.1 Tipo de pesquisa.....	18
3.2 Coleta e preparo da amostra.....	19
3.3 Caracterização da biomassa em estudo.....	20
3.3.1 Análise Imediata da Biomassa.....	21
3.3.1.1 Densidade Aparente.....	21

3.3.1.2 Umidade.....	22
3.3.1.3 Material Volátil.....	23
3.3.1.4 Teor de Cinzas.....	24
3.3.1.6 Cinética de perda de massa.....	25
3.4 Pirólise de Biomassa.....	26
3.5 Procedimentos analíticos empregados na caracterização do carvão ativado.....	27
3.5.1 Análise Imediata do Carvão Ativado.....	26
3.5.1.1 Densidade aparente do carvão.....	26
3.5.1.2 Análise imediata do carvão.....	27
3.5.2.3 Teste de adsorção de azul de metileno.....	27
3.5 Teste de Adsorção.....	27
4.RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
4.1 Caracterização da Biomassa.....	30
4.1.1 Analise Imediata.....	30
4.1.1.1 Teor de umidade.....	30
4.1.1.2 Teor de cinzas.....	31
4.1.1.3 Teor de material Volátil.....	31
4.1.1.4 Teor de carbono Fixo.....	32
4.1.2 Densidade.....	32
4.1.3 Cinética de Perda de Massa.....	33
4.2 Rendimento do Carvão Ativado.....	33
4.3 Caracterização do Carvão.....	35
4.3.1 Análise Imediata do Carvão.....	35
4.3.1.1 Teor de umidade.....	36
4.3.1.2 Teor de cinzas.....	37
4.3.1.3 Teor de material volátil.....	37
4.3.1.4 Teor de carbono fixo.....	38
4.3.2 Teste de Adsorção.....	37
4.3.3 Razão de Adsorção.....	39
5. CONCLUSÃO.....	44
REFERÊNCIAS.....	45

1 – INTRODUÇÃO

O aumento da consciência ambiental e o interesse por opções sustentáveis têm impulsionado pesquisas que exploram a revalorização de resíduos orgânicos através de abordagens inovadoras. No contexto brasileiro, a poda de árvores se destaca como uma fonte potencial de biomassa de alto valor, que pode ser transformada em materiais valiosos, segundo (Meira, 2010). A degradação térmica da poda de Ipê, visando a produção de carvão ativado, emerge como uma estratégia promissora para gerenciar resíduos de forma eficiente e obter um material versátil, alinhando-se com a busca por soluções sustentáveis que afetam a economia e o meio ambiente.

O carvão ativado, devido às suas propriedades únicas, como alta porosidade e capacidade de adsorção, é largamente aplicado em setores variados, incluindo tratamento de água, remoção de poluentes atmosféricos e processos de purificação. No entanto, é notável a necessidade de buscar matérias-primas renováveis para a produção desse material. A transformação térmica da biomassa proveniente da poda de Ipê para obtenção de carvão ativado surge como uma solução que não só agrega valor aos resíduos, mas também contribui para a redução de emissões e para a otimização dos recursos naturais (CORDEIRO, 2019).

No contexto brasileiro, a poda de árvores urbanas é uma prática comum, gerando resíduos que muitas vezes são subutilizados ou descartados inadequadamente. O Ipê, uma árvore emblemática da flora brasileira, é alvo dessa prática e, conseqüentemente, contribui para a geração de resíduos. O aproveitamento desses resíduos para a produção de carvão ativado não só enfrenta o desafio da gestão adequada de resíduos urbanos, mas também potencialmente valoriza uma espécie importante para a biodiversidade brasileira.

O foco desta pesquisa foi conduzir a pirólise da poda de ipê, visando à produção de carvão ativado destinado ao uso industrial. O processo de pirólise é crucial nesse contexto, permitindo a transformação da biomassa proveniente da poda de ipê em um material de elevada aplicabilidade, como o carvão ativado. O carvão ativado produzido pode ser empregado em diversas aplicações industriais, aproveitando eficientemente os resíduos da poda do ipê e contribuindo para práticas sustentáveis, ao mesmo tempo em que atende às demandas da indústria por materiais de alta qualidade. Este estudo busca não apenas explorar o potencial do carvão ativado derivado da poda de ipê, mas também estabelecer uma alternativa viável e

ecologicamente consciente para o setor industrial.

1.1 Problema de pesquisa

Estudos precedentes como o de Macêdo (2012), enfatizam a importância de avaliar a qualidade, o desempenho e a viabilidade econômica de novas fontes de carvão ativado, considerando diversos parâmetros. Por exemplo, pesquisas de Zheng (2019) exploraram as características físicas e químicas do carvão ativado de diferentes fontes, destacando a influência dessas propriedades nas aplicações industriais.

Além disso, o trabalho de Marsh (2006) discute as especificidades da produção de carvão ativado, enfatizando a necessidade de avaliação criteriosa para garantir a qualidade do produto final. Essas referências ressaltam a importância da análise comparativa entre o carvão de ipê e as opções convencionais. Diante disso, teria o carvão ativado produzido a partir da degradação térmica da poda do ipê uma possível aplicação na remoção de corantes de efluentes industriais?

A viabilidade econômica é um aspecto crítico na avaliação de novas fontes de carvão ativado. Rahman (2018) aborda as implicações econômicas da produção de carvão ativado a partir de matérias-primas alternativas, ressaltando a importância de avaliar custos de produção e a competitividade no mercado.

1.2 Justificativa

De acordo com BioParque (2019), o Ipê é a árvore mais cultivada e também a mais conhecida do Brasil. Ademais, o seu manejo naturalmente gera muitos resíduos, principalmente se tratando da poda dos seus galhos, que se faz necessária por questões de segurança, por melhora da estrutura ou por saúde da árvore. O estudo se faz válido porque, ao comparar o carvão ativado que foi produzido em laboratório com biomassa extraída da poda de Ipê, é explorada a possibilidade de uma alternativa sustentável e competitiva aos carvões ativados convencionais.

A crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental e a gestão responsável dos recursos naturais torna essencial a investigação de fontes de matéria-prima renovável, como a poda de Ipê, para a produção de carvão ativado.

Macêdo (2012) em um estudo precedente também destacou a importância de

avaliar a qualidade, o desempenho e a viabilidade econômica de novas fontes de carvão ativado, considerando diversos parâmetros. Além disso, aborda as implicações econômicas da produção de carvão ativado a partir de matérias-primas alternativas, ressaltando a necessidade de avaliar custos de produção e a competitividade no mercado. A qualidade do carvão ativado também é um aspecto crítico em suas aplicações industriais, (Pedroza, 2021). que exploram os critérios de qualidade e as propriedades adsorventes do carvão ativado.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Produzir carvão ativado através da degradação térmica, Utilizando galhos da poda de Ipê amarelo (*Handroanthus Ochraceus*).

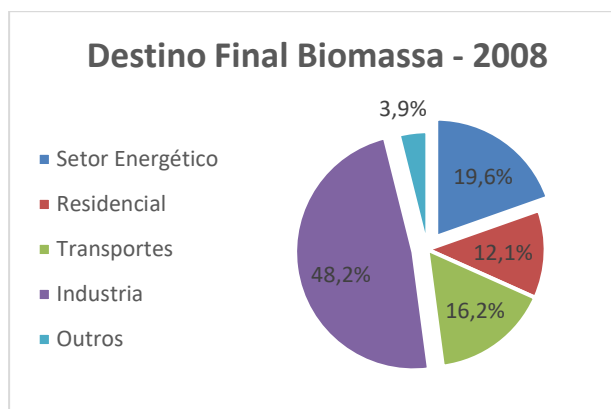
1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar as características da biomassa a ser empregada nesta pesquisa;
- Caracterizar o carvão ativado resultante do processo;
- Identificar as melhores condições de remoção de efluentes empregando o carvão ativado na adsorção do corante azul de metileno.

2 – REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Biomassa

A biomassa representa uma fonte de energia renovável derivada de matéria orgânica, como resíduos agrícolas, florestais, resíduos sólidos urbanos e culturas energéticas. É um tópico de grande relevância no contexto da busca por fontes energéticas mais limpas e sustentáveis, e seu estudo é essencial para compreender como essa fonte pode ser integrada eficazmente na matriz energética global, conforme Figura 1.

Figura 1 - Uso Final da Biomassa

Fonte: Balanço Energético Nacional, 2009 - adaptado

A conversão da biomassa em diferentes tipos de combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos é viável segundo Macêdo (2012), e esses produtos podem ser posteriormente empregados na produção de eletricidade, no fornecimento de calor e em diversas outras aplicações. Esse procedimento é executado por meio de três principais categorias de processos: termoquímicos, bioquímicos e mecânicos (Braga, 2012). Entre os processos termoquímicos, notáveis incluem a gaseificação, a combustão e a pirólise.

2.1.1 Biomassa de Resíduos Urbanos

A biomassa de resíduos urbanos consiste na matéria orgânica encontrada nos resíduos sólidos urbanos (RSU), que incluem alimentos descartados, resíduos de jardins, papelão e outros materiais orgânicos provenientes de áreas urbanas. Essa categoria também abrange a poda de árvores nas cidades, que contribui com material orgânico para a biomassa de resíduos urbanos. Essa biomassa pode ser convertida em biogás por meio da digestão anaeróbica, utilizado para geração de eletricidade e calor.

2.1.2 Biomassa de Resíduos Florestais

A biomassa de resíduos florestais engloba materiais orgânicos provenientes da exploração e processamento de recursos florestais, como galhos, cascas, serragem e a poda de árvores em ambientes florestais. Esses resíduos podem ser transformados em pellets de madeira, briquetes ou gaseificados para produção de energia.

2.1.3 Biomassa de Resíduos Agrícolas

A biomassa de resíduos agrícolas provém da agricultura e inclui resíduos como palha de cereais, cascas de arroz, bagaço de cana-de-açúcar e resíduos de poda de árvores em áreas agrícolas. Esses resíduos podem ser utilizados na produção de pellets, briquetes, etanol e calor, contribuindo para a geração de energia renovável. A poda de árvores em ambientes agrícolas é uma parte importante dessa categoria.

2.2 Produção do carvão ativado

Frequentemente são vistos estudos relacionados ao processo de pirólise lenta de biomassa com o objetivo de se obter um maior rendimento de resultantes sólidos (bio-carvão) segundo (Moreira, 2015). De acordo com Borges (2003), o mundo moderno segue padrões econômicos que visam o desenvolvimento tecnológico da produção de carvão ativado, buscando a redução de custo e assim proporcionando uma relação de custo benefício mais atraente agregado ao material produzido.

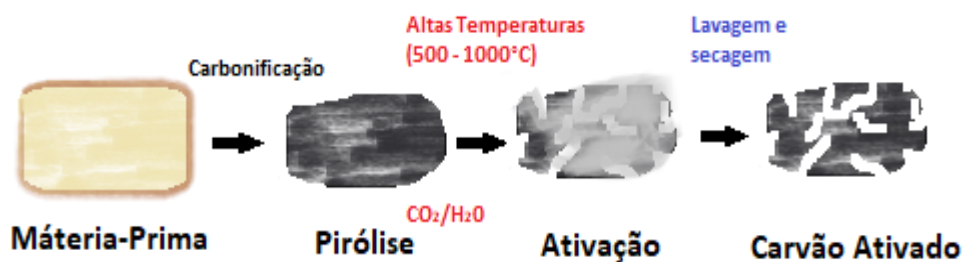
Borges (2003) relata também que a produção do carvão ativado ocorre a partir de duas principais etapas: a carbonização da matéria-prima, acima de 500°C, e a ativação, seguindo essas premissas, 2 pirólises foram feitas, uma com temperatura máxima controlada de 550°C e outra de 650°C, ambas por um período de 30 min, temperaturas essas que foram escolhidas a partir do trabalho de De Costa (2015), que teve carvão a 650°C com azul de metileno como corante para adsorção, desta forma, foi utilizada a mesma temperatura e uma inferior como foi o caso da pirólise a 550°C. A carbonização compõe-se da degradação térmica do material, promovendo a eliminação de espécies não carbônicas e produzindo uma massa de carbono fixa que apresenta estrutura porosa rudimentar, ao qual poros extremamente finos e fechados são produzidos nesta etapa, .

Em subsequente a pirólise, ocorre a ativação. A ativação visa o aumento da área superficial do material resultante do processo anterior. Tal etapa é fundamental para a promoção do aumento da porosidade do carvão e a criação de outros. No processo de ativação pode-se realizar o controle das características básicas do material, a fim de obter configurações de maior aproveitamento para a aplicação desejada (Marsh, 2006).

A ativação pode se ocorrer de duas formas Segundo Borges (2003), sendo elas:

Física: Onde as moléculas ligam-se fracamente ao adsorvente, não ocorrendo assim alteração em suas características. Durante o processo é utilizado vapores de água, CO_2 , ou uma mistura destes dois gases ilustrado na Figura 2.

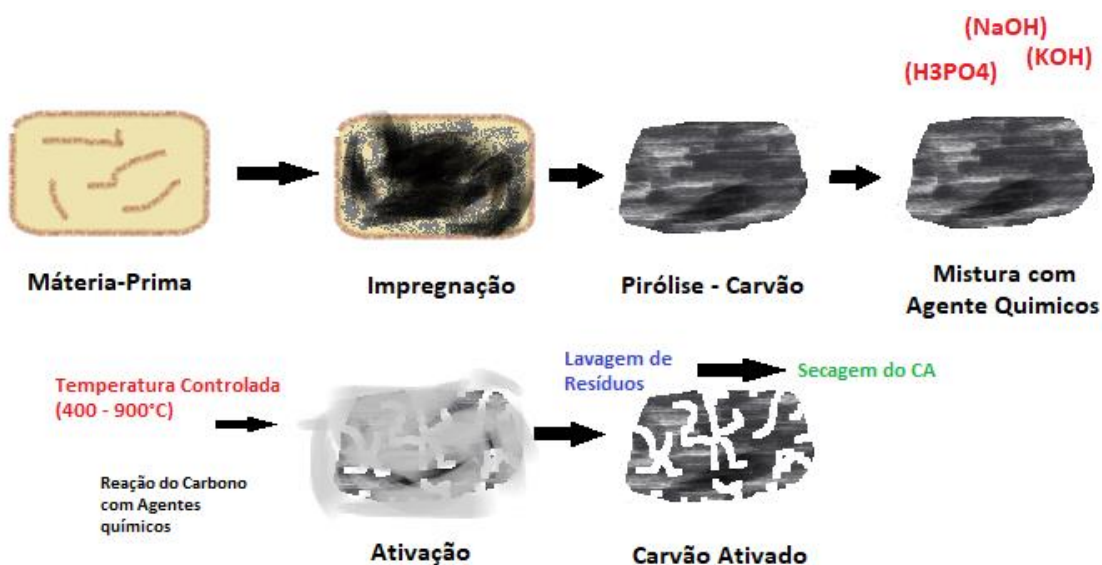
Figura 2 - Esquema de ilustração Simplificada de Ativação Física



Fonte: Adaptação (OLIVEIRA, 2016)

Química: Se tem a ocorrência da ligação de valências livres das moléculas do adsorvente no adsorbato. Tal processo utiliza agentes ativantes, como ZnCl_2 (cloreto de zinco), H_2SO_4 (ácido sulfúrico), H_3PO_4 (ácido fosfórico), hidróxidos de metais alcalinos, (Figura 3).

Figura 3 - Esquema de ilustração Simplificada de Ativação Química



Fonte: Adaptação (OLIVEIRA, 2016).

2.3 Uso do carvão ativado na indústria

O Carvão Ativado (CA) é um material versátil amplamente utilizado na indústria

devido às suas propriedades únicas de adsorção e purificação. A adsorção é o processo de aderir moléculas de gases, líquidos ou sólidos à superfície do carvão ativado, o que o torna eficaz na remoção de impurezas e compostos indesejados. Aqui estão algumas das principais aplicações do carvão ativado na indústria:

2.3.1. Tratamento de água e efluentes

O CA é amplamente utilizado para purificar água e remover impurezas, compostos orgânicos, cloro, corantes, odores e sabores indesejados (WESTPHALEN, 2016).

Assim como também é usado em sistemas de tratamento de água potável, estações de tratamento de águas residuais e em processos de purificação de água para indústrias.

2.3.2. Filtragem de ar

O CA é usado em filtros de ar para remover gases, vapores e odores indesejados presentes no ar.

Em muitas aplicações industriais, é essencial para a remoção de poluentes do ar, proporcionando ambientes de trabalho mais seguros e saudáveis.

2.3.3. Processamento químico e farmacêutico

Na indústria química e farmacêutica, o carvão ativado é utilizado para purificar produtos químicos e fármacos, removendo impurezas e substâncias indesejadas durante a produção, assim como também é utilizado em formulação de remédios (COLARES, 2010).

2.3.4. Recuperação de solventes

O CA é empregado na recuperação de solventes usados em vários processos industriais, ajudando a reduzir os custos de produção e o impacto ambiental (GUILARDUCI, 2006).

2.3.5. Processamento de alimentos e bebidas

Na indústria alimentícia, o carvão ativado é usado para descolorir, purificar e desodorizar óleos, gorduras e corantes alimentares. A pesquisa de Soares (2004) retrata o uso do carvão ativado em processo de remoção de componente de leite em

pó.

Também é utilizado na produção de bebidas alcoólicas para melhorar a sua pureza e claridade, assim como já se teve aplicação como corante.

2.3.6. Odorização e desodorização

O carvão ativado é também utilizado para controlar odores indesejados em vários ambientes industriais, como estações de tratamento de esgoto, fábricas de alimentos e plantas de tratamento de resíduo (SOARES, 2004).

2.3.7. Catálise

Em certas aplicações, o carvão ativado é utilizado como suporte para catalisadores em reações químicas, melhorando a eficiência e a seletividade das reações. Santos (2014) em seu trabalho retrata sobre o uso de carvão ativado com suporte em catálise.

A eficácia do carvão ativado em cada aplicação depende de fatores como a sua porosidade, área superficial, tamanho das partículas e as propriedades específicas dos contaminantes presentes no meio a ser tratado.

2.4 Ipê Amarelo – (*Handroanthus Ochraceus*)

O Ipê amarelo, cientificamente conhecido como *Handroanthus ochraceus*, é uma espécie de árvore nativa da América do Sul, mais especificamente da região do Cerrado brasileiro e partes da Amazônia e do Pantanal. Essa árvore é conhecida por sua beleza e esplendor, sendo um dos símbolos da flora brasileira, pertence à família *Bignoniaceae* e é uma das muitas espécies de ipês encontradas no Brasil. Ele é amplamente reconhecido por sua floração exuberante, que ocorre geralmente durante a estação seca, quando suas folhas caem e a árvore fica coberta de flores amarelas vibrantes, (BioParque, 2019). O nome "*ochraceus*" refere-se à cor amarela-dourada de suas flores. Além de sua beleza, o Ipê amarelo também é apreciado por suas propriedades medicinais em algumas culturas indígenas, que utilizam suas partes em preparações medicinais. No entanto, como muitas espécies vegetais, o Ipê amarelo enfrenta ameaças devido ao desmatamento e à exploração inadequada. Portanto, a promoção de práticas de manejo sustentável e a conscientização sobre a importância de sua conservação são fundamentais.

Na Figura 4 pode-se observar o crescimento do Ipê Amarelo em diferentes estágios: a) 8 a 20 dias - Plântula; b) 4 a 5 meses – Muda; c) 1 a 3 anos - Arbusto e d) 3 a 7 anos ou mais. Vale ressaltar que conforme o tipo de solo, período de estiagem, período de chuva/irrigação, entre outras, pode-se ter um desenvolvimento acelerado ou retardado (PEDROZA, 2019).

“Antes de florir, o Ipê perde toda a sua folhagem. Quando floresce, a árvore está totalmente desprovida de folhas. Quando caem as flores o Ipê retoma sua folhagem e um novo ciclo se inicia.”

Figura 4 - Estágios de Desenvolvimento do Ipê Amarelo



Fonte: BioParque Brasil (2019)

A Figura 5 ilustra como o ipê amarelo se comporta conforme as transições de estações do ano.

Figura 5 - Comportamento do Ipê nas transições de estações



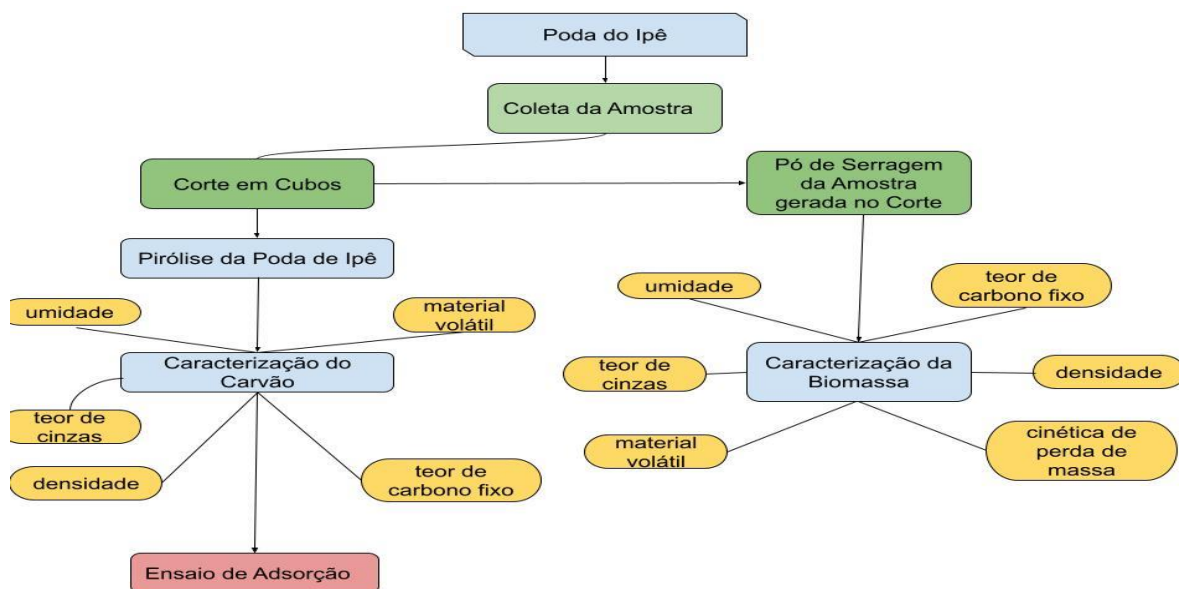
Fonte: BioParque Brasil (2019)

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Tipo de pesquisa

Foi realizada uma pesquisa do tipo experimental, que seguiu algumas etapas, conforme está demonstrado na Figura 6.

Figura 6 - Desenho esquemático das etapas do trabalho experimental



Fonte: Autor, 2023.

3.2 Coleta e preparo da amostra

A amostra desta pesquisa foi a poda de Ypê Amarelo (*Handroanthus ochraceus*) como na imagem da Figura 7. Foram aproveitadas podas dos pés de ypê amarelo do município de Palmas, Estado do Tocantins, mês de Agosto. As amostras foram levadas a uma marcenaria com o intuito de se obter amostras padronizadas em forma de cubos.

Figura 7 – Material *in natura* utilizado no experimento



Fonte: Jornal Municipal de Palmas – Fotógrafa: Lia Mara (2021)

De forma posterior, foram armazeados em caixa de papelão Figura 8 no LARSEN (Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética) do IFTO, *Campus* Palmas. A biomassa foi submetida a secagem a 50 °C por 24 horas, em uma estufa de secagem e esterilização da marca Bolab, modelo SL – 100.

Figura 8 – Amostra em forma de cubo para Pirólise



Fonte: Autor, 2023.

3.3 Caracterização da biomassa em estudo

3.3.1 Análise Imediata da Biomassa

A análise do resíduo foi realizada no Laboratório e Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) do Instituto Federal do Tocantins (IFTO), Campus de Palmas.

3.3.1.1 Densidade aparente

A densidade aparente foi realizada conforme a metodologia de Rodrigues (2019), com a utilização de proveta de 100 mL, sendo inserida a biomassa de 20 em 20g, até alcançar as 100g, com apoio de balança analítica para pesagem precisa, conforme Figura 9.

Figura 9 - Ensaio de densidade aparente da biomassa



Fonte: Autor, 2023.

Para a realização do teste, a balança foi zerada e logo depois foi adicionado a biomassa para obtenção das massas em gramas nas sucessivas adições nos respectivos volumes de 20, 40, 60, 80 e, por fim, 100 mL, conforme já descrito.

Com a realização deste processo, determinada a densidade, a média e o desvio padrão, partindo do princípio de que a densidade é a relação de massa e o volume da amostra (Equação 01).

$$D \left(\frac{g}{mL} \right) = \frac{M(g)}{V(mL)} \quad \textbf{(Equação 01)}$$

Sendo:

D = Densidade (g/ml)

M = Massa (g)

V = Volume (ml)

3.3.1.2 Umidade

Com a finalidade de determinar o teor de umidade na biomassa, foi adotada a metodologia descrita por Rodrigues (2019), que se baseia nas diretrizes estabelecidas pela Norma ASTM D 3173-87. O procedimento envolve a adição de cerca de 10g da biomassa a um cadinho de porcelana cujo peso já foi previamente ajustado e mantido constante, atingindo aproximadamente 100g, como ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Adição da biomassa ao cadinho de porcelana



Fonte: Autor, 2023.

Logo após a amostra foi aquecida em uma estufa à temperatura de 50°C por um período de 60 minutos, conforme demonstra a Figura 11.

Figura 11 - Estufa que aqueceu a amostra



Fonte: Autor, 2023.

Logo após esse procedimento, o cadinho foi colocado em um dessecador por um período de 15 minutos e em seguida medida a sua massa. Este procedimento realizado em forma de duplicata, sendo que o teor de umidade foi determinado por meio da Equação 02.

$$U(\%) = \left(\frac{X-Y}{Z} \right) * 100 \quad \textbf{(Equação 02)}$$

Sendo:

U = Umidade (%)

X= peso do cadinho + amostra (g)

Y= peso do cadinho + amostra após o aquecimento (g)

Z= peso da amostra (g)

3.3.1.3 Material volátil

De acordo com a metodologia proposta por Sanchez (2009), a qual segue as orientações estabelecidas na ABNT NBR 8112/86 (Carvão vegetal - Análise imediata - Método de ensaio) para a determinação do teor de material volátil na biomassa proveniente da poda de ipê, o procedimento foi executado em triplicata. Cerca de 1g da amostra foi meticulosamente pesado em um cadinho de porcelana, cujo peso já

havia sido previamente ajustado e mantido constante. Subsequentemente, a amostra foi submetida a um processo de aquecimento em um forno mufla (Figura 12) a uma temperatura de 850° C, em uma atmosfera isenta de oxigênio, por um período de 7 minutos. O cálculo do teor de material volátil foi realizado de acordo com a Equação 03.

Figura 12 - Mufla a ser utilizada para a obtenção do material volátil



Fonte: Autor, 2023.

$$\text{Material Volátil (\%)} = \left(\frac{A-B}{C} \right) * 100 \quad (\text{Equação 03})$$

Legenda:

A= peso do cadinho vazio + peso da amostra (g)

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

C= peso da amostra (g)

3.3.1.4 Teor de cinzas

O teste para determinar o teor de cinzas seguiu a metodologia estabelecida por Paz e Paschoalato (2021), a qual se baseia na norma ABNT NBR 8112/86.

Os cadinhos utilizados nos testes de umidade e material volátil foram posicionados em uma mufla, a uma temperatura de 710 °C, por um período de 1 hora, em uma atmosfera oxidante, sem a utilização da tampa de vedação. Após esse processo, os cadinhos foram transferidos para um dessecador e mantidos por um

período de 60 minutos. Em seguida, suas massas foram registradas. Este ensaio foi conduzido em duplicata. O resultado do teor de cinzas foi determinado utilizando a Equação 04, conforme descrito a seguir:

$$\text{Cinzas (\%)} = \left(\frac{(A-B)}{(C)} \right) * 100 \quad (\text{Equação 04})$$

Onde:

A= peso do cadinho + amostra após calcinação (g)

B= peso do cadinho vazio (g)

C= peso da amostra (g)

3.3.1.5 Teor de carbono fixo – CF

Para determinar o teor de carbono fixo (CF), foi seguida a metodologia estabelecida por (Pedroza, 2011). Nessa abordagem, o Carbono Fixo foi calculado com base na porcentagem de material remanescente após a realização dos ensaios para medir os teores de umidade, material volátil e cinzas. O valor do teor de Carbono Fixo foi obtido por meio da aplicação da Equação 05, conforme detalhado a seguir.

$$\text{Carbono Fixo (\%)} = 100 - [\text{Umidade(\%)} + \text{Cinzas(\%)} + \text{Material Volátil(\%)}] \quad (\text{Equação 05})$$

3.3.1.6 Cinética de perda de massa

A cinética de perda de massa da biomassa foi realizada em duplicata com a finalidade de comparar as diferenças de perdas de massa nas mesmas condições, sendo essas condições: biomassa em estufa por 60 min a 50°C. De forma posterior foi escolhida a que teve um gráfico mais homogêneo diante da perda de massa apresentada. Após aquecimento do material no determinado intervalo de tempo, o cadinho era então resfriado em dessecador para não ter interferência em umidade por 15 minutos e pesado em balança analítica da Marca BELL Engineering, modelo MARK L 1002i (Figura 13).

Figura 13 - Balança analítica utiliza e cadinho com Biomassa



Fonte: Autor, 2023.

3.4 Pirólise de biomassa

A degradação térmica foi realizada através de um reator de leito fixo tubular de aço, de 100 cm de comprimento. O sistema com o reator de leito fixo pode ser observado na Figura 14. A biomassa foi inserida ao reator na forma de cubos, após passar por estufa a uma temperatura de 50°C. O reator foi aquecido através de um forno bipartido reclinável, e foi operado em regime de batelada, sendo empregado vapor de água como o gás de arraste. Foram empregadas duas temperaturas diferentes para as duas etapas de ativação do carvão. Uma das ativações ocorreu à temperatura controlada de 650°C e a outra a 550°C, ambas pré-aquecidas a 200°C, com uma taxa de aquecimento de 30°C/min até atingir a temperatura desejada.

Figura 14 - Sistema que foi usado para efetuar a pirólise



FONTE: Autor 2023

Os ensaios de pirólise foram realizados nas dependências do Laboratório LARSEN – IFTO, Campus Palmas. Após a reação e o resfriamento do material, o carvão foi coletado, pesado e armazenado. O rendimento do material foi determinado por meio da relação entre a massa final, após a pirólise e a massa inicial da biomassa empregada antes da pirólise.

3.5 Procedimentos analíticos empregados na caracterização do carvão ativado

3.5.1 Análise Imediata do Carvão Ativado

A análise imediata do carvão obtido no processo foi realizada no LARSEN – IFTO, Campus Palmas. Com isso Foram determinados os teores de umidade, material volátil, cinzas e carbono fixo no carvão obtido no processo de pirólise através dos métodos e Equações descritas nos itens 3.3.1.2, 3.3.1.3, 3.3.1.4 e 3.3.1.5, respectivamente.

3.5.1.1 Densidade Aparente do Carvão

A densidade aparente do carvão foi determinada por meio da relação entre massa e volume de carvão em uma proveta de acordo com o procedimento descrito no item 3.3.1.1.

3.6 Teste de Adsorção

Para o teste de adsorção foram utilizadas 11 amostras de carvão de Ipê amarelo em pó, produzido por pirólise à temperatura de 650°C, - (o qual demonstrou melhores características) - Com diferentes massas de 0,4; 0,7 e 1,0g, que adsorveram o corante azul de metileno, com auxílio da mesa de agitação (Shaker TE141) ilustrado na Figura 15, que com movimentos circulares horizontais por 20min, ajudando o carvão a ter o desempenho esperado na adsorção o corante Azul de Metileno. O ensaio foi realizado no LARSEN-IFTO/Campus Palmas.

Figura 15 - Mesa de Agitação - Shaker TECNAL, Modelo TE-141



Fonte: Autor, 2023.

O corante ao qual foi utilizado foi o Azul de Metileno, de composição química: $(C_{16}H_{18}ClN_3S)$. Foram Separados 30 ml do corante em cada uma das 11 amostras, com as seguintes concentrações de Azul de Metileno: 20; 60 e 100 mg/L, que após 20 minutos na mesa de agitação, foram adsorvidas pelo conteúdo de carvão nelas presentes, e, em seguida o corante adsorvido foi filtrado, para separá-lo do carvão, de forma posterior foram levados ao espectrofotômetro calibrado a 660nm (Figura 16), para determinação de sua absorbância.

Figura 16 - Espectrofotômetro HACH, modelo DR 6000



Fonte: Autor, 2023.

Para a curva de calibração do espectrofotômetro, foram adotados parâmetros como: concentrações de corante de 20; 60 e 100 mg/L; e, massa de carvão de 0,4; 0,7 e 1,0g; conforme Tabela 1, Os combinando de forma a se obter o

máximo de resultados e comportamentos distintos de todas as razões de amostras possíveis.

Tabela 1 - Fatores e Níveis do Experimento

FATORES		NÍVEIS		
Variáveis	Unidades	-1	0	+1
Massa de Carvão	g	0,40	0,70	1,00
Concentração do Corante	mg/L	20	60	100

Fonte: Autor, 2023.

Desta forma, o número de experimentos, foi determinado pela Equação 06 com o desígnio de testar todas as possibilidades de combinação entre as massas de carvão ativado (g) e concentrações de corante (mg/L), sendo que 3 deles foram feitos com a mesma razão de carvão ativado x concentração de corante, pois era esse o ponto central do ensaio ((Nível 0): (0,70 g X 60 mg/L)), e as demais razões tiveram somente experimento genuíno, Conforme o Tabela 2, que também apresenta a ordens dos ensaios.

$$NE = r \cdot (2^k + 2 \cdot k) + cp \quad \text{(Equação 06)}$$

Legenda:

NE = Número de experimentos

r = Repetições genuínas

k = Número de Variáveis

cp = Pontos centrais

Constituindo, 3 ensaios com mesma razão de massa e concentração de corantes (Tabela 2 - experimentos 9; 10; 11) que são o ponto central do experimento.

Tabela 2 - Combinação de Níveis e Ordem dos Experimentos

Ordem dos Experimentos	X ₁ Massa de carvão (g)	X ₂ Concentração do corante (mg/L)
1	-1 (0,40)	-1 (20)
2	1 (1,00)	-1 (20)
3	-1 (0,40)	1 (100)
4	1 (1,00)	1 (100)

5	-1 (0,40)	0 (60)
6	1 (1,00)	0 (60)
7	0 (0,70)	-1 (20)
8	0 (0,70)	1 (100)
9	0 (0,70)	0 (60)
10	0 (0,70)	0 (60)
11	0 (0,70)	0 (60)

Fonte: Autor, 2023.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização da Biomassa

4.1.1 Análise Imediata

Nessa parte do trabalho são apresentados os dados da análise imediata da biomassa do experimento que foram analisadas a partir do pó da serragem da poda de ipê.

4.1.1.1 – Teor de umidade

Foi-se obtido um valor de 3,161%, para o teor de umidade da biomassa e carvões (Tabela 3).

Para biomassa indica que, após a secagem, essa biomassa se torna adequada para a combustão e processos como a pirólise devido à sua baixa umidade.

Tabela 3 - Dados Umidade Biomassa

Amostra	Massa cadinho + amostra	Teor de Umidade (%)	Teor de Umidade (%)	Média Umidade (%)
Biomassa ipê	1 2,904866	37,4065	2,904866	
	2 3,200985	34,2538	3,200985	3,161884
	3 3,379801	34,1811	3,379801	

Fonte: Autor, 2023.

Existe uma relação inversa entre o teor de umidade e a capacidade de combustão do material. Conforme definido por Almeida (2008), biomassa com um teor de umidade inferior a 10% é considerada apropriada para processos de transformação termoquímica.

4.1.1.2 – Teor de cinzas

O teor de cinzas na biomassa refere-se à proporção de compostos inorgânicos, tais como cálcio, ferro, fósforo, magnésio e sódio, por exemplo. Com a tampa da mufla aberta, no qual os componentes orgânicos reagem com o oxigênio, resultando apenas em resíduos inorgânicos. No caso da poda de Ipê, o valor obtido para esse parâmetro foi de 3,25%, um teor bem satisfatório, já que como já citado trata-se da proporção de minerais inorgânicos, (Tabela 4).

Tabela 4 - Teor de Cinzas Biomassa

Amostra		Massa cadinho + amostra	P3 (710)	Teor de Cinzas (%)	Média Teor de Cinzas (%)
Biomassa ipê	1	37,4065	36,4775	3,620707542	3,2489
	2	34,2538	33,3088	3,047091413	
	3	34,1811	33,2147	3,078928894	

Fonte: Autor, 2023.

4.1.1.3 – Teor de material volátil

A poda de ipê apresentou um valor de 85,703% como mostra o Tabela 5, quanto ao teor de material volátil, Esse valor está intimamente ligado à reatividade da biomassa.

Tabela 5 - Teor Material Volátil

Amostra		Massa cadinho + amostra	Material Volátil (%)	Média (%)
Biomassa ipê	1	37,4065	81,90683681	85,7032
	2	34,2538	87,70903868	
	3	34,1811	87,49373182	

Fonte: Autor, 2023.

Segundo Macêdo (2012), a faixa a qual biomassas se tem um bom resultado é de 65 a 83%, o que mostra que a biomassa da poda de ipê teve um teor de material volátil um pouco acima do esperado.

4.1.1.4 – Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo se trata do material remanescente após a liberação dos componentes voláteis, excluindo a umidade e as cinzas, o teor de carbono fixo da poda de ipê triturada, que foi de 7,886%, valor considerado baixo, sendo que se obteve um alto valor de material volátil, o que remanesce à ele faz parte do carbono fixo, como mostra Tabela 6.

Tabela 6 - Dados Carbono Fixo Biomassa

Amostra		Massa cadinho + amostra	P3 (710)	Carbono fixo (%)	Média Carbono fixo (%)
Biomassa ipê	1	37,4065	36,4775	11,56759	7,886
	2	34,2538	33,3088	6,04288499	
	3	34,1811	33,2147	6,04753786	

Fonte: Autor, 2023.

4.1.2 Densidade

Para densidade da biomassa, foram separadas 5 amostras, como expõe Tabela 7. Em 5 diferentes volumes, posteriormente aferidos os volumes, se obtendo uma densidade média de 0,145 g/mL através da Equação 01.

Tabela 7 - Densidade Média da Biomassa

Densidade (g/mL)	Massa (g)	Volume (mL)
0,113	2,26	20
0,124	4,99	40
0,139	8,07	60
0,137	10,96	80
0,217	21,70	100
0,145	Densidade Média	

Fonte: Autor, 2023.

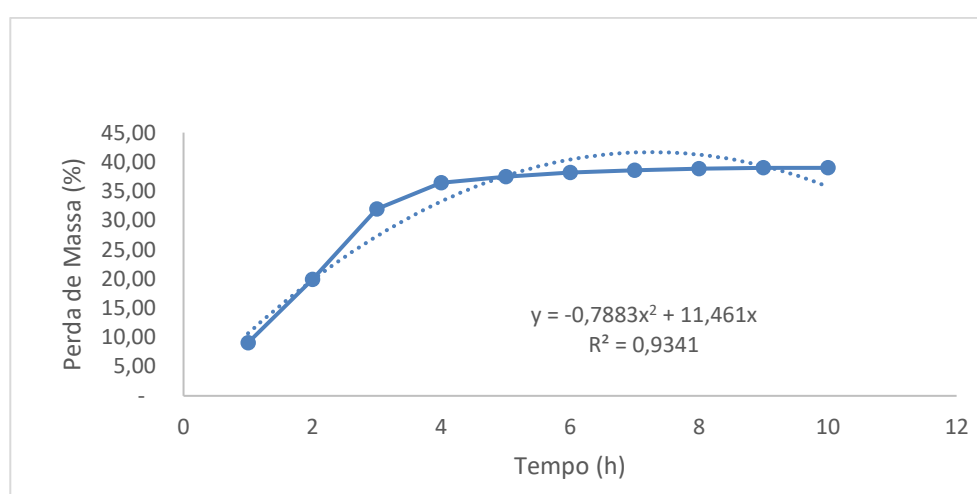
A pesquisa de Paz (2023), obteve uma densidade de 0,158 g/mL com a pirólise de coco, um resultado muito próximo, por ser um valor baixo, o autor sugere que a biomassa tenha estrutura porosa, com espaços vazios preenchidos por ar.

4.1.3 Cinética de Perda de Massa

Para o procedimento descrito no item 3.3.1.6 temos Perda de Massa versus Tempo de secagem com representação gráfica e equação da reta.

A Figura 17 mostra como foi o comportamento da biomassa no ensaio de cinética de perda de massa e também o porquê da não necessidade de se fazer o ensaio por mais tempo, o que fica abonado pelo gráfico é a alta perda de massa nas 2 primeiras horas e que a partir da 6ª hora há estabilização e a perda de massa se tornava irrisória.

Figura 17 - Curva de Cinética de Perda de Massa



Fonte: Autor, 2023

A cinética de perda de massa da biomassa foi realizada em duplicata com a finalidade de comparar as diferenças de perdas de massa nas mesmas condições, sendo utilizada a que se mostrou mais homogênea. O ensaio foi feito em estufa a 50 °C. Possuindo um coeficiente de determinação $0 < (R^2) < 1$, mas que se aproxima bastante de 1,00 ($R^2 = 0,9341$), o que mostra que as variáveis explicam bem o modelo. Tendo esses dados em mãos percebe-se que, ao recolher 1 tonelada (1.000 kg) de biomassa proveniente da poda de Ipê para pirólise, teremos uma perda de 38,97% em massa, resultando em 610,30 kg de biomassa pronta a ser levada à degradação térmica e posterior obtenção de carvão.

4.2 Rendimento do Carvão Ativado da Poda do Ipê amarelo

O Tabela 8 contém dados como temperatura das 2 pirólises realizadas, a massa do recipiente (Barca), massa da biomassa pré e pós pirólise para o rendimento da Massa, calculadas através da Equação 07.

Tabela 8 - Dados de Rendimento do Carvão

Temperatura (°C)	Massa Recipiente (g)	massa recipiente + carvão (g)	Massa inicial Material (g)	Massa Final do conjunto (g)	Massa carvão Pós Pirólise (g)	Rendimento do carvão (%)
550	189	273,15	84,15	211,60	22,60	26,86%
650	189	276,36	87,36	210,91	21,91	25,08%

Fonte: Autor, 2023.

$$\text{rendimento (Em massa)} = \frac{M_f}{M_i} \times 100 \quad (\text{Equação 07})$$

Legenda:

M_f = Massa final (Carvão); (g)

M_i = Massa inicial Biomassa; (g)

A Figura 18 trata-se da biomassa, pré e pós pirólise e suas respectivas massas, pelas quais foram utilizadas para obtenção do rendimento.

Figura 18 – Massas Biomassa e Carvão 650°C



Fonte: Autor, 2023.

Na Tabela 9 temos dados de rendimento em massa do carvão produzido da poda de ipê em comparação a carvões de outros autores, produzido com temperaturas próximas.

Tabela 9 - Comparação de Rendimento em relação a carvões de outros autores

Tipo	Carvão desta Pesquisa	MAIA, (2021)	LINHARES, (2016)
Rendimento	26,86	27,50	37,20

Fonte: Autor, 2023.

Os dados Mostram que o carvão pirolítico feito a partir da poda de ipê, tem-se um rendimento satisfatório, sendo que também é observado que conforme for maior a temperatura de pirólise, menor o rendimento do carvão. O carvão a 650°C obteve 26,86% de rendimento em massa, valor muito próxima aos 27,50 do carvão feito a partir da casca da castanha de caju (MAIA, 2022).

4.3 Caracterização do Carvão

4.3.1 Análise Imediata do Carvão

Os carvões desta pesquisa tiveram, na pirólise, taxa de aquecimento de 30°C/min e temperaturas diferentes de (550°C e 650°C) e, obtiveram valores distintos como já era esperado, sendo que, o carvão pirolítico obtido aos 650°C apresentou notavelmente melhores características, como registraod na Tabela 10, com um menor teor de material volátil e um maior teor de carbono fixo, portando foi o escolhido para fazer o teste de adsorção do corante Azul de Metileno.

Tabela 10 - Características dos Carvões Obtidos

PARÂMETRO	Carvão a 550C	Carvão a 650C
Umidade (%)	4,1	4,0
Cinzas (%)	3,6	3,9
material volátil (%)	67	52
Carbono Fixo (%)	25,4	40

Fonte: Autor, 2023.

À Tabela 11 a comparação dos teores do carvão obtido através da pirólise feita a 650°C a partir da biomassa escolhida para esta pesquisa e o carvão de estudo de outros autores.

Foi-se notado que, todos os parâmetros tiveram teores equivalentes, dando indícios que o carvão da poda de ipê, pode ser funcional.

Tabela 11 - comparação de parâmetros do carvão com o de outros autores

PARÂMETRO	Carvão desta Pesquisa	MAIA, (2021)	LINHARES, (2016)
Umidade (%)	4,0	6,1	5,76
Cinzas (%)	3,9	2	3,8
material volátil (%)	52	75,1	76,2
Carbono Fixo (%)	40	20,1	20,1

Fonte: Autor, 2023.

O teor de umidade se apresentou baixo com um valor bem satisfatório, abaixo dos 10%, para os 3 estudos. Para teor de cinzas, quanto menor, melhor é a biomassa, sendo o teor desse estudo considerado bom, o que resulta em uma boa degradação térmica.

Já para o teor de material volátil essa pesquisa obteve um valor relativamente baixo, o que mostra que o mesmo tem menos impurezas em relação aos outros expostos.

De forma proporcionalmente inversa vem o teor de carbono fixo que está ligado ao teor de material volátil, sendo que foi considerado alto (40%) em relação aos demais comparados de 20,1%; pois é a fração de resíduos remanescente à queima dos combustíveis.

4.3.1.1 – Teor de umidade

Se ter um elevado teor de umidade pode afetar a eficiência do carvão quando se trata de adsorção, segundo Almeida (2008), esse teor é propício pois é abaixo de 10%, portanto o carvão obtido através da degradação térmica da poda de ipê se mostra dentro do esperado (4,10%) para o carvão de 650°C (Tabela 12).

Tabela 12 - Teores de Umidades Médias

Variável Analítica	Carvão desta Pesquisa	MAIA, (2021)	LINHARES, (2016)
--------------------	-----------------------	--------------	------------------

Umidade média (%)	4,1	6,1	5,76
--------------------------	-----	-----	------

Fonte: Autor, 2023.

4.3.1.2 – Teor de cinzas

O conteúdo de resíduos inorgânicos está relacionado à quantidade de substâncias não carbonizadas deixadas após a combustão do carvão. Principalmente composto por minerais inorgânicos e outros materiais que não sofrem carbonização durante o processo de ativação, esses resíduos constituem o teor de cinzas. Em termos gerais, a avaliação da pureza e eficácia do carvão ativado considera o teor de cinzas como um parâmetro crucial. Quanto mais baixo o teor de cinzas, melhor, indicando maior pureza e menor presença de impurezas inorgânicas no carvão ativado. Vale destacar que, neste experimento, o teor de cinzas foi considerado muito satisfatório. (Tabela 13).

Tabela 13 - Valores Médios Teor de Cinzas

Variável Analítica	Carvão desta Pesquisa	MAIA, (2021)	LINHARES, (2016)
Cinzas (%)	3,9	2	3,8

Fonte: Autor, 2023.

Altos níveis de cinzas podem afetar negativamente as propriedades de adsorção do carvão ativado, reduzindo sua capacidade de absorver substâncias indesejadas. para aplicações industriais e de purificação de água, níveis de cinzas abaixo de 5% são desejáveis, o que é percebido através do Tabela 13 para os 3 carvões.

4.3.1.3 – Teor de material volátil

Linhares (2016) obteve um teor de Material volátil de 76,20% para o carvão proveniente do resíduo da casca da acácia negra, um valor que fica próxima ao carvão de 550°C dessa pesquisa que obteve 67% de material volátil, já o de 650°C mostrou um valor melhor em relação aos demais carvões que foi de 52%, o que mostra que o mesmo tem menos impurezas em relação aos outros expostos na Tabela 14.

Tabela 14 - Médias de Material Volátil

Variável Analítica	Carvão desta Pesquisa	MAIA, (2021)	LINHARES, (2016)
Material Volátil (%)	52	75,1	76,2

Fonte: Autor, 2023.

4.3.1.4 – Teor de carbono fixo

Já para o Carbono fixo em comparação ao mesmo carvão do resíduo da casca da acácia, temos valores bem próximos, sendo 20,1% de Carbono fixo para o carvão de Linhares (2016) e, 25 e 40% para os dois carvão dessa pesquisa (Tabela 15).

Tabela 15 - Média de Carbono Fixo

Variável Analítica	Carvão desta Pesquisa	MAIA, (2021)	LINHARES, (2016)
Carbono Fixo (%)	40,0	20,1	20,1

Fonte: Autor, 2023.

4.3.2 Teste de Adsorção

Os dados na Tabela 16, tratam-se da ordem dos ensaios, sendo: Massa de carvão (X_1); Concentração do corante Azul de metileno (X_2); dados em (g e mg/L) respectivamente, e, dos resultados de Absorbância(Y_1); Eficiência de remoção (Y_2) e Razão de Adsorção (Y_3), obtidos através da degradação térmica por pirólise da poda de ipê com temperatura controlada de 650°C, com taxa de aumento de 30°C/min.

Tabela 16 - Dados do Teste de Adsorção

Ordem dos Experimentos	Massa de carvão (g)	Concentração do corante (mg/L)	Absorbância	Eficiência de Remoção (%)	Razão de Adsorção (mg/g)
1	-1(0,40)	-1(20)	0,08	98,79	1,48
2	1(1,00)	-1(20)	0,04	99,02	0,59

3	-1(0,40)	1(100)	1,14	98,71	7,40
4	1(1,00)	1(100)	0,03	99,81	2,99
5	-1(0,40)	0(60)	1,76	96,80	4,36
6	1(1,00)	0(60)	0,04	99,67	1,79
7	0(0,70)	-1(20)	0,05	98,98	0,85
8	0(0,70)	1(100)	0,09	99,75	4,27
9	0(0,70)	0(60)	0,43	99,03	2,55
10	0(0,70)	0(60)	0,25	99,32	2,55
11	0(0,70)	0(60)	0,25	99,31	2,55

Fonte: Autor, 2023.

As condições às quais se mostraram melhores foram as de maior massa e menor concentração de corante, como é o caso dos experimentos 6 e 2, aos quais possuíam o nível máximo de massa empregada no ensaio, obtendo razões de adsorção muito baixas como: 0,59 e 0,85 mg/g; e ótimas eficiências de remoção de: 99,02 e 98,02.

A Figura 19 retrata em diferentes níveis como foi a eficiência de adsorção devido às diferentes combinações entre massa de carvão x concentração de corante, com todos os copos com o conteúdo adsorvido do corante pós adição de diferentes massa de carvão.

Figura 19 - Conteúdo de Corante Azul de Metileno em Cada Experimento



Fonte: Autor, 2023.

Aos extremos o de número 2, ao qual teve o menor valor de razão de adsorção, resultando em uma adsorção muito eficaz. Já no extremo à direita os de número 3 e 5, aos quais tiveram a menor eficácia devido à sua razão de adsorção o que pode ser aferido com o auxílio do Tabela 16.

4.3.3 Razão de Adsorção

Na Tabela 17 temos os regressores do modelo aos quais foram utilizados para a equação de Razão de adsorção (Y_3).

Tabela 17 - Coeficientes de Regressão para Razão de Adsorção do Carvão

Nome	Coeficiente	Erro Padrão	t calculado	p-valor
Média	2,54	0,10	25,94	0,0000
X ₁	-1,31	0,08	-16,78	0,0000
X ₁ ²	0,54	0,12	4,50	0,0064
X ₂	1,96	0,08	25,08	0,0000
X ₂ ²	0,03	0,12	0,23	0,8271
X ₁ . X ₂	-0,88	0,10	-9,21	0,0003
$\alpha = 5\%$				

Fonte: Autor, 2023.

Ao analisar os resultados, observa-se que os valores-p obtidos foram todos bastante baixos. Com um nível de significância de 5%, todos os valores-p, exceto o quinto (0,8271), estão abaixo desse limiar, sugerindo fortes evidências para rejeitar a hipótese nula em cada caso. Isso implica que os resultados são estatisticamente significativos e contribuem para o entendimento das relações ou diferenças investigadas. A análise estatística, portanto, respalda a validade das conclusões que pude extrair a partir deste conjunto de dados, reforçando a importância do valor-p como uma ferramenta essencial na interpretação estatística e tomada de decisões.

Com a junção dos coeficientes, usando os sinais matemáticos e as denominações dadas a cada variável, chegamos à Equação 08.

$$Y_3 = 2,54 - 1,31.X_1 + 0,54.X_1^2 + 1,96.X_2 + 0,03.X_2^2 - 0,88.X_1.X_2 \quad (\text{Equação 08})$$

Legenda:

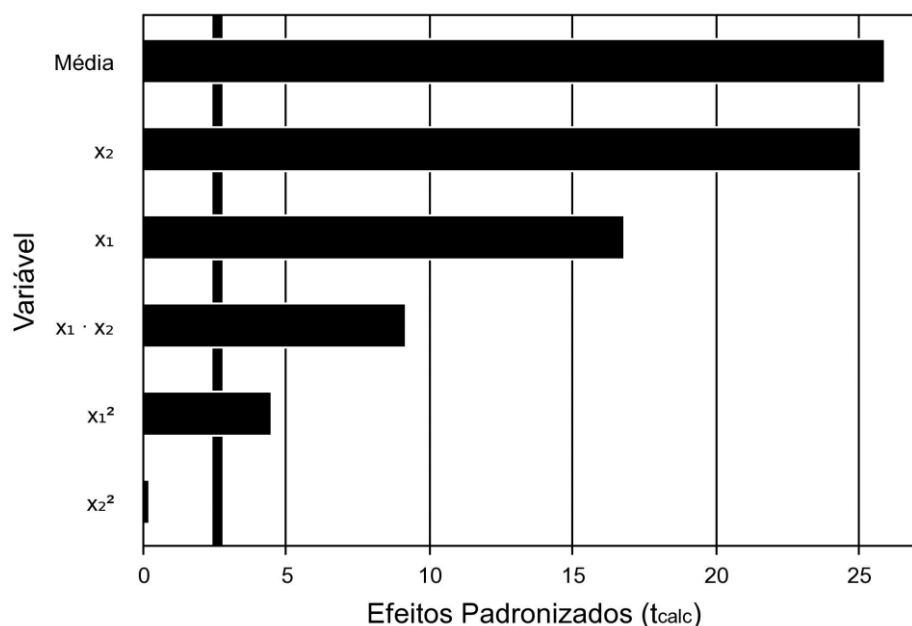
Y₃ = Razão de Adsorção; (mg/g)

X₁ = Massa de Carvão a 650°C; (g)

X₂ = Concentração de Corante (Azul de Metileno); (mg/L)

Com o propósito de saber-se a variável que tem mais influência sobre o experimento para a resposta de Razão de Adsorção temos o gráfico de Pareto (Figura 20).

Figura 20 - Diagrama de Pareto da Razão de Adsorção



Fonte: Autor, 2023.

A variável mais influente sobre o modelo é a (X_2) ou Concentração do corante que foram utilizadas em 3 níveis (-1; 0 e 1), seguida pela (X_1) que é a massa do carvão.

O Tabela 18 (ANOVA) trata-se da análise de variância do modelo para o parâmetro de razão de adsorção, onde se é possível observar as diferenças médias entre os grupos.

Tabela 18 - ANOVA para Razão de Adsorção

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F_{calc}	p-valor
Regressão	37,2	5	7,4	203,6	0,00001
Resíduos	0,2	5	0,0		
Falta de Ajuste	0,2	3	0,1	3266,2	0,00031
Erro Puro	0,0	2	0,0		
Total	37,6	10			
$R^2 = 99,51\%$					

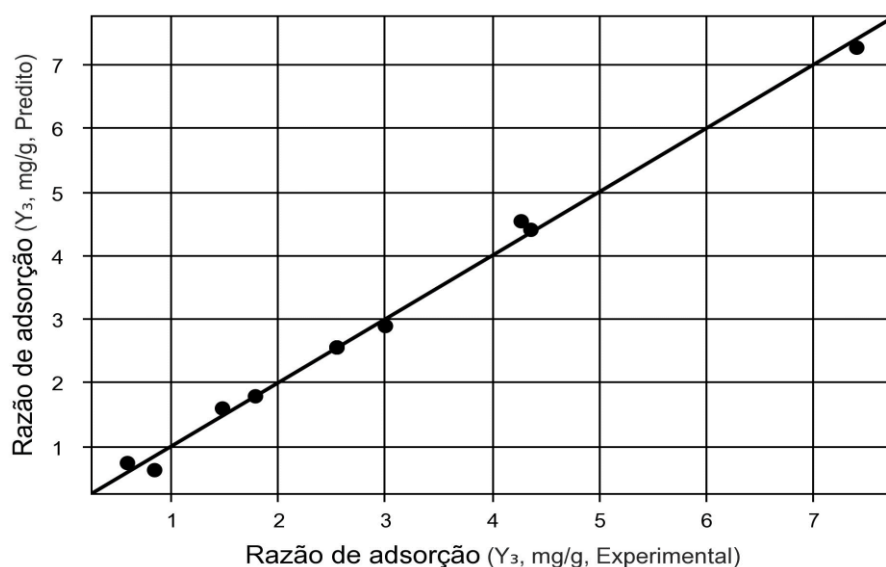
Fonte: Autor, 2023.

Os valores-p super baixos de 0,00001 e 0,00031 indicam que as nossas hipóteses estão praticamente descartadas, reforçando a ideia de que as relações ou efeitos que estávamos investigando são estatisticamente importantes. Além disso, o

R^2 altíssimo de 99,51% sugere que uma grande parte da variabilidade nos dados é explicada pelo nosso modelo. Os valores de F (Fcalc) de 203,6 e 3266,2 indicam que o nosso modelo é estatisticamente poderoso, especialmente no segundo caso com um F de 3266,2. Esses resultados dão mais peso às nossas conclusões, mostrando que há uma relação significativa entre as variáveis que estudamos e que o nosso modelo é capaz de explicar e prever bem os padrões nos dados.

Observa-se para a Figura 21 que todos os pontos, são muito próximos da linha central ou linha de tendência, não tendo assim nenhum dado ao qual pode-se considerar como um *outlier*, ao qual poderia trazer imprecisão para o modelo, não precisando assim, desabilitar nenhum dado.

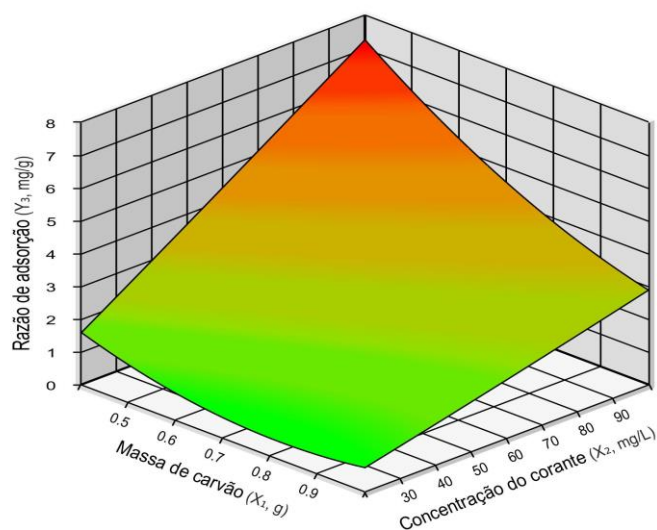
Figura 21 - Valores Obtidos x Previstos para Razão de Adsorção



Fonte: Autor, 2023.

A Figura 22 diz respeito a um gráfico que possui 3 parametros (Massa de Carvão [g] ; Concentração de corante [mg/L] e Razão de Adsorção). A percepção imediata é de que: quanto maior a massa e menor a concentração de corante, melhor o resultado para a razão de adsorção.

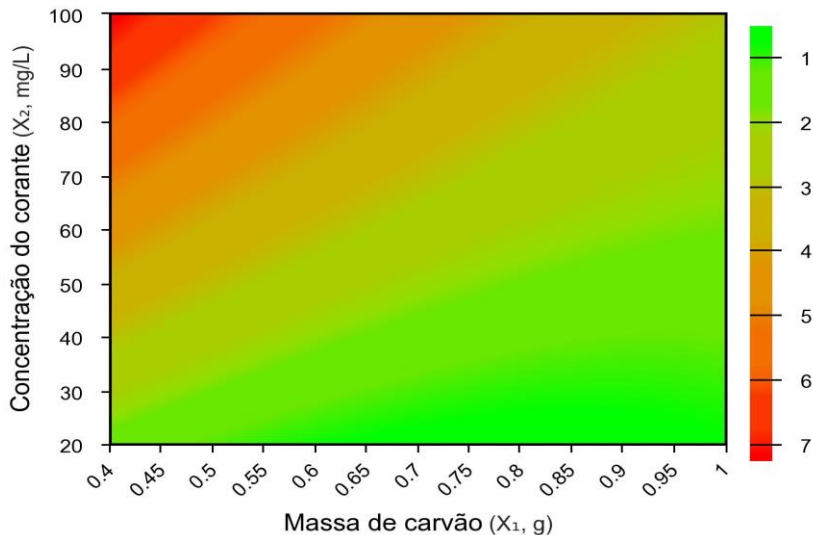
Figura 22 - Gráfico de Superfície para a Razão de Adsorção



Fonte: Autor, 2023.

já na Figura 23 têm-se uma visão mais simplificada com perspectiva em 2D.

Figura 23 - Curvas de Níveis para Razão de Adsorção



Fonte: Autor, 2023.

O gráfico de curvas de níveis é muito importante, pois com o auxílio dele, além de se fazer a análise das razões que foram obtidas entre massa x concentração de corante no próprio experimento, pode-se também ter percepção de várias outras possíveis razões através desse gráfico, mostrando suas respectivas eficiências em adsorção devido à escala de cores.

5 – CONCLUSÃO

Os resultados desta pesquisa, que engloba a análise da biomassa, o rendimento da pirólise da Poda de ipê, a caracterização do carvão resultante e os testes de adsorção, destacam a viabilidade da utilização da poda de ipê na produção de carvão ativado. Durante o processo de pirólise, em exemplo simples: após a secagem de uma tonelada (1.000,00 kg) de material úmido, ocorre uma perda de massa de aproximadamente 38,97%, perda de massa que é estabilizada após 6 horas de secagem, resultando em aproximadamente 610,30 kg de material, que pode ter em torno de um rendimento de 25,87% dessa massa, gerando assim 157,88 kg de carvão ativado.

Os ensaios de adsorção indicam que a quantidade ideal de carvão para adsorção entre as massas utilizadas no experimento que formam de: (0,40; 0,70 e 1,00 g) foi de 1,00 g em relação à variação da concentração do corante azul de metileno, de 20 a 60 mg/L, apresentando maior impacto e menor eficácia de adsorção em concentrações mais elevadas do corante. A biomassa atendeu às expectativas para os parâmetros de análise imediata, sendo produzido carvão em duas temperaturas diferentes, 550°C e 650°C, com uma diferença de rendimento de aproximadamente 2% devido à variação de temperatura.

Quanto ao processo de adsorção, o carvão demonstrou ser uma alternativa comercialmente viável, sendo sua capacidade fortemente influenciada pela massa e concentração do corante azul de metileno. Este estudo sobre a transformação da biomassa da poda de ipê em carvão ativado reforça sua eficácia, podendo ser uma alternativa sustentável e de baixo custo, contribuindo para a redução dos impactos ambientais gerados pelos resíduos da poda dessa espécie de árvore.

Diante de todo o exposto, o carvão dá indícios de aplicação industrial, com resultados que satisfazem o esperado como um baixo teor de umidade, e, bons valores de material volátil, cinzas, e carbono fixo, que foram diretamente comparados à carvões de outros autores.

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, Acesso em: 10 Nov. 2023.

BEN – Balanço Energético Nacional, ano 2009, **Ano Base 2008**, acesso em 14 Set. 23.

BRAGA, Renata Martins. Pirólise rápida catalítica do capim elefante utilizando materiais mesoporosos e óxidos metálico para deoxigenação em bio-óleo / Renata Martins Braga. - Natal, RN, 2012. Acesso em: 05 Set. 2023.

COLARES, Carla Jovania Gomes et al. Tratamento de Efluente Industrial Farmacêutico por Adsorção com Carvão Ativado. **Anais SNCMA**, v. 1, 2010, Acesso em: 17 Set. 2023.

CORDEIRO, José Luiz Cunha; JUNIOR, Raildo Alves Fiuza. Produção de Carvões Ativados Derivados de Biomassa e sua Aplicação em Processos de Adsorção. **Cadernos de Prospecção**, v. 12, n. 5, p. 1584-1584, 2019. Acesso em: 21 Ago. 2021.

DE AGUIAR LINHARES, Felipe; MARCÍLIO, Nilson Romeu; MELO, Pedro Juarez. Estudo da produção de carvão ativado a partir do resíduo de casca da acácia negra com e sem ativação química. **Scientia cum Indústria**, v. 4, n. 2, p. 74-79, 2016. Acesso em 01 Dez. 2023.

DE COSTA, Patrícia D.; FURMANSKI, Luana M.; DOMINGUINI, Lucas. 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. Acesso em 05 Dez. 2023.

GUILARDUCI, Viviane Vasques da Silva et al. Adsorção de fenol sobre carvão ativado em meio alcalino. **Química nova**, v. 29, p. 1226-1232, 2006, Acesso em: 23 Nov. 2023.

JÁCOME, Wélida, 2021 - **Ipês Amarelos Colorem e Embelezam as Ruas de Palmas**, Disponível em: <http://tinyurl.com/3c32phjv>, Acesso em: 05 Set. 23.

MACÊDO, Lúcia Paula Martins Prado de et al. Viabilidade da produção de carvão ativado a partir de resíduos alternativos, 2012. Acesso em: 13 Set. 2023.

MAIA, Danielma Silva. Aproveitamento do carvão ativado obtido da casca de castanha de caju no processo de tratamento de águas cinzas. 2021. Acesso em: 16 Set. 2023.

MARSH, Harry; REINOSO, Francisco Rodríguez. **Activated carbon**. Elsevier, 2006. Acesso em: 10 Set. 23.

MEIRA, Ana Maria de. **Gestão de resíduos da arborização urbana**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Acesso em: 22 Set. 23.

OLIVEIRA, Giulyane Felix de et al. Produção de carvão ativado a partir do pecíolo do babaçu. 2016. Acesso em 14 Set. 2023

PAZ, E. C. S. et al. Production and characterization of the solid product of coconut pyrolysis. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, n. 7, p. 6317-6329, 2023. Acesso em: 16 Set. 2023

PEDROSA, Marcelo Mendes. Bio-óleo e Biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo. 2011. Acesso em: 13 Set. 2023.

PEDROZA, Marcelo Mendes et al. Characterization of the products from the pyrolysis of sewage sludge in 1 kg/h rotating cylinder reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 105, p. 108-115, 2014. Acesso em: 15 Ago. 2023

PEDROZA, Marcelo M. et al. Activated charcoal production from tree pruning in the Amazon region of Brazil for the treatment of gray water. **Journal of applied research and technology**, v. 19, n. 1, p. 49-65, 2021. Acesso em: 15 Set. 2023.

SANTIAGO, Brunno HS et al. Estudo de viabilidade tecnoeconomica preliminar para produção de carvão ativado no Brasil a partir dos resíduos do coco: estudo comparativo de cenários de produção. **Revista Analytica**, v. 17, p. 52-55, 2005. Acesso em: 16 Set. 2023.

SANTOS, Cristiane Mota dos et al. Estudo do carvão ativado da casca de cupuaçu como suporte na catálise heterogênea. 2014. Acesso em 23 Nov. 2023.

SOARES, Rosângelis DL et al. Emprego do carvão ativado para a remoção de fenilalanina de leite em pó. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 22, n. 1, 2004, Acesso em: 23 Nov. 2023.

WESTPHALEN, Ana Paula Campos; CORÇÃO, Gertrudes; BENETTI, Antônio Domingues. Utilização de carvão ativado biológico para o tratamento de água para consumo humano. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, p. 425-436, 2016, Acesso em: 13 Nov. 2023.