



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

CAMPUS PALMAS

CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL

PEDRO LUCAS FÉLIX DE SÁ

**DEGRADAÇÃO TÉRMICA DA PODA DO IPÊ-VERDE PARA A PRODUÇÃO DE
CARVÃO ATIVADO**

PALMAS

2024

PEDRO LUCAS FÉLIX DE SÁ

**DEGRADAÇÃO TÉRMICA DA PODA DO IPÊ-VERDE PARA A PRODUÇÃO DE
CARVÃO ATIVADO**

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: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

**PALMAS
2024**

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

S111d Sá, Pedro Lucas Félix de
DEGRADAÇÃO TÉRMICA DA PODA DO IPÊ-VERDE PARA A
PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO / Pedro Lucas Félix de Sá. –
PALMAS, TO, 2024.
40 p.

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

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Adsorção. 2. Carvão ativado. 3. Poda do Ipê-verde. 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

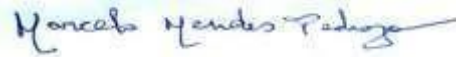
PEDRO LUCAS FÉLIX DE SÁ

DEGRADAÇÃO TÉRMICA DA PODA DO IPÊ-VERDE PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO

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: 18 / 06 / 2024

BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador (IFTO)



Prof. Dra. Elaine da Cunha Silva Paz (IFTO)



Documento assinado digitalmente
CAMILA RIBEIRO RODRIGUES
Data: 27/06/2024 15:41:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Camila Ribeiro Rodrigues (UNIRG)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar força, saúde e proteção nessa jornada.

Agradeço ao meu pai Emivaldo, minha mãe Ozemary, meu irmão João Vitor e minha companheira Bárbara pelo suporte, amor e compreensão.

Agradeço aos meus amigos que me ajudaram neste período.

Dedico esta conquista àqueles que amo pois não teria conseguido sem eles.

RESUMO

Com o crescimento exponencial da população nas áreas urbanas e a grande quantidade de produção de resíduos, observa-se a necessidade de realizar uma gestão e planejamento quanto a destinação desses materiais, principalmente das podas, tendo em vista o dispendioso custo que as destinações desses detritos causam a administração pública. Outro problema recorrente resultante do crescimento das cidades e dos resíduos é a urgência em realizar um tratamento nos efluentes, considerando o declínio de demanda de pessoas sendo atendidas com o tratamento de esgoto. Destarte, o objetivo deste trabalho é a realização da degradação térmica da poda de ipê-verde para transforma-lo em carvão ativado e utilizá-lo na adsorção de corante químico. Para tal, foi realizada nas proximidades do Instituto Federal do Tocantins a coleta do material que foi levado ao laboratório Larsen – IFTO, para caracterização da biomassa, produção do carvão, caracterização do carvão e processo de adsorção do corante têxtil Azul de Metileno. A poda foi caracterizada através dos testes de análise imediata, sendo eles: teor de umidade (3,30%), teor de material volátil (83,70%), teor de cinzas (0,90%) e teor de carbono fixo (12,10%). A pirólise foi feita em reator de leito fixo, nas temperaturas de 550°C e 650°C por 30 minutos, a uma taxa de 30°C/min e o rendimento alcançado para as temperaturas foi de, respectivamente, 27,23 e 20,57%. O carvão produzido também passou pelos mesmos testes de análise imediata. Na adsorção, feita com o carvão produzido a 650°C, aplicou-se um planejamento do tipo Delineamento de Faces centradas em 11 testes, variando os fatores massa de carvão e concentração do corante, em volume fixo de 30 mL de solução por 30 min. Os resultados da razão de adsorção mostraram melhor desempenho com massas reduzidas e maior concentração de Azul de Metileno, alcançando o valor 13,32 mg/g no teste com 0,20g de carvão e 100mg/L de corante.

Palavras-chave: Adsorção, Carvão ativado, Ipê-verde, Pirólise, Poda.

ABSTRACT

With the exponential growth of the population in urban areas and a large amount of waste production, there is a need to carry out management and planning regarding the destination of these materials, especially pruning, given the expensive cost of disposing of these wastes. cause public administration. Another recurring problem arising from the growth of cities and waste is the urgency of effluent treatment, considering the decrease in demand for people receiving sewage treatment. To begin with, the objective of this work is to carry out thermal manipulation of the green ipê pruning to transform it into activated carbon and use it in the adsorption of chemical dye. To this end, the material was collected near the Federal Institute of Tocantins and taken to the Larsen laboratory – IFTO, for biomass characterization, charcoal production, charcoal characterization and the adsorption process of the textile dye Methylene Blue. Pruning was described through immediate analysis tests, which were: moisture content (3.30%), volatile material content (83.70%), ash content (0.90%) and fixed carbon content (12.10%). Pyrolysis was carried out in a fixed bed reactor, at temperatures of 550°C and 650°C for 30 minutes, at a rate of 30°C/min and the yield for the temperatures was, respectively, 27.23 and 20.57%. The charcoal produced also underwent the same immediate analysis tests. In the adsorption, carried out with charcoal produced at 650°C, a Face Delineation type planning was applied focused on 11 tests, varying the charcoal mass factors and dye concentration, in a fixed volume of 30 mL of solution for 30 minutes. The adsorption ratio results showed better performance with reduced masses and higher concentration of Methylene Blue, reaching a value of 13.32 mg/g in the test with 0.20g of charcoal and 100 mg/L of dye.

Keywords: Adsorption, Activated carbon, Ipê-verde, Pruning, Pyrolysis.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Fatores e níveis empregados.....	27
Tabela 2	Ordem dos experimentos no planejamento experimental.....	28
Tabela 3	Valores de caracterização da Biomassa.....	28
Tabela 4	Características do Carvão Ativado e comparativo.....	30
Tabela 5	Resultado do teste de adsorção em relação à massa de carvão e concentração de corante.....	31
Tabela 6	Coeficientes de regressão do Planejamento DFC para definição da Razão de adsorção do carvão ativado obtido.....	32
Tabela 7	ANOVA para Razão de adsorção das amostras de carvão ativado na adsorção de azul de metileno.....	34

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Área de distribuição original do cerrado.....	14
Figura 2	Cybastax antisiphilitica.....	14
Figura 3	Flores do Ipê-verde.....	15
Figura 4	Atividades a serem realizadas durante a pesquisa.....	19
Figura 5	Amostra de poda coletada.....	20
Figura 6	Amostra cortada.....	20
Figura 7	Estufa utilizada para secagem da amostra.....	21
Figura 8	Reator de leito fixo.....	23
Figura 9	Autoclave.....	23
Figura 10	Sistema de condensação da parte gasosa.....	24
Figura 11	Shaker TE 141.....	26
Figura 12	Filtragem.....	26
Figura 13	Espectrofotômetro.....	27
Figura 14	Solução de concentração 60mg/L antes e após a adsorção.....	32
Figura 15	Diagrama de Pareto da Razão de Adsorção (Q) do carvão.....	33
Figura 16	Valores obtidos x valores previstos para Razão de Adsorção.....	34
Figura 17	Gráfico de superfície para a Razão de adsorção do carvão.....	35
Figura 18	Curvas de nível para a Razão de Adsorção do carvão.....	35

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS, ACÔNOMOS, SIGLAS E SIMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
CA	Carvão ativado
cm	Centímetro
IFTO	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins
LARSEN	Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética
g	Gramma
min	Minuto
mL	Mililitro
mm	Milímetro
nm	Nanômetro
NBR	Norma Brasileira
Q	Razão de Adsorção

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	11
1.1.	Problema de pesquisa.....	12
1.2.	Justificativa.....	12
1.3.	Objetivos.....	13
1.3.1	Objetivo geral.....	13
1.3.2	Objetivos específicos.....	13
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1.	Ipê-Verde.....	13
2.2.	Resíduos sólidos urbanos.....	15
2.2.1.	RSU de podas de árvore.....	16
2.3.	Carvão ativado a partir de biomassa.....	17
2.4.	Degradação termoquímica.....	18
3.	PROCEDIMENTOS MEDODOLÓGICOS.....	19
3.1.	Coleta e caracterização da Biomassa.....	19
3.1.1.	Umidade.....	21
3.1.2.	Teor de Cinzas.....	21
3.1.3.	Material Volátil.....	22
3.1.4.	Teor de Carbono Fixo.....	22
3.2.	Pirólise da poda do Ipê-Verde (Cybistax antisiphilitica).....	23
3.2.1.	Balanço de massa.....	24
3.3.	Caracterização do carvão obtido.....	25
3.3.1.	Umidade.....	25
3.3.2.	Teor de Cinzas.....	25
3.3.3.	Material Volátil.....	25
3.3.4.	Teor de Carbono Fixo.....	25
3.4.	Ensaio de Adsorção.....	25
4.	RESULTADO E DISCUSSÕES.....	28
4.1	Caracterização da biomassa.....	28
4.1.1	Análise Imediata da poda do Ipê-Verde.....	28
4.2	Rendimento de carvão do processo de pirólise.....	29
4.3	Caracterização do carvão.....	30
4.4	Ensaio de adsorção.....	31
4.4.1	Razão de adsorção (Q).....	32
5.	CONCLUSÃO.....	35
6.	REFERÊNCIAS.....	37

1. INTRODUÇÃO

O livro de Esposito *et al.* (1988) cita que embora a urbanização de cidades seja algo que se repetiu ao longo da história, com os adventos da revolução industrial e do êxodo rural, a população urbana passou por um crescimento exponencial.

Para Silva e Pivetta (2020), uma das importantes práticas para o desenvolvimento urbano sustentável é a gestão e planejamento da arborização, que envolve diversas técnicas, sobretudo, quando se trata da poda e a sua destinação (apud Correia *et al.*, 2022).

Dessa forma, de acordo com Manguiera *et al.* (apud Correia *et al.*, 2022) se não houver uma adequada gestão, estas podas se transformam em um problema para os órgãos públicos, uma vez que seu volume é alto e o custo de destinação final do resíduo é oneroso. Se forem destinadas a aterros sanitários, como ocorre em muitas cidades do país, podem ocupar áreas não planejadas, sobrecarregando todo o sistema (Correia *et al.*, 2022).

Como foi supracitado, a urbanização vem crescendo de maneira acelerada e gerando grandes desafios. Um deles, além do destino dos resíduos sólidos, é o tratamento dos grandes volumes de efluentes, tanto domésticos quanto industriais (Brasil, 2018). Por isso, o carvão ativado, que é obtido por meio da pirólise da poda pode ser de grande ajuda, pois pode-se experimentar sua capacidade de adsorção, buscando remover diversos contaminantes do efluente, como metais, corantes químicos e matéria orgânica. Essa tecnologia acaba sendo bastante sustentável e oferecendo um bom custo-benefício (Fortunato, 2018).

No Brasil, de acordo com dados fornecidos pelo governo, a média do índice de pessoas atendidas com rede de esgotos no país era de 51,9% em 2016, e apenas 44,9% do esgoto gerado eram tratados (Brasil, 2018).

Utilizando o processo de pirólise, ou seja, a degradação termoquímica feita com a ausência parcial ou total de oxigênio, é possível converter a biomassa da poda do ipê-verde em carvão ativado. Por isso o objetivo deste trabalho é a realização da degradação térmica da poda de ipê-verde para transforma-lo em carvão ativado e utilizá-lo na adsorção de corante químico.

1.1. Problema de pesquisa

Para esta pesquisa, destacam-se dois problemas que são enfrentados atualmente pelas cidades brasileiras, primeiramente a disposição dos resíduos sólidos urbanos provenientes de podas de árvores. E também o desafio de tratar de forma eficaz de grandes volumes de esgotamento sanitário, que em 55,1% dos casos não recebe tratamento algum (Brasil, 2018).

Buscando investigar a viabilidade desta técnica no enfrentamento destas adversidades, levanta-se o questionamento, qual a eficácia do carvão ativado produzido a partir da poda do Ipê-Verde como material adsorvente?

1.2. Justificativa

Segundo Chaluppe (2013), a falta de planejamento e normas técnicas para arborização tem gerado diversos problemas no âmbito público, principalmente a escassez de modelos eficientes para a gestão dos resíduos de podas contribui para o surgimento de problemas ambientais e socioeconômicos, resultado da má disposição dos mesmos.

A cidade de Palmas - TO, conta com ecopontos, administrados pela Secretaria de Infraestrutura e Serviços Públicos, que recebem as podas recolhidas pela cidade que é toda reaproveitada, sendo 10% processos de compostagem e 90% distribuída para empresas locais, beneficiadoras de grãos e cerâmica (Palmas, 2022). Porém, não é informado se essas empresas dão um destino ecologicamente adequado aos resíduos. A cidade também não conta com estudos próprios de como o carvão ativado, obtido por meio da degradação térmica destas podas poderia beneficiar o município.

Partindo disto, é justificável a pesquisa que busca compreender como estes resíduos do ipê-verde poderiam ser melhor aproveitados, devido ao seu potencial energético de ser transformado em um derivado do carbono, o carvão ativado, que tem potencial industrial e no tratamento de efluentes.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é a realização da degradação térmica da poda de ipê-verde para transforma-lo em carvão ativado e utilizá-lo na adsorção de corante químico.

1.3.2. Objetivos Específicos

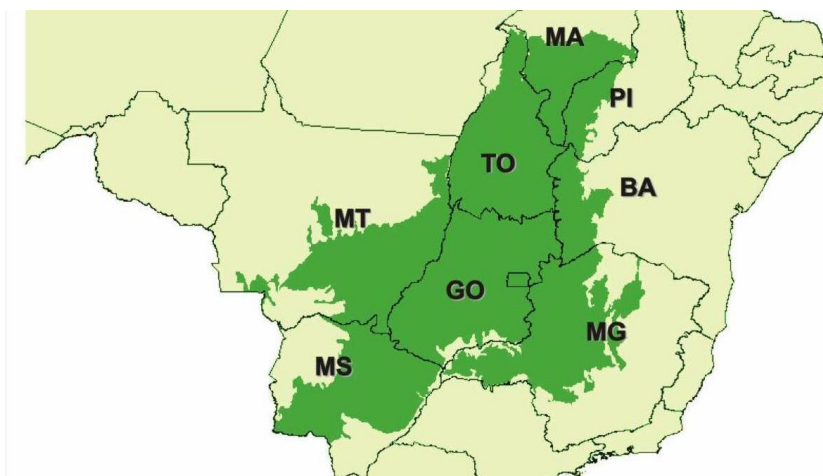
- I. Caracterizar a biomassa estudada quanto a umidade, teor de cinzas, material volátil e carbono fixo;
- II. Produzir o carvão ativado nas temperaturas de 550 e 650°C;
- III. Descrever as características o carvão ativado obtido quanto a umidade teor de cinzas, material volátil e carbono fixo;
- IV. Utilizar o carvão ativado em processo de adsorção do corante químico Azul de metileno.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Ipê-Verde

O Ipê-verde, também conhecido como Caroba-de-flor-verde, recebe o nome científico de *Cybistax antisiphilitica*, fazendo parte da família Bignoniaceae, é encontrada principalmente no cerrado, o bioma predominante no estado do Tocantins, como indicado na Figura 1, mas também pode ser encontrada em outras partes do país (Melo, 2009).

Figura 1 – Área de distribuição original do cerrado



Fonte: Todo Estudo, 2024.

Apresentada por Durigan *et. al.* (2004), esta árvore, indicada na Figura 2, é descrita como sendo de porte médio, normalmente possui o tronco divaricado, escura, com casca espessa e com a presença de fendas no sentido longitudinal. Possui folhas verdes opostas, com cerca de 12 cm de comprimento e 4 cm de largura, com base acentuada e ápice acuminado, as flores também são verdes, como é exposto na Figura 3.

Figura 2 - *Cybistax antisyphilitica*



Fonte: Melo, 2009

Figura 3 – Flores do Ipê-verde



Fonte: Site Toca do verde, 2023.

A árvore é bastante utilizada no paisagismo, devido ao seu porte e copa incomum, serve bem para ruas estreitas. A construção civil também pode se beneficiar das suas utilidades em obras envolvendo carpintaria em geral. Também é usada na recuperação de áreas desmatadas ou áreas de preservação por ter a resistência típica das árvores do cerrado (Lorenzi, 1992).

2.2. Resíduos sólidos urbanos

Os resíduos sólidos urbanos são materiais heterogêneos, que podem ter diversas características físicas e químicas. Suas origens são diversificadas, podendo vir de podas arbóreas, domicílios, limpeza da cidade, hospitais, construção civil, comerciais e indústrias. Sua coleta adequada interfere diretamente na saúde e bem estar do cidadão (Lima, 2023).

Segundo a ABRELPE - Associação Brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos especiais (2022), em seu último panorama de resíduos sólidos, informa que o Brasil produziu, neste ano, cerca de 81,8 milhões de toneladas de resíduos, equivalentes a 224 mil toneladas por dia. Mas a coleta ainda não supre toda a necessidade do país, totalizando 76,1 milhões de toneladas em 2022, corresponde a 93% do total.

No mesmo panorama, a ABRELPE expõe que deste total, apenas 60,5% das toneladas de RSU são destinadas corretamente, seguindo as orientações da Política

Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS, em aterros sanitários. O restante é normalmente destinado aos lixões a céu aberto.

A cidade de Palmas – TO, conta com um aterro sanitário de 53 hectares, que recebe diariamente uma média de 150 toneladas de lixo por dia, podendo chegar a 250 toneladas diárias em épocas festivas. Toda a cidade é atendida pelo sistema de coleta, além dos ecopontos responsáveis por receber e reaproveitar as galhadas e pneus usados (Tocantins, 2023).

2.2.1. RSU de poda de árvores

Para Carvalho *et. al.* (2019), a prática da poda se trata da remoção de galhos, frutos e folhagem, seja por razões estéticas, diminuir o risco de interferências na rede elétrica, remoção de patologias da árvore ou para organização urbana. A mesma, representa volume considerável ocupando uma grande porção do total de resíduos sólidos urbanos, entre 7% e 10% segundo a SNSA - Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (2016). O problema é que a maior parte deste volume acaba sendo destinado a lixões a céu aberto, gerando contaminação do solo e emissão de gases tóxicos como o metano ou ocupando espaço de aterros sanitários não preparados para tal demanda, o não aproveitamento desse material representa um desperdício de recursos energéticos.

Conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos são classificados em:

- Classe I. Perigosos: Aqueles que apresentarem periculosidade de qualquer natureza, como os inflamáveis, radioativos e os que carregam patógenos.
- Classe II. Não perigosos: Que não trazem perigo direto e são especificados nos dois itens seguintes.
- Classe II A. Não Inertes: Podem possuir características solúveis, biodegradáveis ou combustibilidade.
- Classe II B. Inertes: Materiais que quando submetido a testes de solubilidade, por exemplo, não tenham nenhum de seus constituintes solubilizados significativamente, de acordo com os padrões da norma.

Dentro dessa classificação os resíduos provenientes da poda se enquadram na Classe II A, por não apresentarem perigo e nem propriedades inertes.

Em Palmas, a parte dos resíduos que não vai para as indústrias beneficiadoras de grãos e cerâmica, passa pelo processo de compostagem, que é a decomposição

por microrganismos com a presença de oxigênio, para gerar o composto orgânico estabilizado e com propriedades diferentes do material de origem, comumente utilizado na agropecuária (Palmas, 2022).

De acordo com Nelo (2023), destaca-se o consenso entre os pesquisadores sobre a importância de reaproveitar os resíduos da poda, primeiramente pelo impacto positivo dessa prática ao meio ambiente e, em seguida, pelos benefícios econômicos que os municípios praticantes dessa atividade terão, incluindo geração de empregos e os diversos potenciais que os diferentes tipos de reuso disponibilizam.

Com esse potencial energético, fica evidente a necessidade de estudar e praticar métodos de reutilização dos resíduos de poda urbana. Um dos tipos de processos, estudados por Cortez (2011), são os termoquímicos, que envolvem o calor e reações químicas para extrair o potencial energético da madeira. Neste projeto, foi colocado a teste o método termoquímico da pirólise de biomassa sólida.

2.3. Carvão ativado a partir de biomassa

A biomassa pode ser definida como toda matéria orgânica provinda da vegetação ou de animais, é também chamada de biomassa energética uma vez que podem ser utilizados com finalidades energéticas (Mesa-Pérez, 2004).

Conforme afirma Perez (2010), a biomassa de origem vegetal é de grande proveito como recurso energético por ser continuamente renovável, por reduzir as emissões de gases nocivos e por contribuir com o equilíbrio ambiental (*apud* Cortez, 2011). Nesse sentido a produção do CA se apresenta como uma das diversas formas de evitar o desperdício deste valioso recurso.

Carvão ativado é o nome do grupo de materiais carbonáceos desenvolvidos com o objetivo de ter elevada porosidade e área superficial, com capacidade adsorvente para desintoxicar, purificar, filtrar, descolorir e separar estados (Melo, 2012). Sendo uma interessante forma de otimizar o tratamento de esgoto dos grandes centros urbanos. Suas propriedades já se provaram eficientes até mesmo para o tratamento de água para consumo humano (Westphalen, Corção e Benetti, 2016).

O Carvão ativado pode ser produzido a partir da biomassa, que é rica em carbono, a porosidade e a conectividade dos poros é que representam as mais importantes características quando se submete este carvão a testes de adsorção (Fortunato, 2018).

O carvão ativado é produzido em duas etapas, a carbonização e a ativação. Na primeira a biomassa é submetida à pirólise, isto é, o tratamento térmico em altas temperaturas e ambiente inerte e na segunda a ativação propriamente dita, seja química ou física, no qual o material adquire a porosidade desejada. Em processos industrializados as etapas são realizadas simultaneamente (Soares, 2002).

2.4.Degradação termoquímica

Pirólise, palavra de origem grega, que significa decomposição pelo calor, ou seja, a degradação de um material provocada pela energia térmica na ausência de oxigênio (Silvério; Barbosa; Piló-Veloso, 2008). Corriqueiramente o processo começa com 400° C e aumenta até que comece o regime de gaseificação (Pedroza *et al.*, 2010).

Entre os processos termoquímicos, a pirólise mostra-se promissora por fornecer o bio-óleo que pode ser usado como combustível e como matéria prima. Realizar este processo na biomassa é uma antiga tecnologia energética que vem se tornando cada vez mais interessante, em face aos desafios que a sociedade enfrenta ao tentar tornar a matriz energética renovável. Dependendo de como é executada, a pirólise é dividida em dois tipos, a convencional ou lenta e a pirólise rápida (Yanik, 2007).

A convencional, também conhecida como lenta é amplamente utilizada quando se deseja produzir o carvão, o material foco da pesquisa atual. A rápida, tem como objetivo principal, a produção de líquidos, como o bio-óleo (Yanik, 2007). Elementos tais como, temperatura, produto a ser obtido, variação de aquecimento e tempo de residência em cada estado da matéria são o que diferenciam a lenta da rápida. (Pedroza *et al.*, 2011).

Este processo acontece quando se aquece o material de origem, a partir de, em média 400°C na ausência quase total de ar, no qual o carbono presente se concentra, o material adquire tons escuros e abrem-se poros novos enquanto outros se fecham e o volume diminui (ANEEL, 2008). A carbonização irá eliminar os componentes voláteis como H, N e O e os gases leves, como CO, H₂, CO₂ e CH₄ abrindo os poros do carvão (Fortunato, 2018)

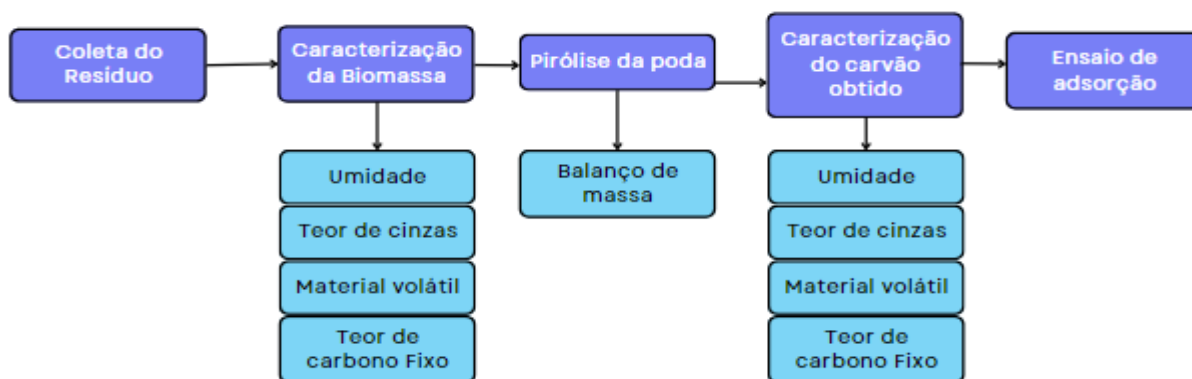
Como resultado do processo pirolítico, são gerados alguns subprodutos que podem ser bem aproveitados, por conta do seu valor agregado, o bio-óleo, o biogás e

o carvão ativado, que podem ser usados na forma de combustível, na indústria petroquímica em geral e diversas outras utilidades. Além disso, o carvão obtido também é útil na adsorção de metais pesados (Karayildirim *et. al.*, 2006).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

As etapas que foram desenvolvidas nesta pesquisa estão apresentadas na Figura 4. No atual capítulo são descritos os materiais e métodos para a coleta e transformação da biomassa do Ipê-verde em carvão ativado e caracterizá-lo. Os ensaios experimentais responsáveis por caracterizar a amostra foram realizados no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética – LARSEN do IFTO, *campus* Palmas.

Figura 4 – Atividades realizadas durante a pesquisa



Fonte: Autor, 2024.

3.1. Coleta e caracterização da biomassa

A poda do ipê-verde foi coletada nas proximidades do IFTO *Campus* Palmas em uma poda programada, a poda além da amostra da pesquisa foi encaminhada para o ecoponto de reaproveitamento da prefeitura municipal. Após realizada a coleta foi levada até o laboratório LARSEN, localizado no IFTO *Campus* Palmas. Primeiramente, a amostra foi cortada em formato de prisma retangular com largura entre 1,5 cm a 2,5 cm, apenas para permitir que possa ser inserida no reator.

A amostra foi analisada para a obtenção dos dados que se referem à umidade, teor de cinzas, material volátil, teor de carbono fixo.

A Figura 5 mostra a amostra de poda coletada.

Figura 5 – Amostra de poda coletada



Fonte: Autor, 2024.

A Figura 6 mostra a amostra de poda após ser cortada.

Figura 6 – Amostra cortada



Fonte: Autor, 2024.

A amostra foi seca na estufa da Figura 7, disponível no laboratório, a uma temperatura fixa de 60°.

Figura 7 – Estufa utilizada para secagem da amostra



Fonte: Autor, 2024.

3.1.1. Umidade

A umidade foi determinada conforme a norma ASTM D 3173-85. Foi pesada uma pequena massa de aproximadamente 1g de poda que foi adicionada a um cadinho feito de porcelana com peso constante e pré-determinado. Em seguida realizou-se o aquecimento da amostra em uma estufa à temperatura de 105 °C durante 1 hora. Posteriormente a isto, o cadinho foi colocado em um dessecador por 15 minutos e pesado. A análise foi realizada em triplicata e o teor de umidade determinado de acordo com a Equação 1:

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

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

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

C = peso da amostra (gramas)

} (g)

3.1.2. Teor de cinzas

Para a determinação do teor de cinzas foi seguido o procedimento descrito por Sanchez et al., (2009). No qual, aproximadamente 1g de biomassa foi colocada em

um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. Em seguida, a amostra foi submetida a uma temperatura de 710 °C por 60 minutos em um forno mufla para que fosse feita a calcinação. Em seguida, o cadinho foi deixado em um dessecador por 1 hora para resfriar e foi pesado. O teor de cinzas foi obtido seguindo a norma ASTM D 2415:2020 e seus resultados determinados pela Equação 2:

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

A= peso do cadinho + peso da amostra

B= peso do cadinho + peso amostra após calcinação (gramas)

C= peso da amostra (gramas)

} (g)

3.1.3. Material Volátil

Para definir o teor de material volátil foi seguido o processo descrito por Sanchez et al., (2009), no qual foi pesado aproximadamente de 1g do resíduo de poda de ipê-verde em um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. A amostra foi aquecida em um forno mufla a uma temperatura de 850°C, em um período de 7 minutos, sem a presença de oxigênio. Posteriormente, o teor de material volátil foi obtido de acordo com a Equação 3:

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

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

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

C= peso da amostra (gramas)

} (g)

3.1.4. Teor de carbono fixo

Para obter teor de carbono fixo foi efetuada a subtração da Equação 4:

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

3.2. Pirólise da poda do Ipê-Verde (*Cybistax antisiphilitica*)

A pirólise da poda do Ipê-Verde foi realizada em um reator tubular fixo, mostrado na Figura 8, com diâmetro externo de 10 cm e comprimento de 1m. O reator é aquecido por um forno bipartido reclinável do modelo FE50RPN, linha 05/50 da marca FLYEVER.

Figura 8 – Reator de leito fixo



Fonte: Autor, 2024.

O vapor de água, aquecido pela autoclave da Figura 9, foi o gás de arraste utilizado no processo, sua temperatura manteve-se entre 127 e 133 °C. Ele percorre toda a extensão do tubo, onde estava a poda, conduzindo os produtos gasosos gerados para fora.

Figura 9 – Autoclave



Fonte: Autor, 2024.

Na saída do reator, o condensador da Figura 10 foi o responsável por converter em líquido parte dos vapores gerados na reação. Nesse estudo, realizaram-se dois testes de degradação térmica, nas temperaturas 650 e 550°C, padrões descritos por Vieira (2000) *apud* Pedroza et. al. (2011). A taxa de aquecimento será de 30°C min⁻¹ e o tempo de reação de 30 minutos. Como resultado deste experimento, foram gerados o carvão ativado e o bio-óleo.

Figura 10 – Sistema de condensação da parte gasosa



Fonte: Autor, 2024.

3.2.1. Balanço de massa

O balanço de massa foi calculado de acordo com a massa que entrou e a que saiu do reator, mensurando no final a parte sólida e líquida. Neste caso, a fórmula indicada para determinar o balanço de massa é a da Equação 6:

$$M = M1 - M2 \quad (\text{Equação 6})$$

M = Massa do carvão (gramas)

M1 = Massa final (gramas)

M2 = Massa do recipiente tarado (gramas)

} (g)

3.3. Caracterização do carvão obtido

A caracterização do carvão ativado gerado pelo processo de pirólise foi realizada de acordo com os métodos descritos a seguir.

3.3.1. Umidade

A umidade do carvão foi obtida segundo a norma ASTM D 3173-85, de acordo com o método descrito anteriormente no item 3.1.1.

3.3.2. 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 no item 3.1.2.

3.3.3. 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 no item 3.1.3.

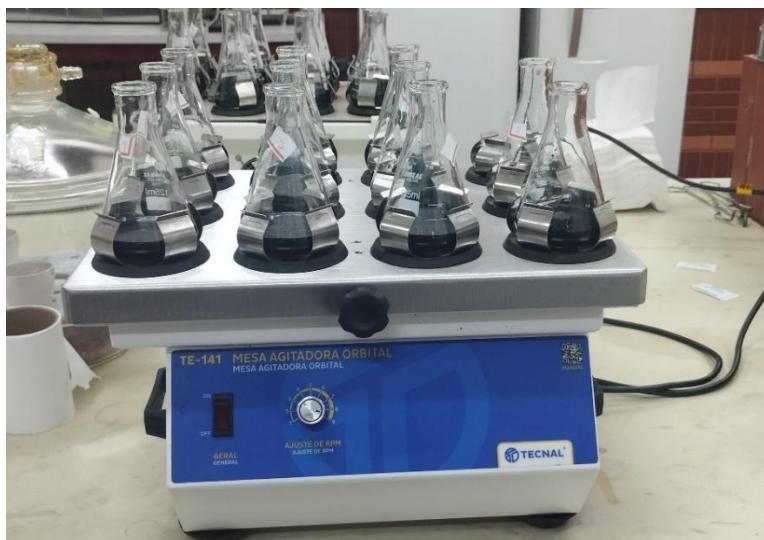
3.3.4. Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi calculado através da diferença descrita segundo a Equação 4 descrita anteriormente no item 3.1.4.

3.4. Ensaio de adsorção

A mistura do carvão com o corante foi realizada em uma mesa de agitação Shaker TE 141 mostrada na Figura 11, com o carvão ativado produzido nessa pesquisa obtido na temperatura de 650°C e taxa de aquecimento igual a 30 °C/min, em forma de pó. Este ensaio foi conduzido no LARSEN-IFTO/*Campus* Palmas.

Figura 11 – Frascos dos ensaios na mesa agitadora



Fonte: Autor, 2024.

A solução corante Azul de Metileno de fórmula química $C_{16}H_{18}ClN_3S \cdot 3H_2O$ foi empregada no teste, sendo utilizados um volume padrão de 30mL de solução em todos os testes. Após esta etapa, as amostras foram filtradas em papel analítico, como demonstrado na Figura 12.

Figura 12 – Filtragem



Fonte: Autor, 2024.

A concentração de azul de metileno resultante determinada no espectrofotômetro apresentado na Figura 13, a 660 nm, valor utilizado por se tratar do comprimento de onda característico por resultar em maior valor de absorbância quando se trata do azul de metileno, de acordo com Rosa, Rodrigues e Fátima (2019).

Figura 13 – Espectrofotômetro

Fonte: Autor, 2024.

Aplicou-se um planejamento experimental do tipo Delineamento de Faces centradas para que pudessem ser verificados os efeitos de duas variáveis independentes, massa de carvão e concentração da solução do corante, no teste de adsorção. A Tabela 1 representa os níveis dos fatores empregados, com valores padronizados do laboratório LARSEN-IFTO.

Tabela 1 – Fatores e níveis empregados

Fatores	Níveis		
	(-1)	(0)	(+1)
Massa do Carvão (g)	0,20	0,50	0,80
Concentração do Corante (mg/L)	20	60	100

Fonte: Autor, 2024.

Foram realizados 11 ensaios, sendo 3 deles no ponto central do Planejamento Experimental, de acordo com a Tabela 2. As respostas obtidas foram: (a) absorbância do filtrado – Y_1 e (b) razão de adsorção - Q .

Tabela 2 – Ordem dos experimentos no planejamento experimental

Ordem dos Experimentos	X ₁ (Massa de carvão)	X ₂ (Concentração do corante)
1	-1(0,20)	-1(20)
2	1(0,80)	-1(20)
3	-1(0,20)	1(100)
4	1(0,80)	1(100)
5	-1(0,20)	0(60)
6	1(0,80)	0(60)
7	0(0,50)	-1(20)
8	0(0,50)	1(100)
9	0(0,50)	0(60)
10	0(0,50)	0(60)
11	0(0,50)	0(60)

Fonte: Autor, 2024.

4. RESULTADO E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização da biomassa

Para realizar a caracterização da biomassa, foram obtidos os resultados da Análise imediata, seguindo a metodologia do capítulo 3. apresentados e discutidos a seguir.

4.1.1. Análise Imediata da poda do Ipê-Verde

A Tabela 3 apresenta os valores obtidos nos ensaios para a caracterização da biomassa, bem como os valores obtidos em outras biomassas por outros autores para que sirvam como parâmetros comparativos, identificando tendências, padrões ou discrepâncias.

Tabela 3 – Valores de caracterização da Biomassa

Variável analítica	Biomassa do Ipê-verde	Peres <i>et al.</i> (2019)	
		Mimosa scabrella Benth	Piptadenia gonoacantha
Umidade (%)	3,30	-	-
Material volátil (%)	83,70	80,91	87,19
Cinzas (%)	0,90	0,59	0,45
Carbono fixo (%)	12,10	18,50	12,36

Fonte: Autor, 2024.

O teor de umidade é dado pelo percentual de massa de água que perde-se em relação à massa total da amostra, quando é submetida a temperaturas que se aproximam a 100 °C. Segundo Uzakov, Davlonov e Holikov (2018) a umidade está relacionada com a capacidade de combustão do material, sendo grandezas que se relacionam de forma inversa. Almeida (2008) definiu que biomassas com teor de umidade inferior a 10% como adequadas para processos de degradação termoquímica. Foi obtido um valor de 3,30% para o teor de umidade do Ipê-Verde, levando a concluir que após a secagem, a biomassa mostra-se adequada para processos como a pirólise.

De acordo com Heylmann *et al.* (2021) o teor de cinzas diz respeito ao percentual de compostos inorgânicos na biomassa, dentre estes, cálcio, ferro, fósforo, magnésio e sódio, por exemplo.

No caso do teor de material volátil, de acordo com Vieira *et al.*, (2013), biomassas com alto teor de voláteis possuem maior facilidade para queima e o valor é diretamente proporcional à reatividade. Nesse parâmetro, obteve-se o valor de 83,70%.

O teor de carbono fixo obtido foi de 12,10%, e diz respeito ao material restante após a liberação dos materiais voláteis, sem a umidade e as cinzas.

O material desta pesquisa, assim como as amostras de Peres *et al.* (2019), comparados na Tabela 3, obteve em suas amostras valores de teor de cinzas abaixo de 1%, material volátil acima de 80% e teor de carbono fixo acima dos 10% o que indica que os materiais são adequados para a realização da pirólise para a produção do carvão ativado.

4.2. Rendimento de carvão do processo de pirólise

Para apoda do Ipê-Verde pirolisada o rendimento de carvão da com a taxa de aquecimento de 30°C/min na temperatura de 650°C foi de 20,57% e na de 550°C foi de 27,23%. Na temperatura de 650°C, 37 gramas de amostra renderam 7,61 gramas de carvão ativado, e com 550°C, 30,44 gramas de amostra renderam 8,18 gramas de carvão ativado. Utilizando as mesmas temperaturas, os resultados se apresentaram próximos aos da de Praxedes (2023), que foram de respectivamente 25,08% e 26,86%.

Dessa forma, é possível perceber que o rendimento encontrado nesta pesquisa é compatível com a literatura analisada. Sendo assim, com o rendimento constatado em ambas as temperaturas, após a secagem, uma tonelada da poda do Ipê-Verde em base úmida produziria 967 kg de biomassa em base seca, que seria capaz de gerar

cerca de 263,31 kg de carvão ativado produzido a 550 °C ou 198,91 kg de carvão processado a 650 °C.

4.3. Caracterização do carvão

De forma análoga a da biomassa, os carvões também passaram por experimentos de caracterização, expostos na Tabela 4, juntamente com os carvões produzidos por outros autores, com as mesmas biomassas citadas na Tabela 3, para identificar semelhanças e até mesmo discrepâncias de resultados.

Tabela 4 – Características do Carvão Ativado e comparativo

Variável analítica	Carvão 1 (550 °C)	Carvão 2 (650 °C)	Peres <i>et al.</i> (2019)	
			Carvão de Mimosa scabrella Benth	Carvão de Piptadenia gonoacantha
Umidade (%)	2,80	2,70	-	-
Material volátil (%)	27,50	17,80	23,26	27,03
Cinzas (%)	9,20	10,50	1,75	0,90
Carbono fixo (%)	60,50	69,00	74,99	72,07

Fonte: Autor, 2024

Ao comparar os resultados da Tabela 4 com os da Tabela 3 percebem-se padrões de comportamento das características de todos os carvões da pesquisa em relação as da biomassa *in-natura*, tais como diminuição da umidade e do material volátil e também o aumento das cinzas e do carbono fixo. Esta tendência é esperada após o processo de degradação termoquímica.

O teor de umidade encontrado foi de 2,8% e 2,7% para os carvões de 550 e 650°C respectivamente. Indicando que parte da umidade da biomassa inicial foi eliminada no processo de produção do carvão, padrão esperado nos ensaios de degradação termoquímica.

Segundo Heylmann *et al.* (2021) o teor de cinzas diz respeito ao percentual de

compostos inorgânicos presentes na amostra. Os resultados para os carvões de 550 e 650°C foram 9,2% e 10,5% respectivamente, sendo esta a característica que mais difere-se entre a pesquisa atual e a de Peres *et al.* (2019).

No caso do teor de material volátil, quando comparado às biomassas da Tabela 3, apresentam baixo teor, pois segundo Vieira *et al.*, (2013) a maior parte é volatilizada durante a pirólise. Nesse parâmetro, os valores dos carvões de ambos os autores da Tabela 4 se mantiveram abaixo dos 30%.

Os valores obtidos no presente estudo e no de Peres *et al.* (2019) foram maiores que 60%, enquanto para as biomassas não ultrapassava os 20%. Este teor diz respeito ao material restante após a liberação dos materiais voláteis, sem a umidade e as cinzas. A riqueza em carbono, porosidade e conectividade são as características mais importantes para quando o carvão é submetido a testes de adsorção (Fortunato, 2018).

4.4. Ensaio de adsorção

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados do ensaio de adsorção realizado com o carvão ativado produzido a 650°C, com o delineamento de faces centradas, conforme apresentado na metodologia, para diferentes concentrações de corante e quantidade de carvão, sendo apresentadas a absorbância do filtrado (Y1) e a razão de adsorção (Q).

Tabela 5 – Resultado do teste de adsorção em relação à massa de carvão e concentração de corante

Experimentos	Massa do Carvão (g)	Concentração do Corante (mg/L)	Absorbância do filtrado	Razão de adsorção (mg/g)
1	0,20	20	0,029	2,95
2	0,80	20	0,029	0,74
3	0,20	100	0,910	13,32
4	0,80	100	0,025	3,74
5	0,20	60	0,264	8,51
6	0,80	60	0,016	2,24
7	0,50	20	0,024	1,18
8	0,50	100	0,034	5,98

9	0,50	60	0,026	3,58
10	0,50	60	0,022	3,58
11	0,50	60	0,010	3,59

Fonte: Autor, 2024.

A Figura 14 mostra a solução de corante com concentração de 60mg/L antes e após o ensaio de adsorção com a massa de carvão de 0,80g.

Figura 14 – Solução de concentração 60mg/L antes e após a adsorção



Fonte: Autor, 2024.

4.4.1. Razão de adsorção (Q)

Para a Razão de adsorção, obteve-se este modelo que foi gerado por regressão linear, que permite-nos observar as relações entre as variáveis. Na Tabela 6, pode-se observar os coeficientes de regressão obtidos para a Razão de adsorção(Q).

Tabela 6 – Coeficientes de regressão do Planejamento DFC para definição da Razão de adsorção do carvão ativado obtido

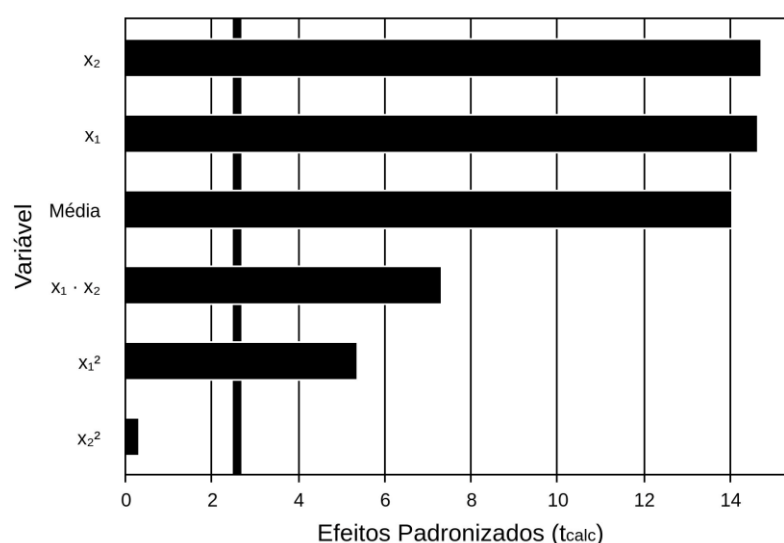
Fatores	Coeficiente de Regressão	Erro Padrão	t-calculado	p-valor
Média	3,63	0,26	14,05	0,0000
X ₁	-3,01	0,21	-14,66	0,0000
X ₁ ²	1,69	0,32	5,36	0,0030

X_2	3,03	0,21	14,75	0,0000
X_2^2	-0,10	0,32	-0,33	0,7540
$X_1 - X_2$	-1,84	0,25	-7,33	0,0007

Fonte: Autor, 2024.

O Diagrama de Pareto mostrado na Figura 15 permite-nos analisar as variáveis com mais significância do modelo para o valor da Razão de adsorção do carvão obtido da pirólise da poda do Ipê-Verde.

Figura 15 – Diagrama de Pareto da Razão de Adsorção (Q) do carvão



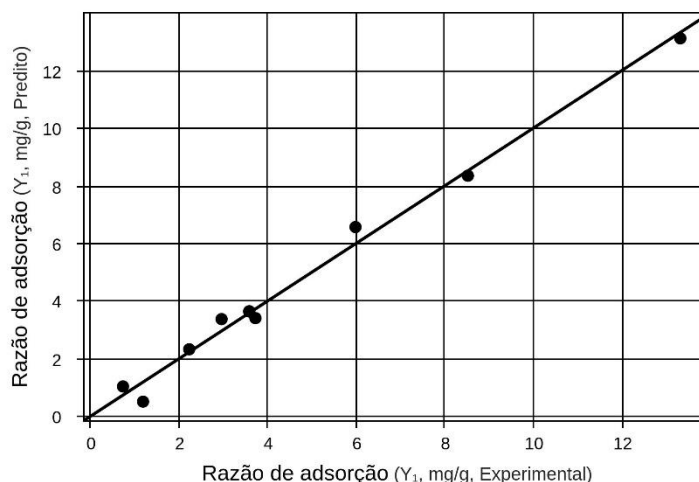
Fonte: Autor, 2024.

O modelo obtido é representado pela Equação 7 e demonstra a relação estatísticas entre os fatores que influenciam a variável Razão de adsorção.

$$Q = 0,63 - 3,01 X_1 + 1,69 X_1^2 + 3,03 X_2 - 0,10 X_2^2 - 1,84 X_1 X_2 \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde: Q = Razão de adsorção; X_1 = massa do carvão(g); X_2 = concentração do corante(mg/L);

Desta forma, com o gráfico de Pareto, pode-se notar que a concentração do azul de metileno – X_2 acaba se destacando como a variável independente de maior relevância para esta resposta, seguida da massa de carvão - X_1 . Como é possível observar no gráfico de predição da figura 16, os dados experimentais apresentam excelente aderência com os resultados previstos no modelo, com pontos que interceptam ou estão próximos da diagonal de referência.

Figura 6 – Valores obtidos x valores previstos para Razão de Adsorção

Fonte: Autor, 2024.

A Tabela 7 apresenta a análise de variância (ANOVA) da Razão de adsorção do carvão ativado na adsorção do azul de metileno.

Tabela 7 – ANOVA para Razão de adsorção das amostras de carvão ativado na adsorção de azul de metileno

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado Médio	F calculado	P valor
Regressão	130,6	5	26,1	103,2	0,00005
Resíduos	1,3	5	0,3	-	-
Falta de ajuste	1,3	3	0,4	11137,9	0,00009
Erro puro	0,0	2	0,0	-	-
Total	131,8	10	-	-	-

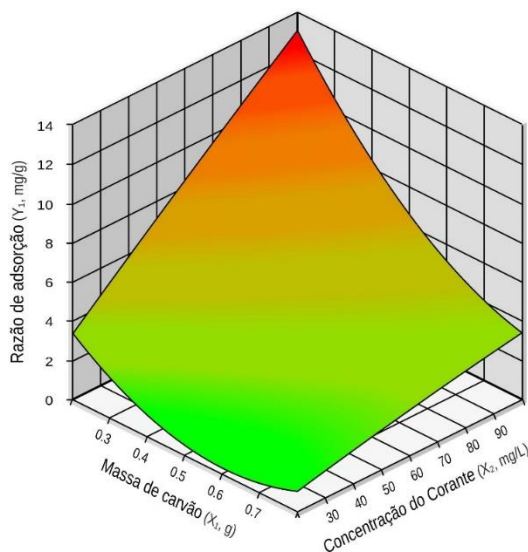
$R^2 = 99,04\%$

Fonte: Autor, 2024.

Neste modelo, o coeficiente de determinação R^2 obtido foi de 99,04%, este valor elevado indica que a formulação estatística foi capaz de explicar grande parte da variação aparente nos dados do experimento, e garantir o ajuste do modelo à realidade.

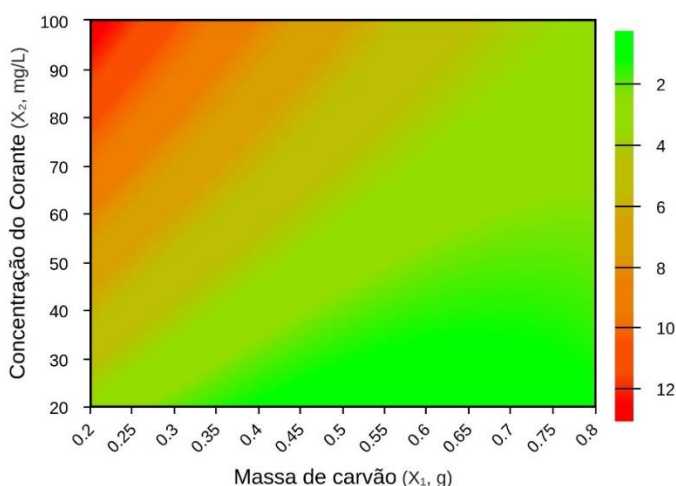
A partir do planejamento experimental, foram gerados um gráfico de superfície e a curva de nível do mesmo, que estão apresentados nas Figura 17 e 18, respectivamente. A partir deles é possível inferir que o carvão obtido na pirólise a 650°C foi eficiente em todas as quantias de massa estudadas, tendo melhor desempenho com massas reduzidas. Assim, quanto maior a concentração do azul de metileno disponível, maior a razão de adsorção.

Figura 17 – Gráfico de superfície para a Razão de adsorção do carvão



Fonte: Autor, 2024.

Figura 18 – Curvas de nível para a Razão de Adsorção do carvão



Fonte: Autor, 2024.

5. CONCLUSÃO

Tendo como base os resultados obtidos neste estudo para a caracterização da biomassa, rendimento da pirólise da poda do Ipê-Verde, caracterização do carvão ativado obtido e para o ensaio de adsorção, é possível chegar às conclusões:

A poda do Ipê-verde apresentou um teor de umidade (3,30%) e elevado teor de material volátil (83,70%), o que aponta positivamente para o uso desse material na produção de carvão ativado através do processo de pirólise. Além disso, o teor de cinzas e de carbono fixo, assim como os parâmetros já citados, mostraram-se

adequados a valores encontrados na bibliografia relacionada ao uso de podas para a produção de carvão ativado

Ao analisar os resultados alcançados no experimento de adsorção do corante azul de metileno pelo carvão ativado obtido da pirólise do Ipê-verde à 650°C, pôde-se perceber que para as maiores concentrações de corante e menores massa de carvão utilizadas, melhores os resultados apresentados, evidenciados pelos elevados valores na razão de adsorção.

Nas condições deste, o carvão ativado produzido mostrou que possui alto poder de adsorção. Provando que pode ser viável a produção e comercialização do produto para diversos fins, devido ao impacto positivo ao meio ambiente, dando destinação eficaz ao resíduo de poda e por sua capacidade de absorver impurezas, filtrar e remover patógenos, destacando-se o mais importante deles para o presente estudo o tratamento de águas residuárias.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>. Acesso em: 15 mar. 2023.

ALMEIDA, M. B. B. de. **Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana-de-açúcar e seu co-processamento com gasóleo em craqueamento catalítico**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Atlas de energia elétrica**. 3ª ed. Brasília, 2008. Disponível em: https://www.fisica.net/energia/atlas_de_energia_eletrica_do_brasul_3a-ed.pdf. Acesso em: 19 mar 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro/RJ, 2004.

ASTMD3173. **Standard Method for Determination of Moisture Content in Biomass**. American Society of Testing Materials International. West Conshohocken, 1987.

ASTMD2415. **Standard Test Method for Ash in Coal Tar and Pitch**. American Society of Testing Materials International. West Conshohocken, 2020.

BERNARDES, Luana. Cerrado. **Todo Estudo**. Disponível em: <https://www.todoestudo.com.br/geografia/cerrado>. Acesso em: 28 de Maio de 2024.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2016**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2018. 220 p.

CARVALHO, Monica et al. Urban pruning waste: carbon footprint associated with energy generation and prospects for clean development mechanisms. **Revista Árvore**, v. 43, p. e430405, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-90882019000400005>. Acesso em: 18 de março de 2024.

CHALUPPE, M. A. C. **Análise da Implantação do Projeto “Valorização dos Resíduos Sólidos Orgânicos no Município de Florianópolis Através do Beneficiamento dos Resíduos de Podas”** Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2013. 125 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental – UFSC. Disponível em: <https://residuos.paginas.ufsc.br/files/2016/04/TCC-Marcelo-Chaluppe.pdf>. Acesso em: 13 de março de 2024.

CORREIA, Gabriela Ribeiro et al. Produção científica sobre resíduos de poda urbana: uma análise cienciométrica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 4, p. 1701-1714, 2022.

CORTEZ, Cristiane Lima. **Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda de árvores urbanas para a geração de energia-estudo de caso: AES Eletropaulo**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-13092011-151318/publico/CristianeCortez.pdf>. Acesso em: 18 de março de 2024.

DURIGAN, G.; BAITELLO, J. B.; FRANCO, G, A, D, C; SIQUEIRA, M. F. **Plantas do Cerrado Paulista: Imagens de uma paisagem ameaçada**. São Paulo: Páginas & Letras Editora e Gráfica, 2004. 475 p. Disponível em: <https://smastr16.blob.core.windows.net/iflorestal/sites/234/2004/01/plantas-do-cerrado-paulista-29mb.pdf>. Acesso em: 14 mar 2024.

FORTUNATO, Alécia Batista et al. **Produção de carvão ativado a partir de biomassa: petíole de buriti**. 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/handle/prefix/2143>. Acesso em: 18 de março de 2024.

GOVERNO DO TOCANTINS. **Semarh visita Aterro Sanitário de Palmas para mapeamento que irá subsidiar a implementação do Plano Estadual de Resíduos Sólidos**. Disponível em: <https://www.to.gov.br/secom/noticias/semarh-visita-aterro-sanitario-de-palmas-para-mapeamento-que-ira-subsidiar-a-implementacao-do-plano-estadual-de-residuos-solidos/w2g8llvylpo>. Acesso em: 15 mar 2024.

HEYLMANN, K. K. A. *et al.* **Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de caroço de pêssego no tratamento de efluente têxtil**. Eng Sanit Ambient, v. 26, n.3, p. 485-494, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-415220190226>>. Acesso em: 30 mai. 2023.

KARAYILDIRIM, T.; YANIK, J.; YUKSEL, B. **Characterisation of products from pyrolysis of waste sludges**. Energy e Fuel, v.85, p. 1498 - 1508, 2006. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=2d68dffffe0bf033baca7630fa7cf6554d013932>. Acesso em: 19 mar. 2024.

LIMA, Ester de Freitas. **Otimização de roteiro de coleta de resíduos sólidos urbanos para a quadra 405 norte, no município de Palmas-TO**. 2023. 52 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2023.

LOHMANN, Lucia G. **'Pouco conhecido': ipê-verde é nativo e apresenta propriedades medicinais**. Terra da Gente. EPTV Campinas e Região. Campinas, SP: [s.n.], 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/campinas-regiao/terra-da-gente/noticia/2022/10/03/pouco-conhecido-ipe-verde-e-nativo-e-apresenta-propriedades-medicinais.ghtml>. Acesso em: 11 mar 2024.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova Odessa: Plantarum, 1992. v.1. 352 p. Disponível em: <https://aeaesp.com.br/wp-content/uploads/2019/09/%C3%81rvores-Brasileiras-Lorenzi-volume-1-compactado.pdf>. Acesso em: 14/03/2024.

MELO, Paulo Régis Bandeira de. **Qualidade fisiológica e armazenamento de sementes de ipê-verde (*Cybistax antisiphilitica* (Mart.) Mart.)**. 2009. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/2096ddf6-3933-4a3c-956d-bc63d08652fd/content>. Acesso em: 14/03/2024.

NELO, L. M. A.. **Levantamento de dados para gestão de reaproveitamento dos resíduos da arborização urbana no município de São Bernardo do Campo**. Engenharia Urbana em Debate. São Carlos, V4, n1, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.59550/engurbdebate.v4i1.83>. Acesso em: 18 de março de 2024.

PEDROZA, M. M. et al. Produção e tratamento de lodo de esgoto: uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 11, p. 147-157, 2010.

PEDROZA, M. M. **Bio-óleo e Biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo**. Tese de Doutorado (Programa de Pós graduação em Engenharia Química) – UFRN. Natal, p. 236, 2011.

PERES et al. A new approach to classify wood pruning residues for energy purposes. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**. Universidade Federal de Viçosa (UFV). Viçosa, Minas Gerais, 2019.

PRAXEDES, Igor Adriano. **Degradação Térmica da poda de Ypê 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.

PREFEITURA DE PALMAS. **Ecopontos da Capital deram destinação final a mais de 10.5 mil toneladas de galhadas em 2021**. Disponível em: <https://www.palmas.to.gov.br/portal/noticias/ecopontos-da-capital-deram-destinacao-final-a-mais-de-105-mil-toneladas-de-galhadas-em-2021/30473/>. Acesso em: 13 de março de 2024.

ROSA, Israel Aparecido; DE MELLO RODRIGUES, Marina Costa; DE FÁTIMA, Sabrina Paulo. Remoção de azul de metileno em biocarvões de casca de arroz e de bagaço de cana-de-açúcar. **Sustentare**, v. 3, n. 1, p. 64-74, 2019. Disponível em: <http://periodicos.unincor.br/index.php/sustentare/article/view/5742>. Acesso em: 22 de março de 2024.

SANCHEZ, M. E. et al. **Effect of pyrolysis temperature on the composition of the oils obtained from sewage sludge**. Biomass and Bioenergy, v. 33, p. 933-940, 2009.

SILVEIRA, Eduardo Coelho Bignardi Garcia. **Aproveitamento de poda de pequi para a produção de carvão ativado**. 2023. 52 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2023.

SILVÉRIO, Flaviano Oliveira; BARBOSA, Luiz Cláudio Almeida; PILÓ-VELOSO, Dorila. A pirólise como técnica analítica. **Química Nova**, v. 31, p. 1543-1552, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/nQNvHt9YST7ksw7YMzrbkVp/?lang=pt>. Acesso em: 19 mar. 2024.

SOARES, Alvaro Guedes. **Adsorção de gases em carvão ativado de celulignina**. 2002. Tese de Doutorado. [sn]. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/226955>. Acesso em: 18 de março de 2024.

SPOSITO, Maria Encarnação Beltrão et al. **Capitalismo e urbanização**. 1988.

UZAKOVA G. N.; DAVLONOVA H. A.; HOLIKOVA K. N. **Study of the Influence of the Source Biomass Moisture Content on Pyrolysis Parameters**. Karshi Engineering Technical Institute, Karshi, Uzbequistão, 2018.

VIEIRA, G. G.; PEDROZA, M. M.; DE SOUSA, J. F.; PEDROZA, C. M. O processo de pirólise como alternativa para o aproveitamento do potencial energético de lodo de esgoto – uma revisão. **Revista Liberato**, [S. l.], v. 12, n. 17, p. 81–96, 2013. Disponível em: <http://191.232.52.91/index.php/revista/article/view/170>. Acesso em: 19 mar. 2024.

VIEIRA, G. E. G; NUNES, A. P; TEIXEIRA, L. F; COLEN, A. G. **Biomassa : uma visão dos processos de pirólise**. Revista Liberato, v. 15, p. 105–212, 2014.

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. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/3n8TGzfRxRTMcngfhmgYV6C/>. Acesso em: 18 de março de 2024.

YANIK J. et al., (2007) Fast pyrolysis of agricultural wastes: characterization of pyrolysis products. **Fuel Processing Technology**, 88, p. 942–947, 2007.