

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

BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

MATEUS DE ASSIS MIRANDA SANTIAGO VASCONCELOS

**DESTINAÇÃO E APROVEITAMENTO DE PODAS DE ÁRVORE (*Hymenaea
courbaril*) PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO.**

PALMAS

2023

MATEUS DE ASSIS MIRANDA SANTIAGO VASCONCELOS

DESTINAÇÃO E APROVEITAMENTO DE PODAS DE ÁRVORE (*Hymenaea courbaril*) PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO.

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

PALMAS

2023

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

V331d Vasconcelos, Mateus de Assis Miranda Santiago
Destinação e aproveitamento de podas de árvore (Hymenaea
courbaril) para produção de carvão ativado. / Mateus de Assis
Miranda Santiago Vasconcelos. – Palmas, TO, 2023.
52 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
Coorientadora: Dra. Cláudia da Silva Aguiar Rezende

1. Resíduos. 2. Pirólise. 3. Carvão. I. Pedroza, Marcelo Mendes.
II. Rezende, Cláudia da Silva Aguiar. III. 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

MATEUS DE ASSIS MIRANDA SANTIAGO VASCONCELOS

DESTINAÇÃO E APROVEITAMENTO DE PODAS DE ÁRVORE (*Hymenaea courbaril*) PARA 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: 04/12/2023

BANCA AVALIADORA

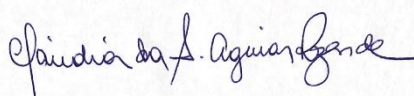


Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

Orientador (IFTO)



Eng. Me. Ranyere do Nascimento Lôbo



Prof^a. Dr^a. Cláudia da Silva Aguiar Rezende

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e à minha família por tudo que fizeram e proporcionaram, fazendo com que eu chegasse até aqui. Sem o apoio dEle e dos familiares nada disso seria possível.

VASCONCELOS, Mateus de Assis Miranda Santiago. **Destinação e aproveitamento de podas de árvore (*Hymenaea courbaril*) para 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.

RESUMO

A cidade de Palmas possui grandes áreas verdes e abriga uma considerável densidade arbórea em suas principais avenidas, ruas, parques e praças. Para manter o conjunto de árvores local com aspectos estéticos agradáveis, sombreamento, e urbanização adequada de acordo com a legislação e normativos municipais, é realizado semanalmente a poda das árvores na cidade; gerando grande volume de resíduos sólidos orgânicos de origem vegetal, proveniente das diversas espécies presentes na capital tocantinense. Dessa forma, este trabalho tem o objetivo de elencar as formas de aproveitamento das madeiras das podas da arborização da cidade de Palmas – TO, com metodologia consistindo em coletar o material, caracterizá-lo e degradar termicamente o resíduo sólido orgânico gerado pelo jatobá (*Hymenaea courbaril*), visando obtenção de carvão ativado e caracterização desse material final, além de ensaio de adsorção. O resíduo de poda de árvore foi caracterizado através de ensaios e obteve 8,87% de teor de umidade, 7,61% de teor de cinzas, enquanto o material volátil e o teor de carbono fixo de apresentaram em 88,85% e 2,20%, respectivamente. A pirólise da biomassa foi realizada em um reator de leito fixo nas temperaturas de 550 e 650 °C, com uma taxa de aquecimento de 30°C/min. O rendimento do carvão para as temperaturas de 550 e 650 °C foram, respectivamente, de 39,31% e 31,98%. O carvão pirolítico dessa pesquisa apresentou 3,54% de teor de umidade, 19,13% de teor de cinzas e percentuais de 69,47% e 14,05% para material volátil e teor de carbono fixo, de modo recíproco; na temperatura de 650 °C. O ensaio de adsorção foi realizado com corante azul de metileno e o carvão a 650 °C apresentou capacidade de adsorção variando de 0,60 até 2,40 mg/g.

Palavras-chave: Resíduos, degradação térmica, poda de árvore, aproveitamento, carvão ativado.

VASCONCELOS, Mateus de Assis Miranda Santiago. **Destination and use of tree prunings (*Hymenaea courbaril*) for activated carbon production.** 2023. 52 p. Course Completion Work – Bachelor's Degree in Civil Engineering – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2023.

ABSTRACT

The city of Palmas has large green areas and is home to a considerable tree density on its main avenues, streets, parks and squares. To maintain the local tree population with pleasant aesthetic aspects, shading, and adequate urbanization in accordance with municipal legislation and regulations, tree pruning is carried out weekly in the city; generating a large volume of organic solid waste of plant origin, coming from the various species present in the capital of Tocantins. Thus, this work aims to list the ways of using wood from tree pruning in the city of Palmas – TO, with a methodology consisting of collecting the material, characterizing it and thermally degrading the organic solid waste generated by the Jatobá (*Hymenaea courbaril*), aiming to obtain activated carbon and characterize this final material, in addition to adsorption testing. The tree pruning residue was characterized through tests and obtained 8.87% moisture content, 7.61% ash content, while the volatile material and fixed carbon content presented 88.85% and 2,20%, respectively. Biomass pyrolysis was carried out in a fixed bed reactor at temperatures of 550 and 650 °C, with a heating rate of 30 °C/min. The charcoal yield for temperatures of 550 and 650 °C were, respectively, 39.31% and 31.98%. The pyrolytic coal in this research had 3.54% moisture content, 19.13% ash content and percentages of 69.47% and 14.05% for volatile material and fixed carbon content, reciprocally; at a temperature of 650 °C. The adsorption test was carried out with methylene blue dye and the charcoal at 650 °C showed an adsorption capacity ranging from 0.60 to 2.40 mg/g.

Key Words: Waste, thermal degradation, tree pruning, recovery, activated carbon.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estimativa da Composição Gravimétrica média dos RSU coletados no Brasil.	17
Figura 2: Semente do jatobá.	21
Figura 3: Representação esquemática das atividades que foram desenvolvidas.	25
Figura 4 - Local de destinação de podas urbanas em Palmas.....	26
Figura 5 - Estufa utilizada para secagem da amostra.	26
Figura 6 - Dessecador.....	26
Figura 7 - Forno mufla.....	27
Figura 8: Reator termoelétrico.....	29
Figura 9: Autoclave.	30
Figura 10 - Sistema que utilizado na aplicação da metodologia.....	31
Figura 11: Barca utilizada para receber a amostra durante pesagem e pirólise.	31
Figura 12 - Biomassa da poda de Jatobá após a pirólise.....	32
Figura 14 - Ensaio de adsorção, com as 11 amostras na mesa agitadora.....	34
Figura 15 - Espectrofotômetro utilizado no processo de adsorção.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Percentual de massa orgânica destinada para tratamento biológico e meta nacional até o ano de 2040.	18
Tabela 2 - Dosagem do carvão por ensaio e respectivas concentrações de corante.	35
Tabela 3 - Dados de pesagem da biomassa.	36
Tabela 4 - Dados obtidos para análise imediata da biomassa de poda de Jatobá....	37
Tabela 5 - Comparativo com a análise imediata de outras biomassas. (a) Alves et. al. (2018); (b) Miranda (2017); (c) Almeida (2020).	38
Tabela 6 - Rendimento do carvão pirolítico da poda de Jatobá.	38
Tabela 7 - Comparação do rendimento do carvão ativado pirolítico com outros autores. (a) Silva, 2019; (b) Félix et. al. (2017); (c) Esquerdo (2019).	39
Tabela 8 - Dados de pesagem do carvão pirolítico produzido nas temperaturas de 550 e 650 °C.	40
Tabela 9 - Dados obtidos para análise imediata do carvão produzido a partir da pirólise da poda de Jatobá.....	41
Tabela 10 - Comparação dos resultados da análise imediata do carvão com outros autores. (d) Miranda, 2017.	42
Tabela 11 - Resultados de adsorção do carvão produzido a 650 °C.	43
Tabela 12 - Variáveis da equação de regressão linear gerada pelo Protimiza.	44
Tabela 13 - Resultado da razão de adsorção das amostras por ANOVA.	46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Influência de cada variável sobre a razão de adsorção.....	45
Gráfico 2 - Resultados obtidos x esperados da razão de adsorção.	46
Gráfico 3 - Capacidade de adsorção do carvão em relação a concentração de corante e massa de carvão.	47
Gráfico 4 - Relação da massa de carvão com a concentração de corante azul de metileno.....	47

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

PNRS- Política Nacional de Resíduos Sólidos

RSU- Resíduos Sólidos Urbanos

PMGIRS- Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos

ASTM- American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana de Testes e Materiais)

SEISP- Secretaria de Infraestrutura e Serviços Públicos

ETA- Estação de Tratamento de Água

CONAMA- Conselho Nacional do Meio Ambiente

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

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

INT- Instituto Nacional de Tecnologia

IPEF- Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13-14
2. PROBLEMA DE PESQUISA	14
3. JUSTIFICATIVA	14-15
4. OBJETIVOS	15
4.1. Objetivo geral.....	15
4.2. Objetivos específicos.....	15
5. REVISÃO DE LITERATURA	16
5.1. Resíduos Sólidos Urbanos	16-18
5.2. Composição Arbórea de Palmas.....	18-19
5.2.1. Gestão dos resíduos de madeira em Palmas	19-20
5.3. Jatobá (<i>Hymenaea courbaril</i>)	20-22
5.3.1. Propriedades e destinações da <i>Hymenaea courbaril</i>	22
5.4. Processo de Decomposição Térmica	23
5.4.1. Carvão ativado	24
6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	24-25
6.1. Coleta do material	25-26
6.2. Caracterização da biomassa	26-30
6.3. Pirólise do material	30-32
6.4. Caracterização do carvão obtido	33
6.4.1. Umidade.....	33
6.4.2. Teor de cinzas.....	33
6.4.3. Material volátil	33
6.4.4. Teor de carbono fixo	33
6.4.5. Densidade	34
6.4.6. Ensaio de adsorção.....	34-35

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
7.1. Caracterização da Biomassa	36
7.1.1. Análise imediata da poda de Jatobá	36-38
7.2. Rendimento do Carvão Ativado da Poda de Jatobá.....	38-40
7.3. Caracterização do Carvão Ativado da Poda de Jatobá.....	40
7.3.1. Análise imediata.....	40-43
7.3.2. Teste de adsorção.....	44
7.3.2.1. Razão de adsorção.....	45-47
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
REFERÊNCIAS	50

1. INTRODUÇÃO

O ano de 2010 representou um marco para os resíduos sólidos no Brasil, uma vez que, foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS pela sanção da Lei 12.305/2010. A Lei estabelece as diretrizes, metas, princípios e o gerenciamento dos resíduos sólidos no país, com o objetivo de amenizar impactos negativos no meio ambiente causados pela má gestão dos resíduos sólidos urbanos e implementar uma nova cultura de gestão no Brasil.

Entre os resíduos sólidos com maior geração no território brasileiro, os resíduos orgânicos apresentam grande relevância e volume anual, como é o caso da geração de resíduos a partir de serviços de jardinagem, corte e desbaste de árvores. Os resíduos provenientes da poda de arborização urbana e remoção de árvores públicas e de residentes particulares em um município podem gerar sérios problemas urbanos quando não são devidamente aproveitados, sendo descartados em locais impróprios como aterros sanitários e lixões clandestinos (BRASIL, 2018). Tais atos inadequados, além dos problemas ambientais em geral como poluição do ar e da água, geram também custos excedentes para os municípios, comprometendo grandes áreas de disposição, e aumentando o risco de incêndio nestes aterros e terrenos baldios; situação recorrentes no estado do Tocantins.

Além dos resíduos resultantes das podas em árvores públicas (troncos, toras, galhos, tocos e raízes), os resíduos vegetais de centros urbanos incluem ainda o material orgânico resultante da manutenção de parques, praças e jardins; incluindo grama e materiais lenhosos diversos (WIECHETECK, 2009). De acordo com dados da Secretaria de Infraestrutura e Serviços Públicos (SEISP) de Palmas, que também é gestora do Aterro Sanitário de Palmas, mais de 5,7 toneladas de resíduos de poda foram reaproveitadas entre janeiro e julho de 2022 em Palmas.

Atualmente, grande parte da madeira de poda e remoção da arborização viária no município de Palmas é recolhido por empresa terceirizada em parceria com a prefeitura e lançada em um EcoPonto, que possui área aberta, onde cerca de 90% dos resíduos são triturados e direcionados para uma empresa parceira que intermedia o fornecimento do cavaco (lascas residuais) para indústrias locais. As beneficiadoras de grãos e cerâmicas são as consumidoras finais deste subproduto.

Para definir as diferentes possibilidades do aproveitamento das podas de árvores, é necessário o conhecimento da espécie determinado e sua caracterização química e física, além de outras características que possibilitam variadas destinações deste material orgânico. Espécies com alta densidade básica são indicadas para a fabricação de componentes estruturais, como vigas fabricadas por meio das tecnologias existentes de aproveitamento (madeira laminada colada) para peças de pequenas dimensões, para a produção de energia, na forma de carvão ou lenhas (VALE; SARMENTO, 2005; MIOTTO; DIAS, 2009).

Nesse contexto, este estudo tem por objetivo elencar formas de aproveitamento das madeiras de podas e remoções da arborização viária do Município de Palmas – TO, com base na caracterização física dessas madeiras, visando produzir carvão ativado a partir do tratamento adequado do material.

2. PROBLEMA DE PESQUISA

O desenvolvimento da cidade Palmas, aliado às raízes sustentáveis da capital que já esteve entre as 100 cidades mais verdes do mundo (HODGES, 2018), desperta um olhar especial para a produção e destinação dos resíduos sólidos orgânicos urbanos locais, que detém riquezas ambientais de mais de 200 espécies e 47 famílias botânicas em suas quadras residenciais urbanizadas (PINHEIRO; MARCELINO; MOURA, 2020). Levando em consideração essa realidade local dos RSU, a procura e inovação por novas alternativas sustentáveis cresce e fortalece uma destinação concreta e benéfica para o grande volume de podas de árvore que é gerado anualmente.

A partir desse pressuposto, o quão viável e benéfico se torna para o meio ambiente a coleta, tratamento e a utilização dos resíduos gerados a partir da poda de árvore do jatobá, *Hymenaea courbaril*, para produção de carvão ativado através da degradação térmica dessa biomassa?

3. JUSTIFICATIVA

O Tocantins possui vasta quantidade de espécies de árvores, e se tratando somente do jatobá, seis espécies já foram catalogadas no estado. O fruto em si possui grandes benefícios para a saúde humana, detendo mais potássio que a banana, por exemplo, e já sendo destinado para fins medicinais e farmacêuticos. Entretanto, a

grande produção de podas dessa árvore também pode apresentar grandes benefícios desde que haja corretas destinações.

Havendo a caracterização das podas do jatobá (*Hymenaea courbaril*) e conhecendo ainda mais as propriedades desses resíduos orgânicos gerados, é possível produzir carvão ativado a partir da pirólise do material e destinar o produto final para inúmeras aplicações cotidianas do carvão. Dessa forma, além de incorporar valor a uma espécie típica local e reduzir o descarte incorreto em grandes volumes, transfigura-se uma opção viável e acessível para produção de carvão ativado.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo Geral

Caracterizar um material orgânico gerado em grande escala, e estudar o processo de degradação térmica dessa biomassa a fim de produzir carvão ativado visando melhor reaproveitamento do material.

4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar a poda do jatobá (*Hymenaea courbaril*) a ser utilizada;
- Realizar o processo da pirólise em reator de leito fixo visando a produção de carvão ativado;
- Determinar as características do material adsorvente final obtido.

5. REVISÃO DE LITERATURA

5.1. Resíduos Sólidos Urbanos

Nas últimas décadas, o consumismo desenfreado e o crescimento populacional acelerado geraram impactos significativamente negativos no meio ambiente, tornando este um tema mundialmente debatido em variadas situações. O desperdício aliado ao descarte incorreto de resíduos sólidos orgânicos no espaço urbano atinge e transforma o ecossistema global, criando um problema e levantando a pauta dos corretos hábitos de destinação final destes resíduos (BRASIL, 2018).

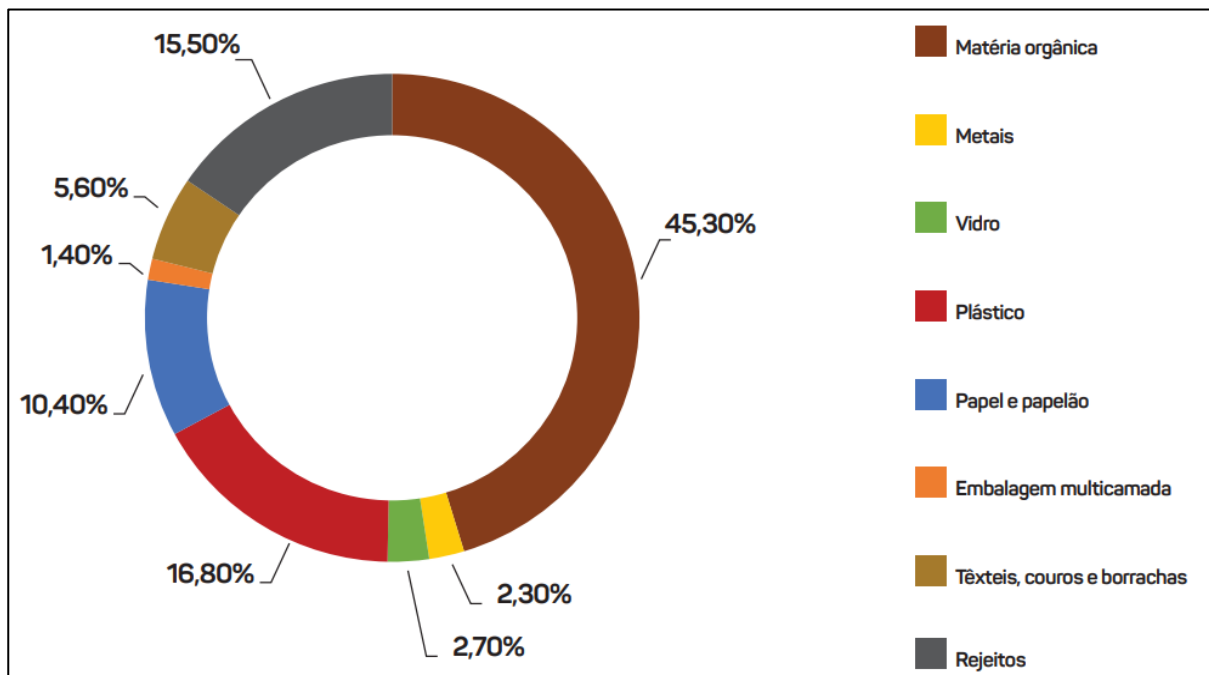
Conceitualmente, os resíduos sólidos orgânicos são materiais que se degradam de maneira natural resultantes do processo de decomposição. Esses resíduos são formados, em geral, por restos vegetais ou animais gerados a partir de ações do ser humano. Sua origem é diversificada, podendo ser doméstica (restos de alimentos não consumidos, dejetos humanos, cascas de ovos), urbana (folhas, sementes e podas de árvore), comercial, industrial ou agropecuária (resíduos de agroindústria alimentícia, indústria madeireira, frigoríficos) e até mesmo de saneamento básico (lodos de estações de tratamento de esgotos) (BRASIL, 2018).

Quando estes resíduos são provindos do cotidiano humano, em especial nas sociedades em desenvolvimento que geram grandes volumes diários, a sua disposição e armazenagem incorreta é capaz de gerar líquido lixiviado, que atua de forma poluente no meio local por possuir grande concentração de substâncias tóxicas; além de servir como vetor de doenças e contribuir para emissão de metano na atmosfera (ROSS et. al. 2021).

Devido às suas características e propriedades, se torna essencial e necessário a adoção de métodos adequados de gestão e tratamento destes grandes volumes de resíduos, para que a matéria orgânica presente seja estabilizada e possa cumprir seu papel natural de fertilizar os solos (BRASIL, 2018).

De acordo com a caracterização nacional e composição gravimétrica dos resíduos disposta no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), de 2022, os resíduos originários de matéria orgânica equivalem a quase 50% do total de resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil (Figura 1). Quando somado aos resíduos provenientes de ETAS e de atividades industriais, os dados do PNRS apontam uma geração anual de mais de 600 milhões de toneladas de resíduos orgânicos no Brasil.

Figura 1: Estimativa da Composição Gravimétrica média dos RSU coletados no Brasil.



Fonte: ABRELPE, 2020

Apesar da existência e viável aplicabilidade de métodos capazes de tratar e buscar condições ideais dos resíduos orgânicos, além de serem viáveis economicamente – como a compostagem e a biodigestão – uma pequena parcela dos resíduos são destinados para tais técnicas de emprego. De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2018), a adoção destes tipos de tratamento resulta na produção de fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo, promovendo a reciclagem de nutrientes, a proteção do solo contra erosão e perda de nutrientes e diminuindo a necessidade de fertilizantes minerais, que são dependentes do processo de mineração, com todos os impactos ambientais e sociais inerentes a esta atividade, e cuja maior parte da matéria-prima é importada.

Entretanto, ainda que técnicas como a compostagem se demonstrem praticáveis, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos estima que atualmente menos de 3% dos resíduos orgânicos passam por algum tratamento biológico visando melhor reaproveitamento, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Percentual de massa orgânica destinada para tratamento biológico e meta nacional até o ano de 2040.

REGIÃO/ ANO	2020	2024	2028	2032	2036	2040
Norte	-	1.50%	3.00%	4.50%	6.00%	7.50%
Nordeste	-	1.50%	3.00%	4.50%	6.00%	7.50%
Centro-Oeste	-	1.90%	3.90%	5.80%	7.70%	9.60%
Sudeste	-	3.60%	7.20%	10.80%	14.40%	18.10%
Sul	-	3.60%	7.20%	10.80%	14.40%	18.10%
Brasil	**	2.70%	5.40%	8.10%	10.80%	13.50%

** Sem dados consolidados

Fonte: Adaptado de PNRS (2022)

Considerando o enorme potencial de produção com o volume anual de resíduos orgânicos gerado no Brasil, em caso de atingimento de meta e melhor aproveitamento destes resíduos orgânicos, o país tende a se desenvolver em inúmeros setores, além de contribuir para a redução de custos associados ao transporte e disposição destes, bem como para a redução de emissões de gases de efeito estufa.

5.2. Composição Arbórea em Palmas

Palmas do Tocantins, a capital mais nova do Brasil, é também a que mais cresceu em número absoluto de habitantes de acordo com o último censo demográfico realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2022; com uma população de 302.692 habitantes. A cidade planejada, ainda que situada em uma região com considerável riqueza vegetativa, também passou por planejamento referente à sua composição arbórea, com metas e objetivos de plantio de diferentes espécies de árvores nas ruas, avenidas, parques e praças da capital. Além do intuito de preservação de áreas verdes e permanências da riqueza vegetativa, o planejamento ocorreu também visando minimizar a alta sensação térmica vivida na cidade.

A paisagem local da cidade é formada por vegetação típica do Cerrado, variando entre fitofisionomias florestais, campestres e savânicas. O clima é caracterizado por

uma estação seca, entre os meses de maio a setembro; e outra chuvosa, entre os meses de outubro a abril. O índice pluviométrico varia de 1.500 a 1.900 mm/ano e a temperatura média anual é de 26°C, sendo a média mais quente de 36°C em setembro, e a mais fria em julho, com mínima de 15,5°C (PINHEIRO; MARCELINO; MOURA, 2020).

As características típicas do Cerrado – segundo maior bioma do país – predominam na capital tocantinense, e a grande biodiversidade com árvores robustas, além de gramíneas e arbustos, contribuem para fatores urbanísticos e atuam diretamente na melhoria da qualidade climática local, trazendo maior umidade e proporcionando ambientes com sombras.

A cidade de Palmas – TO demonstra-se rica e privilegiada pela presença de variadas espécies arbóreas em seu espaço geográfico, até mesmo nas quadras residenciais de norte a sul. No entanto, nos períodos mais secos da capital, onde o índice pluviométrico é baixíssimo e as temperaturas são elevadas, a vegetação presente acaba se tornando um combustível para um problema anual da cidade; as grandes queimadas. Normalmente iniciado pela ação humana, focos de incêndio são iniciados próximo de áreas com existências de árvores e matas, causando graves problemas ambientais, riscos de segurança e consequente perda da biodiversidade.

Ainda de acordo com Pinheiro, Marcelino e Moura (2020), em Palmas – TO, apesar da apreciável riqueza de espécies nas ruas das quadras urbanizadas, também há o predomínio de espécies exóticas ao Cerrado, incluindo algumas espécies estrangeiras muito frequentes e de alto valor estético.

Entre as espécies típicas do Cerrado, pode-se destacar o jatobá, árvore que é encontrada facilmente nas zonas urbanas públicas da cidade. No estado, 6 espécies de jatobá já foram catalogadas, porém na sua composição arbórea, a espécie *Hymenaea courbaril* é a que se faz mais presente.

5.2.1. Gestão dos resíduos de madeira em Palmas

O plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos (PMGIRS) da cidade de Palmas passou por revisão em 2022 para alinhar e definir novas metas relacionadas à administração local em pauta. O planejamento dessa gestão – que compreende a coleta, transporte, o armazenamento, a destinação e tratamento

ambientalmente adequados dos resíduos sólidos, bem como a correta disposição final dos rejeitos – e a formulação do PMGIRS é um agente essencial para o desenvolvimento e melhorias das pequenas e grandes cidades no que se remete ao alcance de serviços relacionados à limpeza urbana, correta destinação e manejo de resíduos e até mesmo ao saneamento básico em alguns casos; visto que muitos municípios sofrem com este fator devido à ausência de aterros sanitários qualificados e descarte incorreto de resíduos em ambientes que se tornam lixões e acabam degradando o meio ambiente. A revisão do PMGIRS, segundo o novo marco legal do saneamento básico, deve ser realizada num período de até 10 anos a partir de sua aprovação (BRASIL, 2020).

Por possuir uma vasta e variada composição arbórea, a cidade de Palmas gera grandes volumes anuais de podas de árvores; tanto residenciais como de praças, parques e até mesmo dos canteiros públicos que recebem grandes vegetações em seu perímetro.

A gestão e recolhimento dos resíduos provenientes de podas de árvore é um serviço oferecido pela prefeitura, que utiliza de forma terceirizada empresas parceiras para o recolhimento desses materiais orgânicos (ainda que a correta destinação do resíduo possa ser responsabilidade do morador). De acordo com a Secretaria Municipal de Infraestrutura e Serviços Públicos de Palmas, mais de 11,6 mil toneladas de poda de árvore foram recolhidas nas ruas da cidade no ano de 2019.

Atualmente, os resíduos provenientes da massa arbórea palmense são recolhidos e depositados em um EcoPonto localizada na zona rural da cidade; local onde é realizado a segregação e tratamento do material para buscar formas de reaproveitamento, como a compostagem utilizada em viveiros e fundações ambientais na cidade.

5.3. Jatobá (*Hymenaea courbaril*)

O jatobá (nome científico: *Hymenaea courbaril*) é uma espécie pertencente à divisão das Angiospermas, da ordem das Fabales e da família *Leguminosae* *Caesalpinioideae*. *Hymenaea* deriva do grego (hymen), “deus do matrimônio” e faz alusão aos dois folíolos pareados das folhas; courbaril é nome comum; stilbocarpa

significa “fruto duro”. O nome popular jatobá vem da língua tupi, va-atã-yba, que significa “árvore de fruto duro” (CARVALHO, 2003).

Ainda de acordo com Carvalho (2003), é uma árvore semicaducifólia que pode alcançar até 35 metros de altura e 1,5 metros de diâmetro na sua fase adulta. O jatobá ocorre naturalmente em solos secos e, às vezes até em solos de baixa fertilidade, rareando geralmente em terra roxa. Em experimentos, tem crescido melhor em solo com fertilidade variando de média a elevada, com drenagem boa a regular e com textura que varia de franca a argilosa. Ainda que, devidos suas propriedades físicas, seja uma espécie muito explorada e visada para extração, o jatobá não corre riscos totais de extinção por ser predominante em um bioma com larga extensão territorial no Brasil. Segundo o Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF), o jatobá – além de estar em larga distribuição geográfica – é uma espécie de aparição comum e com ocorrência em áreas protegidas; o que se passa até pelo seu sistema reprodutivo e de regeneração.

As sementes de jatobá (Figura 2) podem ser coletadas de frutos caídos das árvores. A sua extração é manual, utilizando-se um martelo ou cacetete para quebrar o fruto. Em seguida, as sementes são lavadas em água para a separação da polpa farinhosa e depois selecionadas, sendo eliminadas aquelas que apresentam perfurações causadas por ataque de pragas.

Figura 2: Semente do jatobá.



Fonte: Tacip Philip (2017).

O jatobá é considerado sagrado por povos indígenas, que serviam os frutos antes de rituais de meditação, pois acreditavam que o fruto trazia equilíbrio mental, pois fruto é rico em ferro, e é indicado a quem sofre de anemia. A espécie pode ser encontrada por ocorrência natural na Floresta Amazônica, na Mata Atlântica, no Pantanal e especialmente no Cerrado.

5.3.1. Propriedades e Destinações da *Hymenaea courbaril*

A madeira do jatobá é uma das mais valiosas do mundo, e é utilizada em caibros, ripas, vigas, tábuas, tacos e na confecção de móveis de luxo. Por suas propriedades e resistências, indígenas utilizam a madeira do jatobá para confecção de canoas (EMBRAPA, 2004). Além disso, a madeira do jatobá também é bastante empregada na construção civil, mobiliário e esquadrias. As madeiras de jatobá são consideradas como nobres para a produção de madeira serrada, com aspectos visuais atraentes e alta durabilidade natural. O estudo das propriedades físicas dessas madeiras é de grande importância, podendo assim avaliar melhor o seu potencial tecnológico e ampliar o conhecimento sobre essas espécies (EVANGELISTA e COSTA, 2017). Além do aspecto estético de uma madeira brilhosa e de diferente tonalidade, a sua densidade e durabilidade tornam um material de grande valor na indústria.

Ainda de acordo com Evangelista e Costa (2017) a madeira do jatobá tem propriedades desejáveis para a produção de pisos, pois apresenta alta densidade e contrações lineares e volumétricas relativamente baixas. Comparando-se as madeiras utilizáveis e descartáveis para a produção de pisos, a madeira descartável de jatobá apresenta as menores contrações e as maiores densidades, sendo possivelmente de qualidade igual ou superior àquela efetivamente utilizável. Além da madeira, outra parte bastante utilizada da espécie é a casca, que pode ser usada na forma de chá, e as folhas, usadas na forma de tintura. Além disso, a polpa dos frutos do jatobá, também pode ser consumida na sua forma natural, crua ou assada.

5.4. Processo de Decomposição Térmica

A pirólise pode ser definida como o processo em que determinada biomassa é aquecida com taxas de temperatura controlada em ambiente fechado em ausência de agente oxidante (ar ou oxigênio) (SANTOS, 2019). De acordo com Oliveira (2009), dentre as tecnologias disponíveis e adequadas no mercado, o tratamento térmico por pirólise recebe destaque por reduzir o volume do resíduo em até 90% de seu peso, além de favorecer o reaproveitamento da matéria-prima em vários segmentos industriais. O processo ocorre em temperaturas na faixa de 150 até 1600 °C, por meio de conversão catalítica ou não, dependendo do tipo de resíduo a ser tratado e do equipamento utilizado.

O processo de degradação térmica é um processo químico irreversível e se deve ao calor fornecido na ausência de oxigênio. Este processo produz produtos sólidos, líquidos ou gasosos que são utilizados como combustível, esterco e outros produtos úteis, como carvão ativados e bio-óleo. Na ausência de oxigênio, a energia quebra as ligações químicas e deixa a energia que é armazenada na biomassa. À medida que a temperatura aumenta, a celulose e a lignina se decompõem em substâncias mais simples que são eliminadas, deixando para trás um resíduo carbonizado. Há séculos, o processo da pirólise é utilizado para produção de carvão que podem ser utilizados em indústrias (VELMURUGAN, 2021).

Os primeiros procedimentos de pirólise foram realizados na década de 1970, período em que o petróleo passava por crise e ocorria a busca pela conversão de biomassa em combustíveis (MOHAN; PITTMAN; STEELE, 2006). Devido a grande capacidade energética e variação no mercado que a biomassa – fonte de matéria prima da pirólise – se encontra, pesquisas, experimentos e novos estudos são estudados diariamente para aperfeiçoar e potencializar ainda mais este método que gera benefícios em diferentes esferas; incluindo a ambiental e econômica.

O processo de degradação térmica envolve uma série de fatores, equipamentos e condições adequadas de ambiente e temperatura para atingir o produto final desejado. Entre esses equipamentos, é utilizado um reator termoelétrico, onde todas as reações químicas acontecem (UDDIN *et al*, 2018; BASU, 2018), sendo realizadas com a ausência de oxigênio. Além do reator, outros equipamentos como uma autoclave que mantém a temperatura elevada na pirólise também são utilizados.

5.4.1. Carvão Ativado

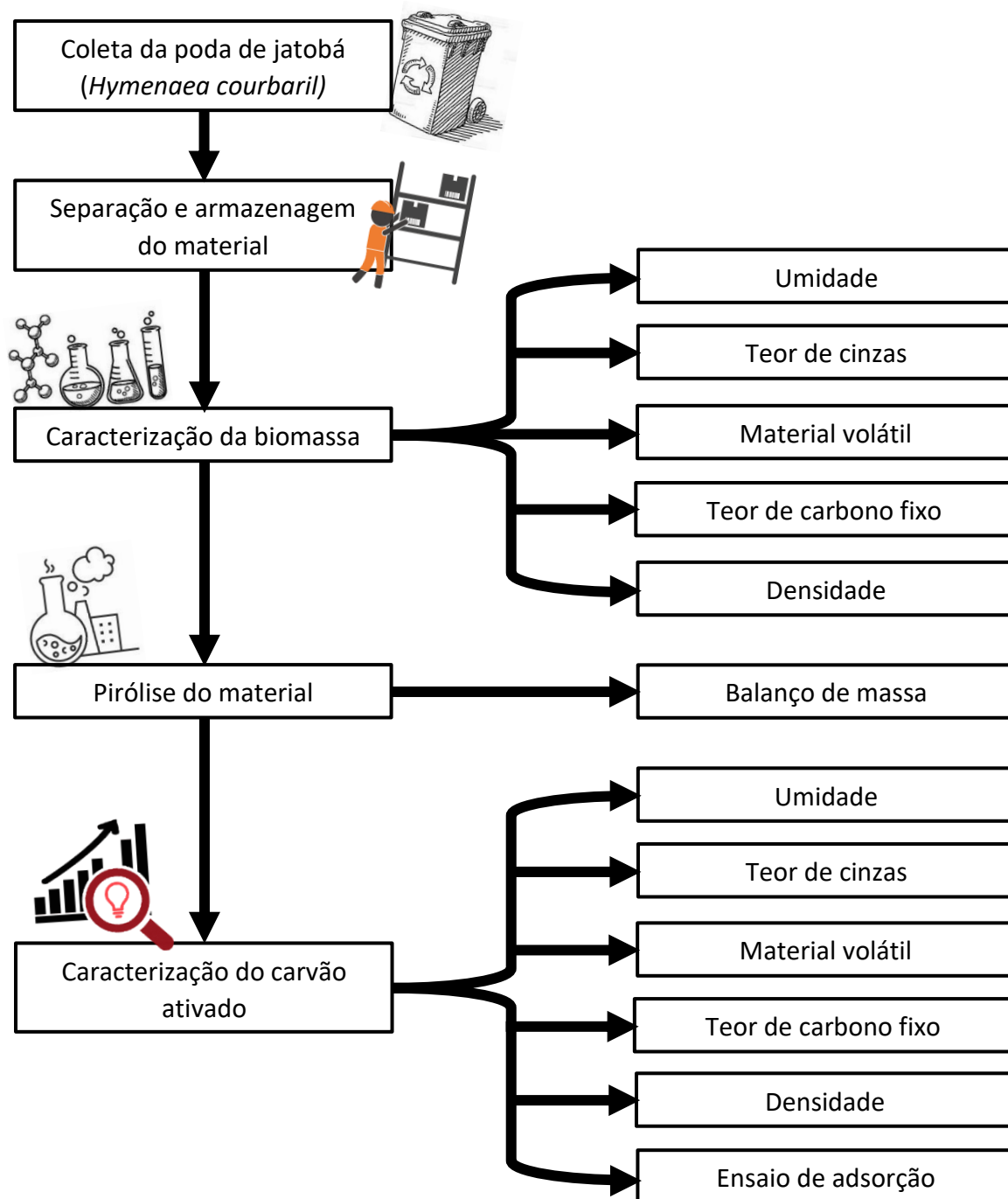
O tratamento de água em estações de tratamento utilizando carvão ativado é normalmente utilizado para remover compostos orgânicos naturais, compostos de sabor e odor e produtos químicos orgânicos sintéticos. A adsorção de carvão ativado fixa fisicamente moléculas de gás ou de fase líquida à superfície do carvão ativado. O carvão ativado é um adsorvente eficaz porque é um material altamente poroso e fornece uma grande área superficial na qual os contaminantes podem ser adsorvidos (JOHNSON, 2014). O carvão ativado é produzido a partir de resíduos ambientais com alto teor de carbono. Materiais lignocelulósicos e de carvão têm sido utilizados como matérias-primas planejadas para a fabricação de carvões ativados. Existem duas abordagens para a preparação de carvão ativado que podem ser utilizados em processos de purificação de água: ativação física e ativação química. O carvão ativado tem bom potencial para adsorver metais pesados devido à sua maior área superficial, capacidade microporosa e complexidade química de sua área externa (AHMAD, 2019).

Dessa forma, de acordo com Nille et.al. (2021) o carvão ativado é um material promissor que tem sido extensivamente estudado por diversos pesquisadores. O carvão ativado é um material de baixo custo com propriedades distinguíveis como alta área superficial específica, alta porosidade e funcionalização superficial desejada. Por causa disso, o carvão ativado é diversamente utilizado para aplicações eficazes em adsorção, remoção de poluentes, tratamento de água e energia, etc.

6. METODOLOGIA

O referido estudo teórico e as práticas experimentais foram exercidos no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN), do Instituto Federal do Tocantins (IFTO) – Campus Palmas. As seguintes partes do trabalho irão mencionar e detalhar as técnicas, métodos, materiais e equipamentos utilizados para obtenção do resultado final objetivado; a produção de carvão ativado a partir da degradação térmica da poda do jatobá. A Figura 3 representa um esquema de como as atividades foram desenvolvidas, desde a coleta do material até a caracterização do carvão ativado produzido.

Figura 3: Representação esquemática das atividades que foram desenvolvidas.



Fonte: Autoria própria (2023).

6.1. Coleta do material

A coleta do material foi realizada na quadra 102 Norte, em Palmas – TO. O colhimento ocorreu antes da ida do material a um EcoPonto administrado e gerido pela prefeitura de Palmas; local destinado atualmente para receber somente resíduos de podas de árvores coletados no município que se apresentam em grande volume (Figura 4). Diariamente, caminhões caçambas carregados de poda de árvore urbana

chegam até o local, que passa por triagem inicial, separação por tamanhos, peso e característica, até que o material é triturado antes de ser encaminhado para outras destinações.

Figura 4 - Local de destinação de podas urbanas em Palmas (EcoPonto). (a): podas amontoadas, (b): triturador de podas.

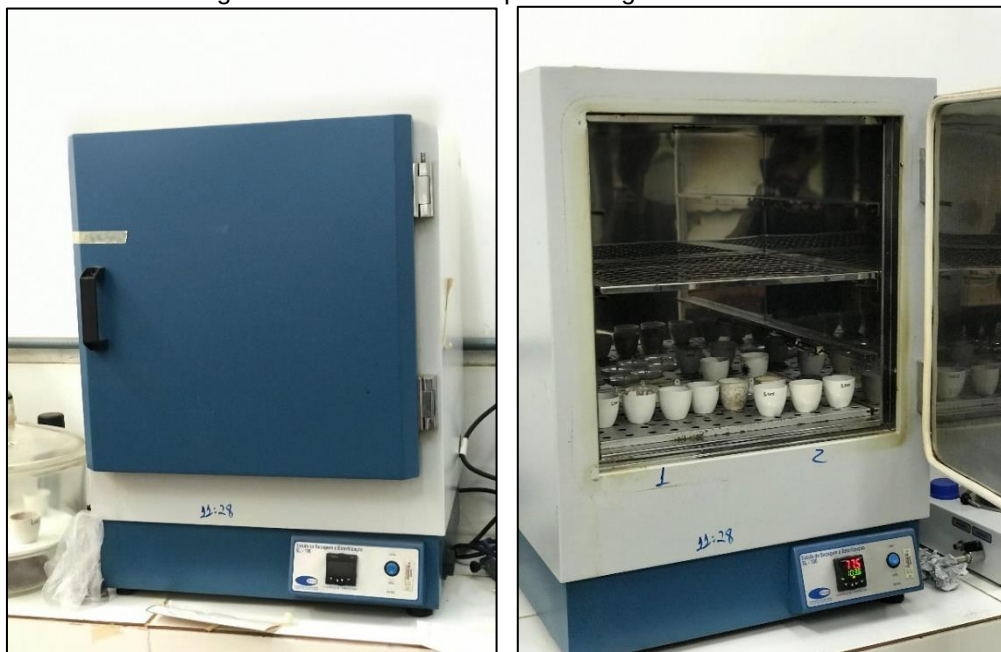


Fonte: Autoria própria (2023).

6.2. Caracterização da biomassa

Nesta etapa que antecede o processo de degradação térmica, a caracterização da biomassa a ser utilizada ocorreu pela secagem, determinação da umidade, teor de cinzas, teor de carbono fixo, material volátil e densidade. Após a coleta e separação do material, a amostra foi secada em uma estufa (Figura 5), para posteriormente prosseguir com os resultados referentes à umidade do material.

Figura 5 - Estufa utilizada para secagem da amostra.



Fonte: Autoria própria (2023).

6.2.1. Umidade

O teor de umidade da amostra foi determinado de acordo com a norma ASTM D 3173-87. Com o objetivo de analisar e quantificar a massa perdida após determinado e tempo e temperatura controlada na estufa, a amostra foi transferida para um recipiente fechado com o objetivo de manter o baixo teor de umidade alcançado na estufa (dessecador) antes de ser pesado (Figura 6).

Figura 6 - Dessecador.



Fonte: Autoria própria (2023).

O material se manteve no dessecador durante 15 minutos, até ser transferido para a balança de precisão. Para obter a umidade do material pesado, foi aplicada a Equação 1:

$$Umidade (\%) = \left(\frac{x-y}{x} \right) * 100\% \quad \text{(Equação 1)}$$

Em que:

x = massa inicial da amostra (em gramas);

y = massa da amostra após o aquecimento na estufa (em gramas).

6.2.2. Teor de cinzas

Para obtenção do teor de cinzas foi aplicado a norma ASTM D 3174-04, em que amostras da poda de árvore foram adicionadas a cadinhos de porcelana de peso constante pré-determinado. A amostra foi “agitada” a uma temperatura de aproximadamente 710 °C durante 60 minutos em um forno mufla da marca EDG Equipamentos, modelo WOne (Figura 7). Após o tempo previsto na mufla, os cadinhos foram colocados em um dessecador por 1 hora para resfriar e posteriormente ser realizada a pesagem.

Figura 7 - Forno mufla.



Fonte: Autoria própria (2023).

Realizado a pesagem e procedimentos de conferição, o teor de cinzas da amostra foi determinado conforme a Equação 2:

$$\text{Teor de cinzas (\%)} = \left(\frac{x-y}{p} \right) * 100\% \quad \text{(Equação 2)}$$

Em que:

x = peso do cadinho vazio + peso da amostra (em gramas);

y = peso do cadinho + peso amostra pós-aquecimento na estufa (em gramas);

p = peso da amostra (em gramas).

6.2.3. Material volátil

Para determinação do teor de material volátil da biomassa de poda de árvore de jatobá, foi seguido a norma ASTM D 3175-07. Durante um período de 7 minutos, a amostra foi aquecida em um forno mufla à uma temperatura de 850° C estando ausente de oxigênio. Ao terminar o aquecimento no tempo e temperatura determinado, o teor de material volátil foi determinado conforme Equação 3.

$$\textbf{Material volátil} (\%) = \left(\frac{x-y}{p} \right) * 100\% \quad \textbf{(Equação 3)}$$

Em que:

x = peso do cadinho vazio + peso da amostra (em gramas);

y = peso do cadinho + peso amostra pós-aquecimento na estufa (em gramas);

p = peso da amostra (em gramas).

6.2.4. Teor de carbono fixo

Para determinação do teor de carbono fixo, foi necessário entender e obter o teor de material volátil (CHAVES, A. M. B., *et al*, 2013) – realizado em 3.2.3. A partir desses resultados, foi aplicado a Equação 4.

$$\textbf{Carbono fixo} (\%) = 100 - (\% \textit{umidade} + \% \textit{cinzas} + \% \textit{material volátil}) \quad \textbf{(Equação 4)}$$

6.2.5. Densidade

A densidade foi calculada a partir do uso de uma proveta de 100ml, colocando a amostra sucessivas vezes nos seguintes volumes: 20, 40, 60, 80 e 100 ml. Após essa separação, foi utilizada uma balança de precisão que forneceu diferentes massas, e a partir disso foi aplicado a Equação 5 para o cálculo da densidade:

$$D = \frac{m}{v} \quad \textbf{(Equação 5)}$$

Onde:

D = densidade (g/mL)

m = massa (g)

v = volume (mL)

6.3. Pirólise do material

O processo de degradação térmica do material foi realizado em um reator termoeletrônico de leito fixo composto de aço inox, de 100 cm de comprimento. O reator (Figura 8) foi aquecido por forno bipartido reclinável (marca FLYEVER, modelo FE50RPN e linha 05/50), o gás de arraste empregado na reação foi o vapor de água aquecido a uma faixa de temperatura de 127°C a 133 °C em autoclave (Figura 9).

Figura 8: Reator termoeletrônico.



Fonte: Autoria própria (2023).

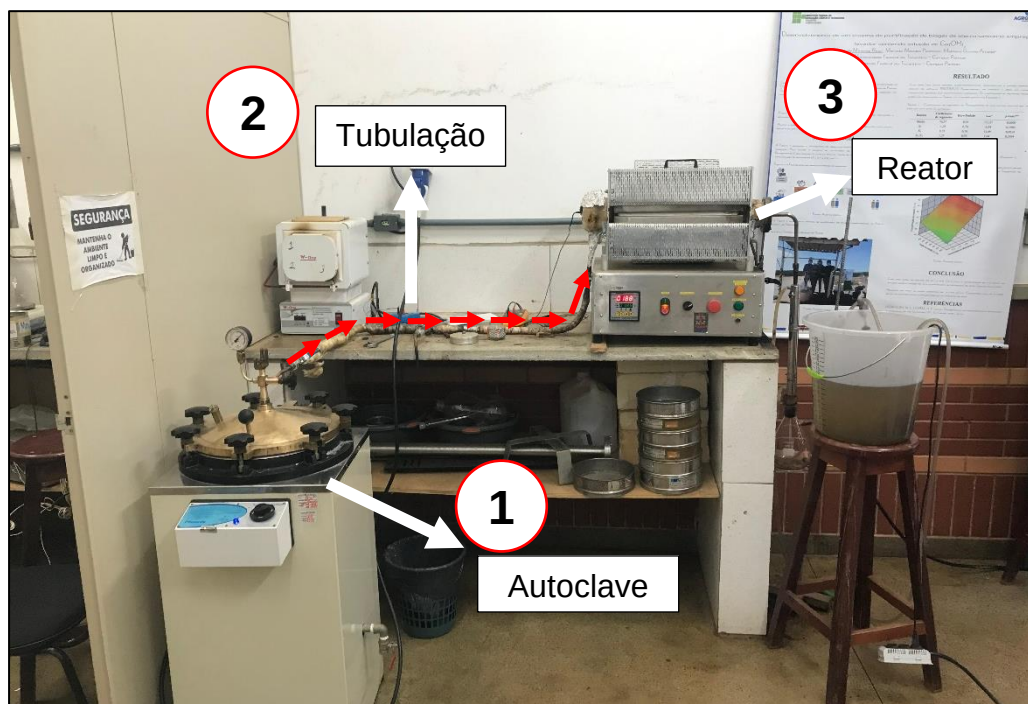
Figura 9: Autoclave.



Fonte: Autoria própria (2023).

No duto do reator onde a biomassa foi introduzida, durante o processo da pirólise, vapores de água foram formados e dispersos para fora do leito. Na extremidade de saída, há um sistema de condensação para que parte dos vapores produzidos na reação sejam convertidos em líquido. A Figura 10 esquematiza o sistema utilizado durante processo metodológico.

Figura 10 - Sistema utilizado na aplicação da metodologia.



Fonte: Autoria própria (2023).

O material que passou pela pirólise foi colocado em uma cápsula em formato de barca (Figura 11) – que foi previamente pesado – e inserido no reator.

Figura 11: Barca utilizada para receber a amostra durante pesagem e pirólise.



Fonte: Autoria própria (2023).

O experimento foi realizado com duas temperaturas distintas: 550 e 650 °C. O tempo de reação e a taxa de aquecimento foram de 30 minutos e 30°C min⁻¹ respectivamente. O procedimento da pirólise gerou um bio-óleo e o carvão ativado, que serviu como objeto de estudo. A Figura 12 mostra a biomassa do jatobá ao término da pirólise e antes de ser triturada para assumir consistência de carvão.

Figura 12 - Biomassa da poda de jatobá após a pirólise.



Fonte: Autoria própria (2023).

6.4. Caracterização do carvão obtido

A caracterização do carvão ativado produzido a partir da pirólise da poda do jatobá foi realizada em procedimentos semelhantes da caracterização da biomassa.

6.4.1. Umidade

O teor de umidade do carvão ativado foi determinado utilizando o método descrito em 6.2.1, em conformidade com a norma ASTM D 3173-87.

6.4.2. Teor de cinzas

O teor de cinzas foi determinado seguindo o método descrito em 6.2.2, em conformidade com a norma ASTM D 3174-04, sendo realizado no forno mufla da Figura 13.

Figura 13 - Cadinhos com carvão ativado no forno mufla.



Fonte: Autoria própria (2023).

6.4.3. Material volátil

Para se determinar a porcentagem de material volátil, o método descrito em 6.2.3 foi utilizado, em conformidade com a norma ASTM D 3175-07.

6.4.4. Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi determinado conforme descrito no item 6.2.4.

6.4.5. Densidade

Para se determinar a densidade do carvão ativado obtido através da pirólise da poda de jatobá, foi realizado o mesmo procedimento descrito em 6.2.5

6.4.6. Ensaio de adsorção

O ensaio de adsorção foi realizado por meio de um aparelho denominado mesa agitadora TE141, da marca TECNAL. Foram adicionadas 11 amostras do carvão misturados a diferentes concentrações de corante para obter a adsorção do produto, conforme Figura 14.

Figura 14 - Ensaio de adsorção, com as 11 amostras na mesa agitadora.



Fonte: Autoria própria (2023).

Antes de posicionar os frascos na mesa agitadora da Figura 14, foram preparados 11 recipientes contendo carvão nas medidas de 0,20, 0,50 e 0,80g.

Após a devida separação, adicionou-se aproximadamente 30mL do corante azul de metileno com concentrações de 20, 60 e 100 mg/ L, que serviram como solução da amostra. A Tabela 2 evidencia as massas de carvão adotadas nas 11 amostras e suas respectivas concentrações de corante.

Tabela 2 - Dosagem do carvão por ensaio e respectivas concentrações de corante.

Amostra	Massa de carvão (g)	Concentração do azul de metileno (mg/ L)
1	0.50	20.00
2	1.00	20.00
3	0.50	100.00
4	1.00	100.00
5	0.50	60.00
6	1.00	60.00
7	0.75	20.00
8	0.75	100.00
9	0.75	60.00
10	0.75	60.00
11	0.75	60.00

Fonte: Autoria própria (2023).

Em seguida, as amostras foram submetidas à filtragem por meio de filtros de papel e, posteriormente, analisadas utilizando um espectrofotômetro (Figura 15). Esse equipamento tem como finalidade a determinação da concentração de azul de metileno após o processo de filtragem, por meio da técnica de espectrofotometria.

Figura 15 - Espectrofotômetro utilizado no processo de adsorção.



Fonte: Autoria própria (2023).

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As características da biomassa utilizada em seu estado natural são apresentadas a seguir, bem como os resultados alcançados a partir dos experimentos visando caracterizar o carvão ativado obtido. Os resultados foram obtidos por meio do processo de degradação térmica realizados a 550 e 650° C, além dos métodos indicados nos capítulos 6.2 e 6.3 dessa pesquisa.

7.1. Caracterização da biomassa

7.1.1. Análise imediata da poda de Jatobá

Para realização da análise imediata da amostra de poda de Jatobá, foi realizado a pesagem de 3 amostras no cadinho com situações distintas; em seu estado natural, 710 e 850 °C, conforme procedimentos descritos no item 6 dessa pesquisa. Com o tempo e temperatura na estufa pré-determinados, as amostras apresentaram pesos conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Dados de pesagem da biomassa.

DADOS DE PESAGEM DA BIOMASSA			
Amostra	Peso do cadinho (Po) + amostra (g)	Po + amostra (g) a 710 °C	Po + amostra (g) a 850 °C
M1	34.80	33.63	33.84
M2	34.06	33.14	33.28
M3	33.99	33.15	33.29

Fonte: Autoria própria (2023).

De acordo com Vale et. al. (2011), o teor de umidade de uma biomassa é um parâmetro determinante para utilização ou não deste material como fonte de energia renovável, pois a partir desse fator a combustão da biomassa irá variar. A biomassa da poda de jatobá apresentou um teor de umidade médio de 8,87%; sendo considerado um valor baixo de umidade e tornando-o apto para combustão – uma vez que o limite médio considerado é de 65% (JENKINS et. al., 1998).

O percentual obtido para o teor de cinzas de uma biomassa é um indicador com limitação, uma vez que se for considerado alto, intervém diretamente na geração final de energia (KLAUTAU, 2008). Para a poda de jatobá utilizada na pesquisa *in natura*, foi obtido um teor de cinzas médio de 7,60%, demonstrando-se eficiente e agregando no potencial calorífico da amostra.

Ainda segundo Klautau (2008), a propensão da biomassa para entrar em combustão em temperaturas elevadas é determinada pela presença de voláteis e pela proporção de matéria orgânica em sua estrutura. O valor médio encontrado nessa pesquisa para material volátil da amostra foi de 69,47%, que segue o prognóstico de ser favorável a combustão e produção de energia.

O teor de cinzas e o material volátil estão diretamente relacionados ao teor de carbono fixo obtido na pesquisa, que constitui a massa remanescente após a remoção de compostos voláteis, excluindo tanto as cinzas quanto os teores de umidade. Para a poda de jatobá da amostra, o carbono fixo médio obtido foi de 14,05 %. A Tabela 4 representa os dados obtidos para a análise imediata da poda de Jatobá.

Tabela 4 - Dados obtidos para análise imediata da biomassa de poda de Jatobá.

ANÁLISE IMEDIATA DA BIOMASSA				
Amostra	Teor de umidade (%)	Teor de cinzas (%)	Material volátil (%)	Carbono fixo (%)
M1	8.56	8.86	68.01	14.57
M2	8.94	6.63	71.70	12.73
M3	9.11	7.33	68.70	14.86
MÉDIA	8.87%	7.61%	69.47%	14.05%

Fonte: Autoria própria (2023).

A partir dos resultados obtidos na Tabela 4, é feita uma comparação com os resultados de outros pesquisadores evidenciando aproximação da biomassa do jatobá com materiais assemelháveis, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Comparativo com a análise imediata de outras biomassas.

Variável Analítica	Poda de Jatobá utilizada nessa pesquisa	Outros autores		
		Poda de árvore ^a	Casca de Jatobá ^b	Casca de Buriti ^c
Teor de umidade (%)	8.87%	5.80%	11.56%	3.06%
Teor de cinzas (%)	7.61%	3.15%	1.08%	3.93%
Material Volátil (%)	69.47%	88.85	75.36	85.16
Carbono Fixo (%)	14.05%	2.20%	23.56%	10.91%

Fonte: Autoria própria (2023). (a) Alves et. al. (2018); (b) Miranda (2017); (c) Almeida (2020).

7.2. Rendimento do carvão

Realizado a pesagem do carvão pirolítico, o rendimento do carvão ativado, após a realização da degradação térmica nas temperaturas de 550 °C e 650 °C, foi de aproximadamente 39% e 32%, respectivamente. Com isso, é evidente que o rendimento do carvão ativado é inversamente proporcional à temperatura empregada no ensaio de pirólise. A Tabela 6 evidencia o rendimento alcançado do carvão nas duas temperaturas de pirólise realizado, bem como os valores iniciais pesados para o conjunto cadinho e amostra.

Tabela 6 - Rendimento do carvão pirolítico da poda de Jatobá.

Temperatura de pirólise	Recipiente vazio (g)	Massa inicial do material (g)	Massa inicial do conjunto (g)	Massa do carvão produzido (g)	Rendimento do carvão (%)
550 °C	189.13	55.56	244.69	21.84	39.31%
650 °C	189.40	47.40	236.80	15.16	31.98%

Fonte: Autoria própria (2023).

Comparando os resultados dos rendimentos obtidos para o carvão ativado dessa pesquisa com outros autores; para biomassas assemelháveis e temperaturas próximas, nota-se os bons valores alcançados durante metodologia aplicada no vigente estudo. A Tabela 7 demonstra a comparação do rendimento com outros autores.

Tabela 7 - Comparação do rendimento do carvão ativado pirolítico com outros autores.

Temperatura °C	Rendimento do carvão			
	Carvão pirolítico dessa pesquisa (poda de Jatobá)	Outros autores		
		Poda de Bambu (<i>Bambusa Vulgari</i>) ^a	Madeira de Eucalipto (<i>Eucalyptus grandis</i>) ^b	Casca de Buriti (<i>Mauritia Flexuosa</i>) ^c
400-450	-	-	37.00%	30.29%
500-550	39.31%	-	-	-
600-650	31.98%	31.00%	-	-

Fonte: Autoria própria (2023). (a) Silva, 2019; (b) Félix et. al. (2017); (c) Esquerdo (2019).

Com os resultados obtidos, em uma situação hipotética, para 1 tonelada da biomassa utilizada nessa pesquisa, seria possível produzir aproximadamente 400 kg de carvão ativado na realização de pirólise a 550 °C. Para a temperatura de 650 °C, 1 tonelada deste material seria capaz de produzir aproximadamente 320 kg de carvão ativado após a degradação térmica deste resíduo.

De acordo com Machado (2019), no ano de 2018, a concessionária responsável pelo abastecimento de água e tratamento de esgoto sanitário em Palmas – TO utilizou mais de 4700 kg de carvão durante o tratamento de água nos meses mais secos de julho a outubro a remoção de cianobactérias.

Naquele período, o custo médio do carvão utilizado no tratamento era de R\$3,89/kg. Considerando a crescente demanda industrial global para sistemas de tratamento de água, faz-se necessário a busca por biomassas com rendimentos consideráveis de carvão e que possua carvão ativado capazes de suprir a necessidade, pensando também no fator custo-benefício.

7.3. Caracterização do carvão ativado da Poda de Jatobá

7.3.1. Análise imediata

Realizado o processo de pirólise no reator de leito fixo do LARSEN, são apresentados os teores de umidade, material volátil, cinzas e carbono fixo para o carvão obtido da poda de jatobá. A biomassa foi degradada em duas temperaturas distintas: 550 e 650 °C, com uma taxa de aquecimento de 30 °C/ min durante 30 minutos. As propriedades e características obtidas na análise imediata para um carvão ativado variam de cada biomassa e os mecanismos adotados no processo de pirólise, além de ser dependente da análise imediata realizada para a biomassa degradada (EVANS et al., 2016). Seguindo o padrão adotado, o carvão foi pesado em 6 cadinhos (3 para cada temperatura de pirólise), em diferentes situações de tempo e temperatura de secagem na estufa, conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Dados de pesagem do carvão pirolítico produzido nas temperaturas de 550 e 650 °C.

DADOS DE PESAGEM DO CARVÃO				
	Amostra	Peso do cadinho (Po) + amostra (g)	Po + amostra (g) a 710 °C	Po + amostra (g) a 850 °C
Carvão a 550 °C	M4	34.53	33.82	34.29
	M5	34.30	33.56	34.05
	M6	36.59	35.79	36.34
Carvão a 650 °C	M7	34.42	33.55	34.21
	M8	33.50	32.67	33.28
	M9	35.45	34.63	35.21

Fonte: Autoria própria (2023).

O carvão ativado resultante do processo de pirólise dessa pesquisa apresentou teor de umidade médio abaixo de 4%, representando e evidenciando a alta temperatura e exposição da biomassa junto à sua perda de água.

O teor de cinzas do carvão correspondeu a uma média de 19,13% – para o carvão pirolisado a 650 °C – apresentando um valor aceitável considerando que altos

valores podem apontar baixa capacidade calorífica e combustão ineficiente (CHENG et. al. 2018).

O carvão da poda de jatobá desta pesquisa apresentou 20,59% de material volátil. De acordo com Vieira (2018) quando a pirólise é realizada em baixas temperaturas, o teor de material volátil é maior e o carbono fixo é menor. Quando comparado ao material volátil apresentado pela biomassa *in natura*, nota-se uma evidente redução dos compostos químicos e orgânicos causados pelo processo de degradação térmica.

A porcentagem de teor fixo do carvão pirolítico está associada à fração que permanece inalterada durante o processo de aquecimento. Os resultados do teste de carbono fixo para a biomassa do jatobá e dos carvões obtidos nas duas temperaturas mencionados foram calculados utilizando a Equação 4, descrita no item 6.2.4., que incorporou os outros três fatores mencionados anteriormente. A Tabela 9 mostra os valores encontrados para análise imediata do carvão produzido a partir da pirólise da poda de jatobá.

Tabela 9 - Dados obtidos para análise imediata do carvão produzido a partir da pirólise da poda de jatobá.

ANÁLISE IMEDIATA DO CARVÃO				
Amostra	Teor de umidade (%)	Teor de cinzas (%)	Material volátil (%)	Carbono fixo (%)
Carvão a 550 °C	M4	4.08	27.89	45.27
	M5	4.18	27.10	45.69
	M6	4.41	28.81	45.79
Carvão a 650 °C	M7	3.44	19.20	58.22
	M8	3.55	19.09	57.39
	M9	3.62	19.10	54.62
MÉDIA	550 °C	4.22%	27.93%	45.58%
	650 °C	3.54%	19.13%	56.74%

Fonte: Autoria própria (2023).

A partir da análise dos resultados obtidos para análise imediata do carvão pirolítico dessa pesquisa, nota-se a aproximação dos valores característicos quando comparado ao carvão de biomassas distintas, com médias percentuais dentro do padrão e com resultados desejáveis.

A Tabela 10 enfatiza os valores médios encontrados para o carvão resultante da pirólise a 650 °C e faz a comparação com outros produtos do mesmo processo de degradação térmica.

Tabela 10 - Comparação dos resultados da análise imediata do carvão com outros autores.

Variável Analítica	Carvão pirolítico dessa pesquisa (650 °C)	Outros autores		
		Casca do fruto do baru ^d	Casca da árvore de Jatobá ^d	Caroço de pequi ^d
Teor de umidade (%)	3.54%	-	-	-
Teor de cinzas (%)	19.13%	1.30%	4.52%	6.47%
Material Volátil (%)	20.59%	20.26%	20.47%	28.41%
Carbono Fixo (%)	56.74%	64.26%	66.11%	67.58%

Fonte: Autoria própria (2023). (d) Miranda, 2017.

É importante ressaltar que, apesar da aproximação e objetivos próximos, o processo de pirólise das biomassas comparadas na Tabela 10 não seguiram obrigatoriamente a mesma temperatura, tempo e taxa de aquecimento dessa pesquisa.

7.3.2. Teste de adsorção

A Tabela 11 apresenta os resultados e parâmetros de concentração residual do corante azul de metileno, bem como a massa, absorbância e capacidades de adsorção do carvão produzido a 650 °C.

Tabela 11 - Resultados de adsorção do carvão produzido a 650 °C.

Amostra	Massa de carvão (g)	Concentração do azul de metileno (mg/ L)	Absorbância	Capacidade de adsorção (mg/g)
1	0.50	20.00	0.13	1.19
2	1.00	20.00	0.01	0.60
3	0.50	100.00	0.07	6.00
4	1.00	100.00	0.06	3.00
5	0.50	60.00	0.03	3.60
6	1.00	60.00	0.16	1.80
7	0.75	20.00	0.03	0.80
8	0.75	100.00	0.02	4.00
9	0.75	60.00	0.06	2.40
10	0.75	60.00	0.09	2.40
11	0.75	60.00	0.05	2.40

Fonte: Autoria própria (2023).

7.3.2.1. Razão de adsorção

Na Tabela 12, são apresentadas todas as variáveis e fatores explicativos presentes no modelo amostral do ensaio de adsorção relacionado à razão de adsorção. Esses dados foram obtidos através da utilização do software Protimiza, que efetua a análise dos dados inseridos, convertendo-os em um modelo abrangente e produzindo uma equação de regressão linear.

Tabela 12 - Variáveis da equação de regressão linear gerada pelo Protimiza.

Nome	Coeficiente	Erro Padrão	t Calculado	p-valor
Média	2.40	0.05	45.19	0.0000
X_1	-0.90	0.04	-21.29	0.0000
X_1^2	0.30	0.06	4.59	0.0059
X_2	1.73	0.04	41.07	0.0000
X_2^2	0.00	0.06	0.01	0.9923
$X_1.X_2$	-0.60	0.05	-11.63	0.0001

Fonte: Autoria própria (2023).

A partir desses valores, o software gerou a Equação 6; que representa a regressão linear do modelo.

$$Y = 2,40 - 0,90 X_1 + 0,30 X_1^2 + 1,73 X_2 + 0 X_2^2 - 0,60 X_1 X_2$$

Equação 6

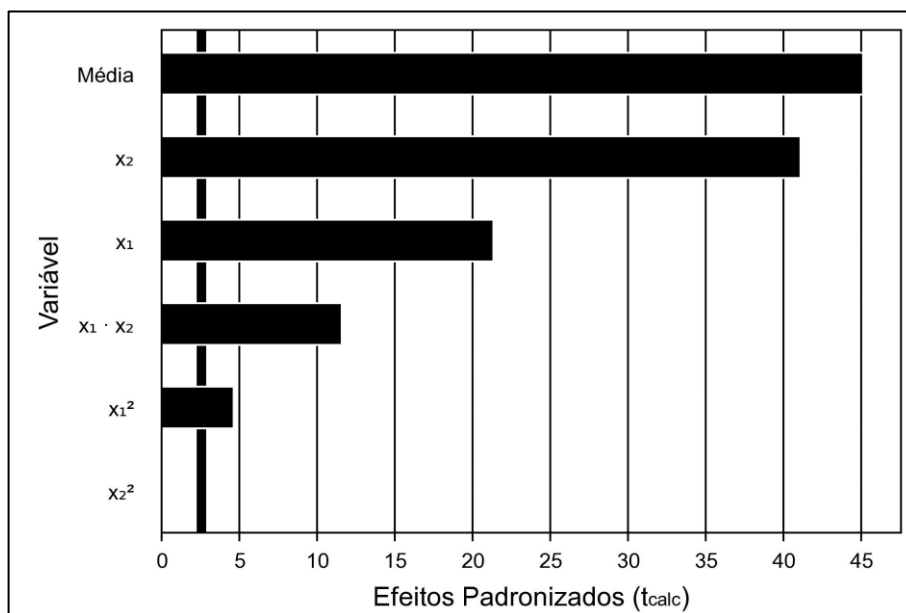
Onde:

X_1 = Massa do carvão (g);

X_2 = Concentração de corante (mg/L).

O software Protimiza também gerou um gráfico de Pareto, que demonstra o grau de influência de cada variável na razão de adsorção do carvão ativado, conforme Gráfico 1.

Gráfico 1 - Influência de cada variável sobre a razão de adsorção.

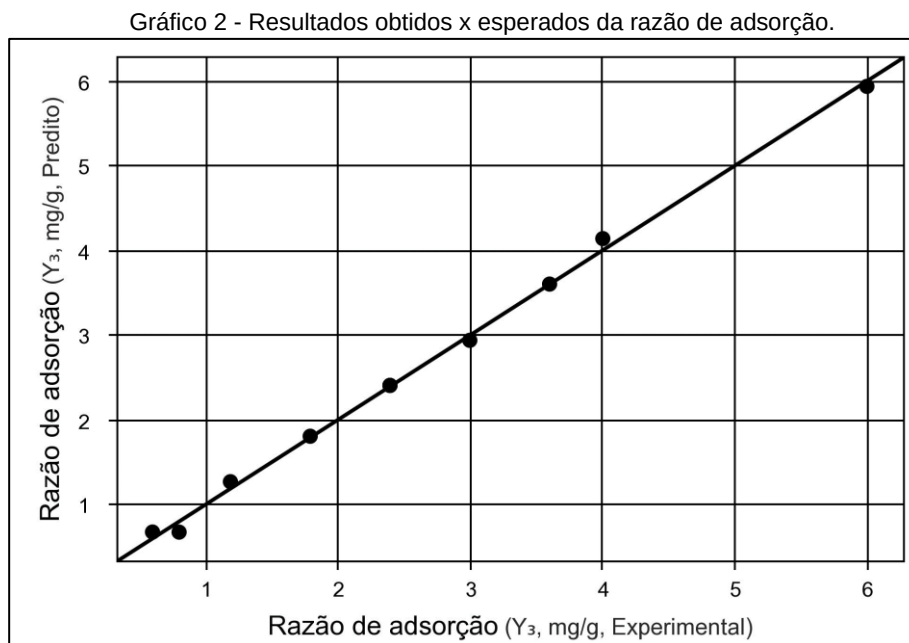


Fonte: Autoria própria (2023).

Observando o gráfico, nota-se que a quantidade de carvão é o fator de maior impacto na capacidade de adsorção, e paralelamente, a concentração do corante azul de metileno também exerce considerável influência.

Há, ainda, o gráfico de predição gerado (Gráfico 2), apresentando a comparação entre os resultados experimentais e as previsões estabelecidas. Ao analisar o gráfico, percebe-se que os resultados estão próximos da linha de predição, indicando a confiabilidade do modelo amostral e descartando a possibilidade de dados questionáveis e suspeitos.

A partir desse pressuposto, mantém-se o indicativo de bons resultados de adsorção apresentados pelo carvão produzido a partir da biomassa de poda de Jatobá.



Fonte: Autoria própria (2023).

Ademais, a Tabela 13 demonstra os resultados do teste da análise de variância (ANOVA) para a razão da adsorção do carvão ativado. Essa tabela tem a finalidade de demonstrar se o modelo é estatisticamente significativo.

Tabela 13 - Resultado da razão de adsorção das amostras por ANOVA.

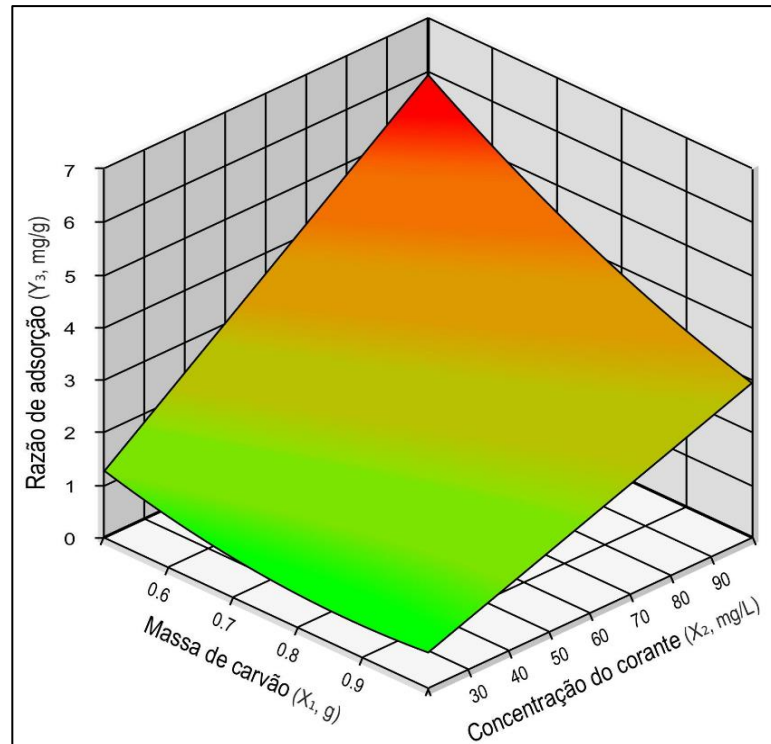
Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcalc	p-valor
Regressão	24.60	5	4.90	459.50	0.00000
Resíduos	0.10	5	0.00		
Falta de ajuste	0.10	3	0.00	35215.80	0.00003
Erro Puro	0.00	2	0.00		
Total	24.60	10	0.00		

Fonte: Autoria própria (2023).

A partir do teste ANOVA da Tabela 13, o software Protimiza Experimental Design, indicou o resultado do R^2 para a capacidade de adsorção do carvão pirolítico dessa pesquisa, que foi de 99,78%.

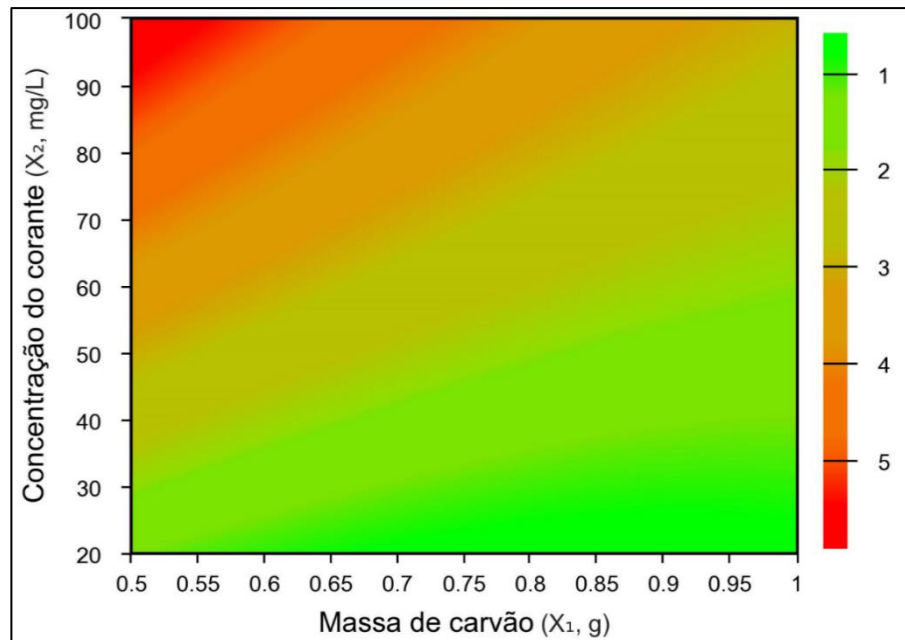
Os Gráficos 3 e 4 apresentam a ligação observada experimentalmente entre a quantidade de carvão, a concentração do corante e a razão de adsorção encontrada.

Gráfico 3 - Capacidade de adsorção do carvão em relação a concentração de corante e massa de carvão.



Fonte: Autoria própria (2023).

Gráfico 4 - Relação da massa de carvão com a concentração de corante azul de metileno.



Fonte: Autoria própria (2023).

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao analisar os resultados percentuais e médias percentuais das amostras de biomassa *in natura* submetidas a testes e caracterizações, nota-se que os valores para teor de umidade, material volátil, teor de cinzas e teor de carbono fixo estão dentro da faixa encontrada em fontes bibliográficas relacionadas, as quais descreviam a caracterização de materiais residuais degradados termicamente.

Quanto ao processo de conversão da biomassa em carvão, observou-se uma influência negativa no rendimento do carvão com o aumento da temperatura. Houve uma redução de cerca de 8% com uma diferença de 100°C, indicando que temperaturas mais elevadas durante a degradação térmica resultam em maior diminuição do material. Além da mudança no rendimento, notou-se também que o carvão derivado dessa biomassa apresentou redução na umidade, no teor de cinzas e no material volátil. Em contrapartida, o teor de carbono fixo apresentou aumento quando a biomassa foi submetida a uma temperatura elevada – explicada pelo comportamento e caracterização prévia do material utilizado, além das características e condições gerais do processo de pirólise sujeito.

No contexto da adsorção, evidenciou-se que o carvão produzido nessa pesquisa a partir da poda de jatobá representa uma alternativa promissora para aplicações industriais e comerciais. Sua capacidade de adsorção é fortemente afetada pela massa do carvão e pela concentração do corante azul de metileno, sendo mais adsorvente quando a massa de carvão é menor e a concentração do corante é maior. A conclusão deste trabalho de curso destaca a significativa importância dos resultados obtidos na pesquisa realizada, que se concentrou em questões fundamentais relacionadas ao meio ambiente, sociedade e indústria.

Os bons resultados alcançados neste estudo não apenas validam a abordagem adotada, mas também destacam a eficácia das estratégias e práticas propostas. Reiterando a alta e considerável produção de resíduos orgânicos produzidos a partir de poda de árvores na região do Cerrado, aliada ao baixo custo da obtenção de carvão ativado a partir da pirólise desses materiais, tais resultados podem ser vistos não só como conquistas acadêmicas, mas também como ferramentas tangíveis para impulsionar mudanças positivas no meio ambiente e cultura de reaproveitamento global.

REFERÊNCIAS

- LIMA et. al. **Aproveitamento Poda de Arborização Urbana para Produção de Carvões Ativado**. Encontro Nacional de Educação, Ciência e Tecnologia/ UEPB. Programa de Pós Graduação Engenharia Urbana e Ambiental. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.
- VALE, A. T.; SARMENTO, T. R.; ALMEIDA, A.N. **Caracterização e uso de madeiras de galhos de arvores provenientes da arborização de Brasília, DF**. Ciência Florestal, v. 15, n. 4, p. 411-420, 2005.
- MARTINS, Carlos Humberto. **O aproveitamento de madeiras das podas da arborização viária de Maringá/PR**. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável. Mossoró, RN, 2013.
- PINHEIRO, Renato Torres; MARCELINO, Dianes Gomes; MOURA, Dieyson Rodrigues. **Composição e diversidade arbórea nas quadras urbanizadas de Palmas, Tocantins**. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 30, n. 2, p. 565-582.
- LÔBO, Ranyere do Nascimento. **Degradação térmica de podas de árvores visando a obtenção de carvão para utilização como leito filtrante no tratamento de águas cinzas**. Instituto Federal do Tocantins (IFTO). Palmas – TO, 2019.
- WIECHETECK, M. **Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos, Sumário Executivo, Projeto PNUD BRA 00/20 - Apoio às políticas públicas na área de Gestão e controle ambiental**, Ministério Do Meio Ambiente, Curitiba, 2009.
- ASTM D 3173-87. **Standard Method for Determination of Moisture Content in Biomass, Society of Testing Materials International**. West Conshohocken. 2003.
- ASTM D 3174-04. **Standard method for ash in the analysis sample of coal and coke**. West Conshohocken, 2004.
- SANTOS, Mayer Andrade. **Avaliação do potencial de utilização dos resíduos da poda e corte de arbóreos e gramíneas (massa verde) na geração de energia térmica**. Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis. Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

CARVALHO, Paulo Ernani Ramalho. **ESPÉCIES ARBÓREAS BRASILEIRAS: Jatobá (*Hymenaea courbaril* var. *stilbocarpa*.)**. EMBRAPA, 2003.

ASTM D 3175-07. **Standard method for volatile matter in the analysis sample of coal**. West Conshohocken, 2007.

EVANGELISTA, Wescley Viana; COSTA, Everton Dondoni. **Propriedades físicas das madeiras de jatobá (*Hymenaea* sp.) E ipê (*Tabebuia* sp.) visando produção de pisos**. Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. Universidade do Estado do Mato Grosso, 2017.

BRITO, Mateus Rodrigues. **Avaliação do potencial econômico e social de resíduo do cerrado brasileiro como uso de adsorvente para remoção de poluentes**. Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente. Universidade Federal do Tocantins (UFT). Palmas-TO. 2021.

CHAVES, A. M. B., *et al.* **Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp.** Graduação de Engenharia Ambiental. Universidade de Brasília (UNB). Brasília. Brasil. 2013.

INCE, N. H.; APIKYAN, I. G. **Combination of activated carbon adsorption with light-enhanced chemical oxidation via hydrogen peroxide**. Water Research, v. 34, n. 17, p. 4169-4176, 2000.

NEVES, D.; THUNMAN, H.; MATOS, A. TARELHO, L.; GÓMEZ-BAREA, A. **Caracterização e Previsão de Produtos de Pirólise de Biomassa**. Prog. Energy Combust. Sci., 37 (2011), pp. 611-630.

HODGES, Jeremy; LEATHERBY, Lauren. **These Are The World's Greenest Cities**. Bloomerang, 2018.

SCHNEIDER, Jaderson Kleveston. **Utilização de biomassas brasileiras para produção de carvão ativado de alta qualidade: caracterização e aplicação como adsorvente**. Porto Alegre, 2018. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2018.

UDDIN, M. N.; TECHATO, K.; TAWEEKUN, J.; RAHMAN, M. M.; RASUL, M. G.; MAHLIA, T. M. I.; ASHRAFUR, S. M. **An Overview of Recent Developments in Biomass Pyrolysis Technologies**. Energies 2018, 11, 3115.

VELMURUGAN, V. **Review of Research and Development on Pyrolysis Process.** Materials Today: Proceedings. 2021.

JOHNSON, Cory. **Advances in Pretreatment and Clarification Technologies.** Science Direct. CH2M HILL, INC., Fort Lauderdale, FL, USA, 2013.

AHMAD, Asif; AZAM, Tauseef. **Water Purification Technologies.** Science Direct. Department of Food Technology, PMAS-Arid Agriculture University Rawalpindi, Rawalpindi, Pakistan, 2019.

NILLE, Omkar. et. al. **Valorization of tea waste for multifaceted applications: a step toward green and sustainable development.** Fluorescence Spectroscopy Research Laboratory, Department of Chemistry, Shivaji University, Kolhapur, Kolhapur, India, 2021.

DUTRA, Danrley Kristyam Rosa. **Obtenção de carvão ativado a partir do resíduo de casca do eucalipto branco.** Universidade do Vale do Taquari – Univates. Lajeado – RS, 2021.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos: Instrumento de Responsabilidade Socioambiental.** Distrito Federal, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br>. Acesso em: 10 ago. 2023.

ABREU, Nathália. **Você sabe o que é a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e como ela impacta diretamente na reciclagem?.** Autossustentável. Disponível em: <<https://autossustentavel.com/2018/11/politica-nacional-de-residuos-solidos-pnrs-e-reciclagem.+html>>.

FILHO, Artur Tôrres. **Aplicação do processo de pirólise para valoração, cogeração de energia e tratamento de resíduos.** Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

HEMPE, Tais Cristina. **Benefícios do uso da compostagem doméstica como destinação ambientalmente adequada dos resíduos orgânicos na área urbana de Seberi – RS.** Universidade Federal de Santa Maria, 2020.

LAHR, Francisco Antonio Rocco et. al. **Avaliação de propriedades físicas e mecânicas de madeiras de jatobá (*Hymenaea stilbocarpa* Hayne) com diferentes**

teores de umidade e extraídas de regiões distintas. Revista Árvore, Viçosa-MG, v.40, n.1, p.147-154, 2016.

KAMINSKY, Walter. **Chemical recycling of plastics by fluidized bed pyrolysis.** University of Hamburg, Institute of Technical and Macromolecular Chemistry, Bundesstraße 45, Hamburg D-20146, Germany, 2021.

OLIVEIRA, Mara L. et. al. **Pirólise de Resíduos Poliméricos Gerados por Atividades Offshore.** Universidade Estadual do Rio de Janeiro. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 19, nº 4, p. 297-304, 2009.

MOHAN, Dinesh; PITTMAN, Charles U; STEELE, Philip H. **Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review.** Energy & Fuels, v. 20, p. 848 – 889, 2006.

UDDIN, M. N.; TECHATO, K.; TAWEEKUN, J.; RAHMAN, M. M.; RASUL, M. G.; MAHLIA, T. M. I.; ASHRAFUR, S. M. **An Overview of Recent Developments in Biomass Pyrolysis Technologies.** Energies 2018, 11, 3115.

JENKINS, B.M. *et al.* Combustion Properties of Biomass. **Fuel Processing Thecnology.** Vol 54, p. 17-46, 1998.

VALE, A. T. do. *et al.* **Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e da torta de pinhão manso (Jatropha curcas).** CERNE, Lavras, v. 17, n. 2, p. 267-273, abr./jun. 2011.

KLAUTAU, J. V. P. **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo cocorrente para secagem de grãos.** Curitiba: UFPR, 2008. 192 p. Dissertação- Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal do Paraná, 2008.

MIRANDA, M. R. B. **Investigação da pirólise de biomassas do cerrado para aplicação à sistemas de gaseificação estagiada.** Brasília, DF. Programa de pós-graduação em ciências mecânicas da Universidade Federal de Brasília, 2017.