



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

CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL

SAMUEL DE ALMEIDA

**UTILIZAÇÃO DE PODAS DE ÁRVORES NA FABRICAÇÃO DE CARVÃO
ATIVADO**

PALMAS-TO

2024



SAMUEL DE ALMEIDA

UTILIZAÇÃO DE PODAS DE ÁRVORES NA FABRICAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO

Projeto de Pesquisa desenvolvido no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO) como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel no Curso Superior de Engenheiro Civil do Instituto Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Aluno: Samuel de Almeida.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza.

PALMAS-TO

2024

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

A447u Almeida, Samuel de
UTILIZAÇÃO DE PODAS DE ÁRVORES NA FABRICAÇÃO DE
CARVÃO ATIVADO / Samuel de Almeida. – PALMAS, TO, 2024.
38 p. : il. color.

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

Orientador: Me. Marcelo Mendes Pedroza

1. Resíduos. 2. Pirólise. 3. Carvão. 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

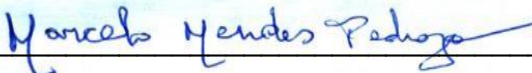
SAMUEL DE ALMEIDA

UTILIZAÇÃO DE PODAS DE ÁRVORES NA FABRICAÇÃO 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: 24/06/2024.

BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza.
Orientador



Prof. Dra. Elaine da Cunha Silva Paz



Documento assinado digitalmente
CAMILA RIBEIRO RODRIGUES
Data: 02/07/2024 18:12:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Camila Ribeiro Rodrigues

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Antônia Beatriz Silva Almeida, que sem ela nada disso teria sido possível.

Ao Doutor Marcelo Mendes Pedroza, por ter aceitado ser meu orientador neste trabalho.

À todos os professores do curso de Engenharia civil, pelos ensinamentos e conselhos durante toda a graduação.

Aos meus amigos que ao longo desses anos me ajudaram de diversas formas possíveis.

RESUMO

O carvão ativado é um material bastante utilizado em várias aplicações industriais, ambientais e até mesmo na saúde, suas características o fazem extremamente útil em tratamentos de águas. Com isso, se torna cada vez mais a procura de matérias-primas para sua produção. O Brasil é um grande produtor de resíduos e cada vez mais urge a necessidade de uma destinação final adequada para os mesmos. O objetivo deste trabalho é utilizar o resíduo da poda da tangerina como matéria-prima para produção de carvão ativado para ser testado como adsorvente de corante químico. A poda de tangerina foi ressecada em estufa e caracterizada por meio de ensaios, onde obteve 5% no teor de umidade, 14,8% de teor de carbono fixo, 1,5% de teor de cinzas e 78,7% de teor de material volátil. Após caracterização, a poda foi pirolisada por meio de reator de leito fixo nas temperaturas de 550°C e 650°C, com uma taxa de aquecimento de 30°C/min. O rendimento de carvão obtido foi de 28,08% e 24,8% respectivamente. Após conseguido o carvão ativado, a caracterização do carvão ativado foi igualmente feita como na amostra inicial, obtendo 3,5% no teor de umidade, 71,1% de teor de carbono fixo, 8,5% de teor de cinzas e 16,9% de teor de material volátil para o carvão de 650°C. O teste de adsorção foi feito em uma mesa de agitação com o carvão ativado produzido nesta pesquisa obtido na temperatura de 650°C e taxa de aquecimento igual a 30 °C/min, na forma de pó. Foi utilizado um corante azul metileno e o carvão apresentou uma boa capacidade de adsorção, sendo a maior razão de adsorção 7,45mg/g, obtido utilizando 0,40 g de massa de carvão e corante com concentração de 100mg/L. Com esses resultados, a biomassa utilizada é adequada para produção de carvão ativado através do processo de pirólise e o carvão obtido possui um alto poder de adsorção.

Palavras-chave: Biomassa, Tangerina, Pirólise, Carvão Ativado, Adsorvente.

ABSTRACT

Activated carbon is a material widely used in various industrial, environmental, and even health applications, its characteristics make it extremely useful in water treatment. This leads to an increasing demand for raw materials for its production. Brazil is a large producer of waste, and the need for adequate final disposal of such waste is increasingly urgent. The aim of this work is to use tangerine pruning residue as a raw material for the production of activated carbon to be tested as an adsorbent for chemical dye. The tangerine pruning was dried in an oven and characterized through tests, obtaining 5% moisture content, 14.8% fixed carbon content, 1.5% ash content, and 78.7% volatile matter content. After characterization, the pruning was pyrolyzed in a fixed bed reactor at temperatures of 550°C and 650°C, with a heating rate of 30°C/min. The yield of obtained charcoal was 28.08% and 24.8%, respectively. After obtaining the activated carbon, its characterization was performed similarly to the initial sample, obtaining 3.5% moisture content, 71.1% fixed carbon content, 8.5% ash content, and 16.9% volatile matter content for the charcoal at 650°C. The adsorption test was conducted on a shaking table with the activated carbon produced in this research, obtained at a temperature of 650°C and a heating rate of 30°C/min, in powder form. Methylene blue dye was used, and the charcoal demonstrated good adsorption capacity, with the highest adsorption ratio being 7.45mg/g, obtained using 0.40 g of charcoal mass and dye with a concentration of 100mg/L. These results indicate that the biomass used is suitable for the production of activated carbon through the pyrolysis process, and the obtained charcoal possesses a high adsorption capacity.

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

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS, ACRÔNIMO, SIGLAS E SÍMBOLOS

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ASTM - Sociedade Americana de Testes e materiais

Cm - Centímetros

mL - Mililitro

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos
Especiais

kg - Quilograma

K - Kelvin

IFTO - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins

C - Celsius

Min - Minuto

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dosagem do carvão e concentração do corante.....	25
Tabela 2 - Comparação da análise imediata com outros autores.....	27
Tabela 3 - Dados de pesagem do carvão ativado produzido.....	27
Tabela 4 - Dados obtidos pela análise imediata.....	28
Tabela 5 - Comparação da análise imediata do carvão obtido com outros autores.....	28
Tabela 6 - Resultados de adsorção do carvão produzido a 650°C.....	29
Tabela 7 - Fatores e variáveis da equação de regressão linear.....	30
Tabela 8 - Tabela de razão de adsorção.....	32

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Atividades a serem realizadas durante a pesquisa.....	18
Figura 2 - Estufa utilizada para secagem.....	19
Figura 3 - Sistema de reator de leito fixo.....	21
Figura 4 - Inserção da poda no reator.....	21
Figura 5 - Autoclave.....	22
Figura 6 - Sistema de condensação da parte gasosa.....	22
Figura 7 - Escape da fração gasosa.....	23
Figura 8 - Shaker TE 141.....	24
Figura 9 - Espectrofotômetro.....	25
Figura 10 - Concentração de corante antes e depois da adsorção.....	30

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Variáveis mais significativas do modelo.....	31
Gráfico 2 - Valores esperados x valores obtidos para Eficiência de adsorção.....	32
Gráfico 3 - Capacidade de adsorção do carvão em relação à concentração do corante e massa de carvão.....	33
Gráfico 4 - Relação da concentração do corante e a massa de carvão.....	33

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA.....	12
1.2. JUSTIFICATIVA.....	13
1.3. OBJETIVOS.....	13
1.3.1. OBJETIVO GERAL	13
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1. CITRUS RETICULATA	13
2.1.1. CULTIVO DE CITRUS RETICULATA.....	14
2.1.2. PODA DE CITRUS	15
2.2. PRODUÇÃO DE TANGERINA NO TOCANTINS E NO BRASIL	15
2.3. BIOMASSA PARA CARVÃO ATIVADO.....	15
2.4. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO	16
2.5. USO DO CARVÃO ATIVADO NO TRATAMENTO DE ÁGUA.....	16
2.6. EXPERIMENTOS COM PIRÓLISE.....	17
2.6.1. PIRÓLISE EM CASCAS DE TANGERINA.....	17
3. MATERIAS E MÉTODOS.....	17
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA	18
3.1.1. UMIDADE.....	19
3.1.2. TEOR DE CINZAS	19
3.1.3. MATERIAL VOLÁTIL.....	20
3.1.4. TEOR DE CARBONO FIXO	20
3.2. PIRÓLISE DE MATERIAL	20
3.3. CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO.....	23
3.3.1. UMIDADE.....	23
3.3.2. TEOR DE CINZAS	23
3.3.3. MATERIAL VOLÁTIL.....	23
3.3.4. TEOR DE CARBONO FIXO	24
3.4. ENSAIO DE ADSORÇÃO	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA	26
4.1.1. ANÁLISE IMEDIATA DA PODA DE TANGERINA	26
4.2. RENDIMENTOS DE CARVÃO NOS ENSAIOS DE PIRÓLISE	27
4.3. CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO	28
4.3.1. ANÁLISE IMEDIATA DO CARVÃO OBTIDO	28
4.4. TESTE DE ADSORÇÃO	29
4.4.1. RAZÃO DE ADSORÇÃO	30
5. CONCLUSÃO.....	33
6. REFERÊNCIAS	35

1. INTRODUÇÃO

O carvão ativado é um material muito utilizado com uma grande variedade de aplicações industriais, ambientais e até mesmo de saúde. Sua capacidade de absorver impurezas o torna bastante útil em processos de tratamentos de água, usado geralmente para remover compostos orgânicos naturais, de sabor e odor e produtos químicos. Tudo isso por conta da sua enorme área superficial específica e a reatividade superficial específica (Deng et al., 2011).

Sabendo disso, há cada vez mais procura por fontes de matéria-prima para a sua produção. Uma prática interessante seria a utilização de resíduos para produção de carvão ativado, uma vez que o Brasil é um grande produtor de resíduos, produzindo aproximadamente 82 milhões de toneladas de resíduos sólidos em 2022 segundo a ABRELPE (2022). Partindo desse dado, pode-se inferir que a reutilização desses restos seria uma prática sustentável e um excelente destino final.

Em conjunto, o Brasil é um país que possui uma grande produção agropecuária, estando dentre elas a tangerina. Para garantir qualidade e quantidade desejada deste fruto, uma poda de qualidade é necessária, garantindo sua rentabilidade e sustentabilidade a longo prazo. E, como resultado, muitos resíduos são produzidos e necessitam de um destino final adequado.

Por meio da utilização da pirólise, é possível utilizar as sobras da poda como matéria-prima para produção de carvão ativado. Sabendo disso, esse estudo visa estudar a eficácia do carvão ativado obtido através da utilização dos resíduos da poda de tangerina para o tratamento de águas.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

A quantidade de resíduos produzidos pelas indústrias têm cada vez mais sendo um problema por todo o Brasil. O Brasil é um grande produtor de árvores frutíferas e como consequência, a geração de resíduos por conta das podas realizadas nas árvores também é grande, sendo assim, necessário um local adequado para seu descarte. Sabendo disso, a utilização do resíduo da poda para produzir carvão ativado é uma alternativa de descarte adequado. O carvão ativado pode ser utilizado para muitas finalidades, entre elas o tratamento de água. Com isso, qual é a eficácia da

utilização dos resíduos produzidos da poda da *Citrus reticulata* para o tratamento de águas?

1.2. JUSTIFICATIVA

O Brasil é um dos grandes produtores de tangerinas do mundo, sabendo disso, a manutenção dessas árvores inclui a poda, gerando assim grandes quantidades de resíduos orgânicos descartados, sendo necessário dar um fim a esse material. Sabendo disso, será estudado as características do carvão ativado obtido por meio da pirólise desse material, com objetivo da sua utilização para tratamento de água.

Além disso, durante a busca na literatura disponível em bibliotecas virtuais, não foram encontrados documentos referentes à temática de pirólise em podas, apenas na casca de tangerina, podendo este trabalho ser o pontapé inicial para mais pesquisas na área.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GERAL

Degradar termicamente a poda de tangerina para a produção de carvão ativado com a aplicação como adsorvente.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

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

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CITRUS RETICULATA

A família Rutaceae consiste aproximadamente de 150 gêneros e 1.600 espécies, distribuídas amplamente em regiões tropicais, subtropicais e temperadas do mundo (Oliveira e Alves, 2020). Tem como gênero mais importante da família o *Citrus*, pequenas árvores perenifólias, cultivadas em grande número em todas as regiões mais quentes. Entre elas estão *C. sinensis* (laranja), *C. maxima* (pomelo), *C. paradisi* (toranja), *C. limon* (limão), *C. medica* (cidreira) e *C. reticulata* (bergamota) (Bresinsky et al., 2012).

A Tangerineira ou bergamoteira (*Citrus reticulata*) é uma árvore de origem no nordeste da Ásia e no sudoeste da China, sendo cultivada desde antes de Cristo (Silva e Landau, 2020). Foi trazida ao Brasil desde os tempos coloniais, introduzida provavelmente no estado da Bahia (Rosseto et al, 2014). A árvore é do clima tropical úmido e tropical, possui tamanho médio podendo atingir alturas de até 4 metros. É composta por espinhos e uma folhagem densa, dando flores de coloração branca. Os frutos têm formato arredondado com uma casca fina que é de fácil retirada (Rosseto et al, 2014).

São árvores com importância econômica e potencial farmacêutico, madeireiro e ornamental (Oliveira e Alves, 2020). A principal forma de utilização da fruta é *in natura*, fresca ou em suco (Silva e Landau, 2020), ocasionando aumento de resíduos dos citros (cascas e sementes) que são frequentemente descartados, causando problemas de contaminação ambiental por apresentarem maior probabilidade de serem degradados por microrganismos (Oliveira e Alves, 2020).

2.1.1. CULTIVO DE CITRUS RETICULATA

A principal espécie a ser cultivada em solo brasileiro é a Ponkan, exibindo outras cultivares a África do Sul, Clementina, Clementina Caçula, Clemenville, Cravo, Dancy, Estância, Madre Tereza, Mineira, Ponkan Swatow, Ponkan Variegada, Szinkon, Trepadeira e Vermelha (Lorenzini et al., 2006 apud Silva e Landau, 2020).

Há plantio por meio de enxertia ou pela semente da tangerina. Apesar da possibilidade de multiplicação via sementes, não é uma alternativa viável para comercialização, pois as plantas demoram de 6 a 8 anos para produzir os primeiros frutos. O cultivo via porta-enxerto exhibe melhora direta na produtividade, qualidade do fruto, coloração da casca, conservação pós-colheita, tolerância a insetos e pragas e absorção de conversão dos nutrientes (Silva e Landau, 2020).

2.1.2. PODA DE CITRUS

O termo “poda” refere-se ao ato de retirar parte de plantas, árvores ou arbustos, feita por meio do corte de ramos ou de outras partes inúteis (HIDRAUTECSP, 2020).

Em um ambiente natural não é necessário poda (Rosseto et al, 2014). No entanto, em cidades e para a agricultura, tem a intenção de controlar o tamanho da árvore, facilitando a realização de atividades mecanizadas e a construção de imóveis pelo homem, além de favorecer a entrada de luminosidade e maior aeração, podendo promover frutos de maior qualidade (HIDRAUTECSP, 2020).

Durante esse procedimento, é necessário bastante cuidado, pois se mal feita não haverá cicatrização adequada, gerando assim uma porta para fungos, cupins e outros organismos que podem acabar levando a doenças e causando sua morte.

2.2. PRODUÇÃO DE TANGERINA NO TOCANTINS E NO BRASIL

De acordo com o IBGE (2022), em 2017 o Brasil produziu cerca de 1.086.616 toneladas de tangerina, com uma área de 56.357 hectares e um rendimento médio de 19.281 Kg por hectare. A partir disso, pode-se demonstrar o Brasil como um grande produtor de tangerina e a sua importância na agricultura brasileira, sendo uma das maiores produções de lavouras permanentes. Os principais estados produtores incluem São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Paraná, sendo o estado de São Paulo o maior produtor atualmente, com uma colheita de 369.034 mil toneladas e um valor de produção de 541.536 mil reais. Isso se dá ao fato de que as condições climáticas são adequadas e a melhor infraestrutura agrícola para o cultivo de tangerinas.

No Tocantins, apesar de não ser um grande produtor, com apenas 160 toneladas produzidas no ano de 2022 e um valor de produção de 434 mil reais, o seu cultivo vem crescendo, tendo dobrado o número de hectares produzidos de 6 hectares em 2021 para 12 hectares em 2022. O maior produtor no estado é Araguatins, do norte do estado, com um valor de produção de 300 mil reais.

2.3. BIOMASSA PARA CARVÃO ATIVADO

A biomassa é definida como toda matéria orgânica, seja de origem vegetal ou animal, inclusive de materiais naturais ou artificiais. Podemos então falar que o seu conceito é basicamente toda matéria viva que existiu em algum momento na terra. A biomassa energética é todo material que é biomassa e pode ser utilizado de alguma maneira para propósitos energéticos (Perez et. al, 2004).

As características do carvão ativado produzido vai depender de vários fatores, como do precursor e do método utilizado para sua produção. A composição química do material afeta de alguma forma a porosidade do carvão produzido (Nabais et al., 2013).

2.4. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO

O carvão ativado é feito em duas etapas, sendo a primeira a pirólise e a segunda a sua ativação. O desempenho vai depender das suas características químicas e sua porosidade. O processamento do carvão ativado, embora afete o produto final, o principal fator que determina as características é o material do precursor (Claudino et al., 2023).

A carbonização é feita a partir da pirólise do material a uma temperatura maior que 473 K, onde são removidos gases leves e componentes voláteis, fazendo uma massa de carbono fixo e uma estrutura porosa inicial. Os critérios para determinar a qualidade são a taxa de aquecimento, temperatura final, fluxo de gás e a natureza do precursor (Claudino et al., 2023).

O processo de ativação ocorre após a pirólise, através de métodos físicos, químicos ou em combinação, onde o material carbonizado é submetido a reações secundárias, aumentando a área superficial e também sua porosidade. No processo de ativação é onde vai ser realizado o controle básico das características básicas do material de acordo com a aplicação desejada (Claudino et al., 2023).

2.5. USO DO CARVÃO ATIVADO NO TRATAMENTO DE ÁGUA

O carvão ativado é um material muito empregado no tratamento de águas, sendo geralmente utilizado para remover compostos orgânicos naturais, compostos de sabor e dor e produtos químicos. O carvão ativado possui uma ótima capacidade

de adsorção e uma rápida taxa de remoção, graças a sua enorme área superficial específica e a reatividade superficial específica (Deng et al., 2011).

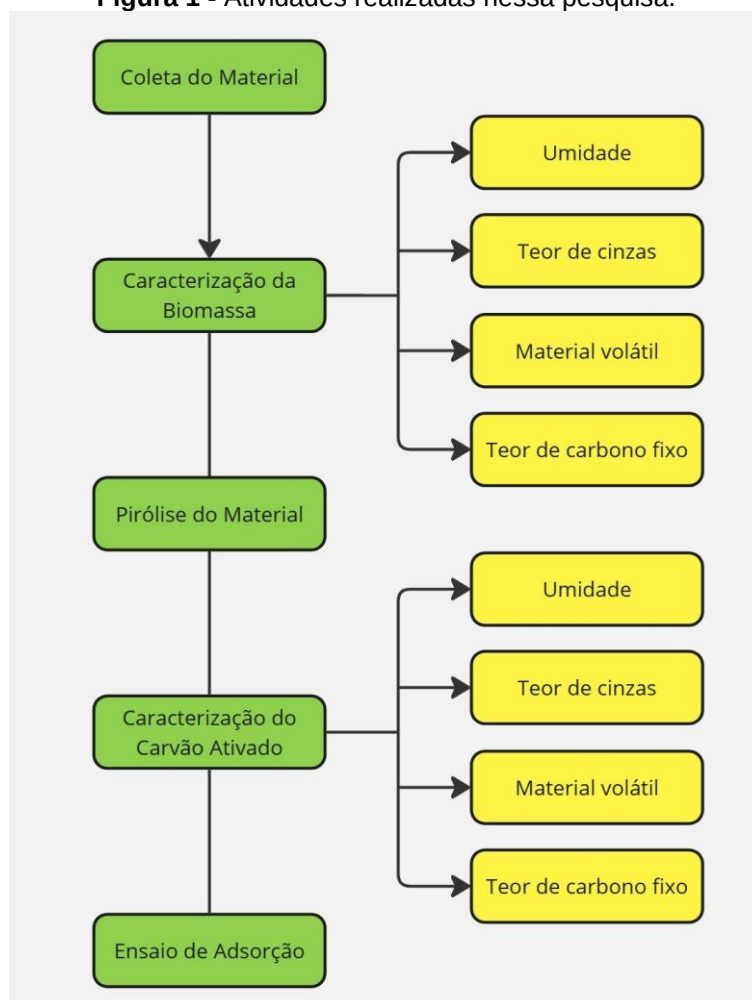
2.6. EXPERIMENTOS COM PIRÓLISE

2.6.1. PIRÓLISE EM CASCAS DE TANGERINA

Marques (2020) realizou a ativação e a carbonização de cascas de tangerina com intuito de avaliar a eficácia do carvão ativado para remoção de níquel no meio aquoso. Na ativação, foi utilizado o processo de carbonização hidrotérmica utilizando o agente FeCl_3 como ativador em três concentrações (0,5, 1,0 e 2,5M). As amostras foram determinadas como: TW-C (cascas pirolisadas sem HTC), TWFe-0,5-C / TW-Fe-1,0-C / TW-Fe-2,5-C (HTC e cascas pirolisadas) e TW-Fe -2,5 (cascas com HTC sem pirólise). Como resultado, demonstrou-se que o carvão TW-C teve o melhor desempenho, removendo 99% no níquel em pH 9. Com isso, foi concluído que o carvão ativado produzido com a utilização de casca de tangerina como matéria prima pode ser eficaz na remoção do níquel em meio aquoso.

3. MATERIAS E MÉTODOS

As atividades que foram feitas nesta pesquisa foram realizadas no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) do IFTO, campus Palmas. A Figura 1 a seguir mostra um pequeno esquema de como foram desenvolvidas, desde a coleta do material até o ensaio de adsorção.

Figura 1 - Atividades realizadas nessa pesquisa.

Fonte: Autor, 2024.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

O material coletado foi analisado para se conseguir os dados relacionados a umidade, teor de cinzas, material volátil e teor de carbono fixo. A amostra obtida foi seca por uma estufa (Figura 2) a 60°C e depois foi dado continuidade às etapas seguintes.

Figura 2 - Estufa utilizada para secagem.



Fonte: Autor, 2024.

3.1.1. UMIDADE

O teor de umidade foi determinado de acordo com a norma ASTM D 3173-85. O material foi pesado juntamente com um cadinho de porcelana com peso pré-definido, e em seguida, aquecido em uma estufa a 105°C pelo período de 1 hora. Após esse tempo, o cadinho foi inserido em um dessecador por 15 minutos e pesado. Com isso, foi utilizado a Equação 1 para obter o teor de umidade.

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

A= Peso do cadinho vazio + peso da amostra

B= Peso do cadinho + peso da amostra pós-aquecimento da estufa

C= peso da amostra

3.1.2. TEOR DE CINZAS

Para cálculo do teor de cinzas, foi utilizado o método sugerido por Sanchez et al., (2009), onde uma massa em triplicata é adicionada a cadinhos de porcelana com peso constante pré-definidos. Então, a amostra foi “queimada” a uma temperatura de aproximadamente 710 °C durante 60 minutos em um forno mufla da marca EDG Equipamentos, modelo W-One. Após esse processo, os cadinhos foram colocados em um dessecador por 1 hora para esfriar e em seguida pesados.

Após a pesagem, o teor de cinza foi calculado de acordo com a Equação 2.

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

A= peso do cadinho

B= Peso do cadinho vazio

C= peso da amostra

3.1.3. MATERIAL VOLÁTIL

Usando o método sugerido por Sanchez et al., (2009), a determinação do material volátil foi obtida em triplicata usando amostra em cadinho de porcelana com peso constante pré-definido. A amostra foi aquecida em forno mufla a uma temperatura de 850° C , sem oxigênio por 7 minutos. Com isso, o material volátil foi calculado de acordo com a Equação 3.

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

A= Peso do cadinho + peso da amostra

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

C= peso da amostra

3.1.4. TEOR DE CARBONO FIXO

Na determinação do teor de carbono fixo foi usada a Equação 4.

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

3.2. PIRÓLISE DE MATERIAL

A pirólise foi realizada em um reator de leito fixo tubular de inox (Figura 3), com 100 cm de comprimento e diâmetro externo de 10 cm. Esse reator foi aquecido por um forno bipartido reclinável, operado a bateladas e sendo aplicado vapor de água com o gás de arraste. A poda foi inserida no reator (Figura 4) após passar por estufa a uma temperatura de 60 °C.

Figura 3 – Sistema com reator de leito fixo.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 4 – Inserção da poda no reator.



Fonte: Autor, 2024

Depois de passar na estufa, foi colocada no tubo de quartzo. O vapor que é produzido pela Autoclave (Figura 5) passou por todo o tubo que levou os gases obtidos

pela pirólise para fora do leito. A extremidade da saída possui um sistema de condensação (Figura 6) onde uma porção dos vapores gerados pela reação foram transformados em líquido.

Figura 5 – Autoclave.



Fonte: Autor, 2024

Figura 6 – Sistema de condensação da parte gasosa.



Fonte: Autor, 2024

Na extremidade da saída também há um escape para a vazão da fração gasosa durante o processo de pirólise, conforme Figura 7.

Figura 7 – Escape da fração gasosa



Fonte: Autor, 2024

Durante o processo de pirólise, foi utilizada uma faixa de temperatura de aproximadamente 360 a 650° C e uma taxa de aquecimento que varia de 13 a 27 °C por min⁻¹. O intervalo de tempo dos experimentos foi de 30 minutos.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO

A caracterização do carvão ativado obtido por meio da pirólise do material ocorreu de maneira parecida em relação à realização da caracterização da biomassa.

3.3.1. UMIDADE

O teor de umidade foi determinado utilizando o mesmo método realizado em 3.1.1, de acordo com a norma ASTM D 3173-85.

3.3.2. TEOR DE CINZAS

O teor de umidade foi determinado utilizando o mesmo método realizado em 3.1.2, de acordo com o método sugerido por Sanchez et al. (2009).

3.3.3. MATERIAL VOLÁTIL

A porcentagem do material volátil foi determinada utilizando o mesmo método realizado em 3.1.3, de acordo com o método sugerido por Sanchez et al. (2009)

3.3.4. TEOR DE CARBONO FIXO

O teor de carbono fixo foi determinado utilizando a mesma fórmula utilizada no 3.1.4.

3.4. ENSAIO DE ADSORÇÃO

O ensaio de adsorção foi realizado em uma mesa de agitação (Shaker TE 141) com o carvão ativado fabricado na temperatura de 650° C e taxa de aquecimento de 30 °C/min, conforme Figura 8. O ensaio foi realizado no LARSEN-IFTO/Campus Palmas.

Figura 8 - Shaker TE 141.



Fonte: Autor, 2024.

O fluido utilizado foi um corante azul de metileno em várias concentrações, todas com o volume padrão de 30 mL de solução nos testes. Após o ensaio, as amostras foram filtradas por filtros de papel e depois analisadas por meio de um espectrofotômetro (Figura 9). Esse equipamento verificou os níveis de concentração do corante azul de metileno nas amostras após a filtragem.

Figura 9 – Espectrofotômetro.



Fonte: Autor, 2024

No teste foi aplicado um planejamento experimental do tipo Delineamento de Composto Central Rotacional (DCCR), verificando assim o efeito da massa de carvão e da concentração do fluido do corante no teste de adsorção.

Foram feitos 11 ensaios com diferentes concentrações de corante e quantidades de carvão para a obtenção da adsorção do produto. A Tabela 1 mostra as massas de carvão adotadas e a quantidade de corante utilizada em cada amostra.

Tabela 1 - Dosagem do carvão e concentração do corante.

Amostras	Massa de carvão (g)	Concentração do corante (mg/L)
1	0,40	20
2	1,00	20
3	0,40	100
4	1,00	100
5	0,40	60
6	1,00	60
7	0,70	20
8	0,70	100
9	0,70	60
10	0,70	60
11	0,70	60

Fonte: Autor, 2024

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa etapa do trabalho serão apresentados os resultados obtidos durante as etapas da pesquisa, a saber: (a) caracterização da biomassa, (b) ensaios de pirólise e (c) caracterização do carvão ativado e (d) ensaio de adsorção.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

4.1.1. ANÁLISE IMEDIATA DA PODA DE TANGERINA

Para a realizar a análise imediata da poda de tangerina, foram realizados os procedimentos anteriormente indicados no capítulo 3.2 desta pesquisa.

O teor de umidade, segundo Vale et. al. (2011), é um fator determinante para saber se a utilização do material é ou não viável como fonte de energia sustentável, pois a partir dele a combustão do material irá variar, podendo também prejudicar no estoque da biomassa. Almeida (2008) determinou que biomassas com valores abaixo de 10% de teor de umidade são apropriadas para transformação em processos termoquímicos. O teor de umidade obtido da poda de tangerina foi de 5%, portanto, a biomassa é adequada para a combustão e processos como pirólise.

O teor de cinzas é tido como o percentual de compostos inorgânicos encontrados na biomassa, como cálcio, ferro, fósforo, magnésio e sódio. De acordo com McKendry (2002), a energia disponível no combustível é reduzida em proporção à quantidade do teor de cinzas, ou seja, se o teor de cinzas for alto, a produção de energia da biomassa é baixa. Durante a produção de carvão a partir da poda de tangerina, o teor de cinzas obtido foi de 1,5%.

O teor de material volátil é a porcentagem dos materiais que se volatizam em temperaturas de 850°C, sendo diretamente proporcional à reatividade da biomassa. O valor obtido para a poda de tangerina foi de 78,7%.

O teor de carbono fixo está diretamente ligado ao teor de cinzas e o material volátil, sendo o produto restante após a liberação dos materiais voláteis sem a umidade e as cinzas. A partir da pirólise, obteve-se teor da poda de tangerina de 14,8%.

A partir dos resultados obtidos, pode-se comparar os dados apresentados com os de outros pesquisadores com materiais parecidos, demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Comparação da análise imediata com outros autores.

Variável analítica	Biomassa desta pesquisa	Outros autores	
		Vissotto et al. (2012)	Farias (2012)
Umidade (%)	5,0	8,62 ± 0,58	5,23 ± 0,23
Material volátil (%)	78,7	88,69 ± 0,66	84,12 ± 0,64
Cinzas (%)	1,5	0,38 ± 0,66	0,53 ± 0,02
Carbono fixo (%)	14,8	9,93 ± 0,69	15,35

Fonte: Autor (2024), adaptado de Vissotto et al (2012) e Farias (2012).

Comparando os dados, é possível inferir que as contagens obtidas para a análise imediata da biomassa da poda de tangerina exibem produtos parecidos às contagens levantadas por outros pesquisadores.

4.2. RENDIMENTOS DE CARVÃO NOS ENSAIOS DE PIRÓLISE

O rendimento do carvão da poda de tangerina após a degradação térmica realizada nas temperaturas de 550°C e 650°C foi de respectivamente 28,08% e 24,8%. Com isso, comprovou-se que o rendimento do carvão é inversamente proporcional à temperatura adotada no ensaio de pirólise.

A Tabela 3 demonstra o rendimento do carvão nas duas temperaturas de pirólise realizadas.

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	162,89	74,47	237,36	20,91	28,08
650°C	166,4	70,30	236,70	17,40	24,80

Tabela 3 - Dados de pesagem do carvão ativado produzido.
Fonte: Autor, 2024.

Com isso, podemos concluir que para cada uma tonelada de resíduo produzido é possível produzir aproximadamente 280 kg de carvão ativado utilizando a pirólise a 550°C. Usando a pirólise de 650°C, é possível produzir com uma tonelada aproximadamente 250 kg de carvão ativado.

4.3. CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO

4.3.1. ANÁLISE IMEDIATA DO CARVÃO OBTIDO

A análise imediata do carvão obtido foi realizada da mesma forma que a da biomassa. Na Tabela 4 estão apresentados os dados da biomassa e do carvão ativado para efeito de comparação.

Tabela 4 - Dados obtidos pela análise imediata.

Variável analítica	Biomassa	Carvão 1 (550°C)	Carvão 2 (650°C)
Umidade (%)	5,0	3,1	3,5
Material volátil (%)	78,7	27,7	16,9
Cinzas (%)	1,5	7,1	8,5
Carbono fixo (%)	14,8	62,1	71,1

Fonte: Autor, 2024.

Percebe que a umidade teve uma diminuição de 38% para o carvão 1 e de 30% para o carvão 2, redução essa prevista por conta das altas temperaturas a que a amostra foi submetida. Também podemos notar uma diminuição de 64,8% no carvão 1 e de 78,53% no carvão 2 em relação ao material volátil. As cinzas tiveram um aumento de 373,33% e 466,67% e o carbono fixo de 319,59% e de 380,41% para os carvões 1 e 2 respectivamente.

A Tabela 5 faz uma comparação com os dados obtidos da análise imediata do carvão produzido por essa pesquisa e a de outros autores pelo mesmo processo de pirólise.

Tabela 5 - Comparação da análise imediata do carvão obtido com outros autores.

Variável analítica	Carvão 1 (550 °C)	Carvão 2 (650 °C)	Outros autores	
			Barbosa (2023)	Martins, et al. (2007)
Umidade (%)	3,10	3,50	3,62	4,4
Material volátil (%)	27,70	16,90	16,74	26,00
Cinzas (%)	7,10	8,50	8,38	0,6
Carbono fixo (%)	62,10	71,10	74,88	73,4

Fonte: Autor, 2024.

Como podemos observar, os dados obtidos desta pesquisa de pirólise a 650°C foram próximos aos obtidos por outros autores, porém, o processo de pirólise das biomassas utilizadas não adotaram as mesmas temperaturas, taxa de aquecimento e tempo utilizados nesta pesquisa.

4.4. TESTE DE ADSORÇÃO

A Tabela 6 mostra os resultados e os parâmetros utilizados de concentração residual do corante azul de metileno, e também a massa e a capacidade de absorção do carvão produzido a 650°C.

Tabela 6 - Resultados de adsorção do carvão produzido a 650 °C.

Amostra	Massa do Carvão (g)	Concentração do Corante (mg/L)	Razão de adsorção (mg/g)
1	0,40	20	1,44
2	1,00	20	0,58
3	0,40	100	7,45
4	1,00	100	2,99
5	0,40	60	4,44
6	1,00	60	1,76
7	0,70	20	0,82
8	0,70	100	4,27
9	0,70	60	2,52
10	0,70	60	2,54
11	0,70	60	2,54

Fonte: Autor, 2024.

A Figura 10 mostra o corante com concentração de 60mg/L antes e depois do ensaio de adsorção com a utilização de 0,70g de massa de carvão.

Figura 10 – Concentração de corante antes e depois da adsorção.



Fonte: Autor, 2024

4.4.1. RAZÃO DE ADSORÇÃO

Na Tabela 7 são apresentados os fatores e variáveis presentes no modelo do ensaio de adsorção, obtidos através do software Primotiza, que analisa os dados e produz uma equação de regressão linear.

Tabela 7 - Fatores e variáveis da equação de regressão linear.

Fatores	Coefficiente de Regressão	Erro Padrão	t-calculado	p-valor
Média	2,53	0,10	25,03	0,0000
X_1	-1,33	0,08	-16,57	0,0000
X_1^2	0,57	0,12	4,58	0,0060
X_2	1,98	0,08	24,58	0,0000
X_2^2	0,01	0,12	0,10	0,9258
$X_1 - X_2$	-0,90	0,10	-9,14	0,0003

Fonte: Autor, 2024.

Utilizando esses valores, foi construída uma equação que descreve a regressão linear do modelo:

$$Y = 2,53 - 1,33x_1 + 0,57x_1^2 + 1,98x_2 + 0,01x_2^2 - 0,90x_1x_2$$

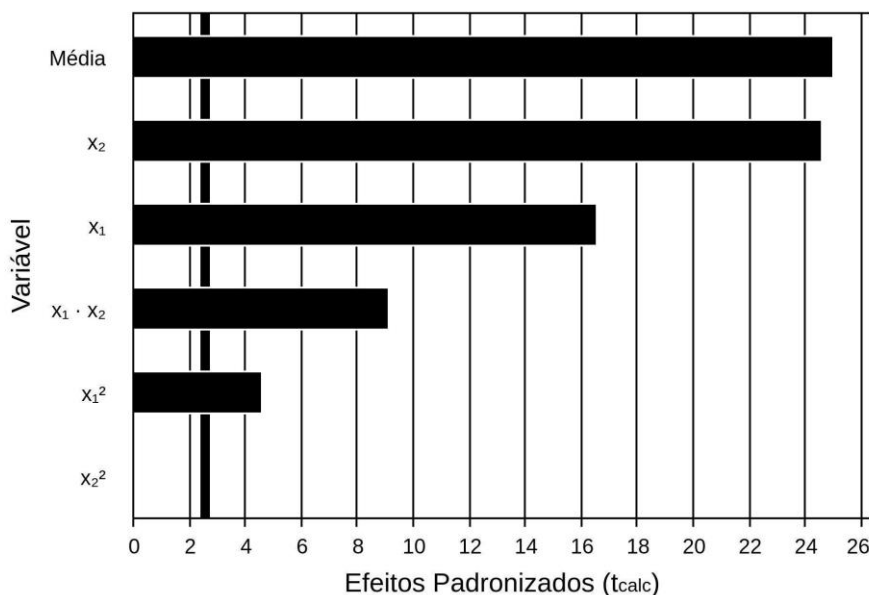
Onde:

x_1 = Massa de carvão (g);

x_2 = Concentração de corante (mg/L).

Esse mesmo software gera também um gráfico de Pareto, que mostra as variáveis mais significativas do modelo para a razão de adsorção do carvão ativado obtido, demonstrado no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Variáveis mais significativas do modelo.

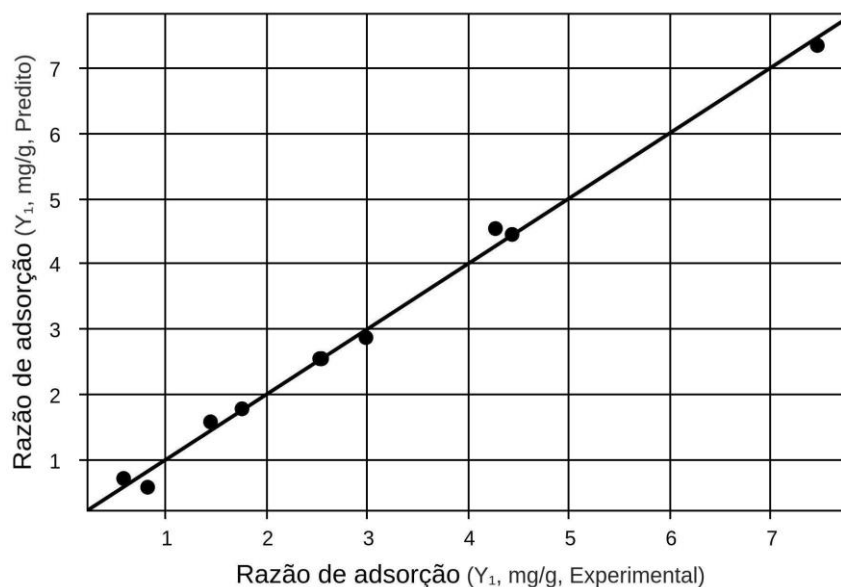


Fonte: Autor, 2024

Levando em consideração o gráfico, a concentração de corante é o fator de maior impacto na capacidade de adsorção, seguido da concentração do corante que também tem alta influência.

Outros gráficos obtidos foram o de resultado esperado e os valores obtidos na pesquisa (Gráfico 2). É possível observar que os resultados obtidos estão bem próximos à linha dos valores esperados, mostrando que os dados são confiáveis e que também indicam que os resultados de adsorção obtidos com o carvão produzido a partir da biomassa de poda de tangerina são satisfatórios.

Gráfico 2 - Valores esperados x valores obtidos para Eficiência de adsorção.



Fonte: Autor, 2024.

A Tabela 8 demonstra a análise de variância (ANOVA) da razão de adsorção do carvão ativado produzido. Esta tabela demonstra se o modelo é estatisticamente significativo.

Tabela 8 - Tabela de razão de adsorção.

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado Médio	F calculado	P valor
Regressão	38,3	5	7,7	196,9	0,00001
Resíduos	0,2	5	0,0		
Falta de ajuste	0,2	3	0,1	450,8	0,00221
Erro puro	0,0	2	0,0		
Total	38,5	10			

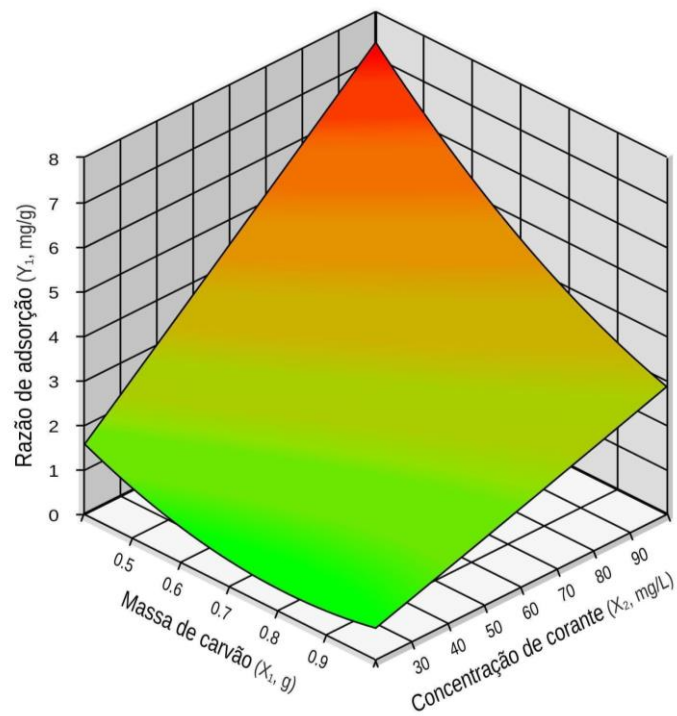
$R^2 = 99,49\%$

Fonte: Autor, 2024.

O software Protimiza, apoiado pelo teste da ANOVA, calculou o R^2 , que mostra que a equação é confiável para explicar o modelo, exibindo 99,49%.

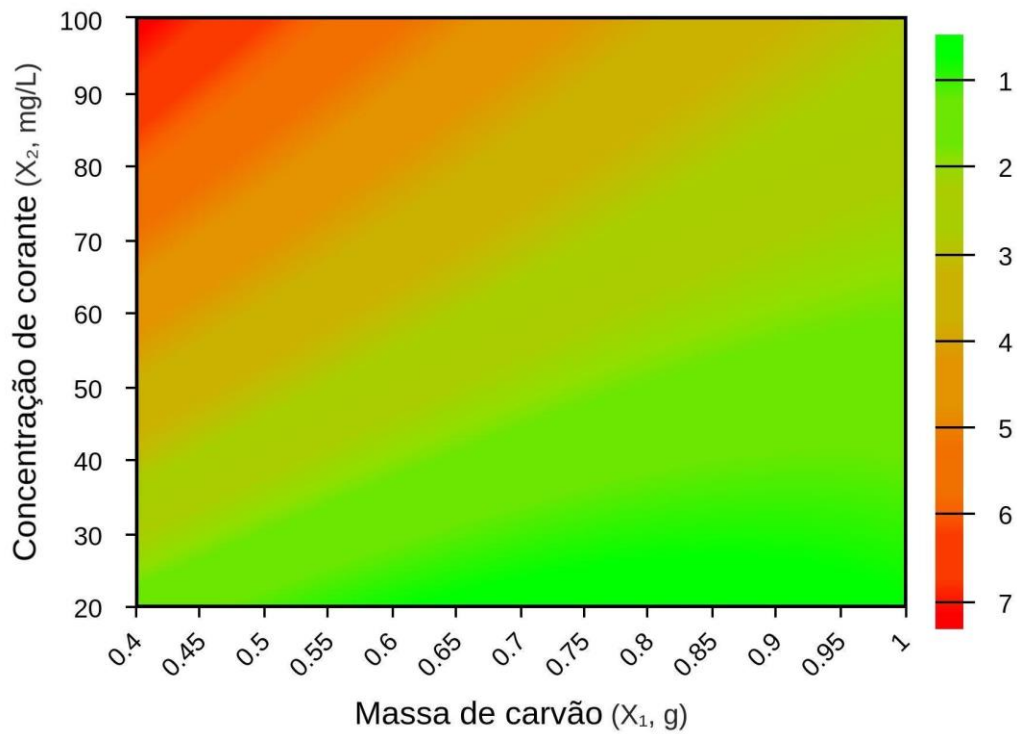
Os gráficos a seguir mostram a ligação entre a quantidade de carvão utilizada (Gráfico 3) e a concentração do corante e a razão da adsorção obtida (Gráfico 4). A partir deles, conclui-se que quanto maior a quantidade de carvão utilizada, menor a concentração de corante.

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



Fonte: Autor, 2024.

Gráfico 4 - Relação da concentração do corante e a massa de carvão.



Fonte: Autor, 2024

5. CONCLUSÃO

A partir dos dados obtidos por esta pesquisa, pode-se retirar as seguintes conclusões:

A poda de tangerina analisada apresentou um baixo teor de cinzas (1,5%) e um alto teor volátil (78,7%), demonstrando que este material é útil para a pirólise. Em relação ao processo de pirólise, notou-se que quanto maior a temperatura, menor o rendimento do carvão ativado produzido. No processo realizado a 550°C o rendimento do carvão foi de 28,08% enquanto no realizado a 650°C o rendimento foi de 24,80%, ou seja, uma redução de cerca de 4% com uma diferença de 100°C. Além disso, o carvão ativado produzido pela poda de tangerina também teve uma redução no material volátil e na umidade, porém, houve um aumento no teor de cinzas e no carbono fixo. Esses dados são explicados por conta dos processos realizados no processo de pirólise.

Ao analisarmos os resultados obtidos pelo ensaio de adsorção do corante azul metileno utilizando o carvão ativado produzido pela poda de tangerina, percebemos que esse carvão é uma boa alternativa para aplicações com intuito de tratamento de águas. A capacidade de adsorção é bastante influenciada pela quantidade de carvão e também da concentração de corante, tendo o melhor resultado de adsorção quando a massa de carvão foi menor e a concentração de corante maior.

Podemos concluir que os resultados obtidos nesta pesquisa são satisfatórios e que a utilização da poda de tangerina como matéria prima é uma opção viável para produção de carvão ativado, tendo em vista o seu alto poder de adsorção.

6. REFERÊNCIAS

- ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil (2022)**. ABRELPE: Brasil, 2022
- BARBOSA, B. S. Caracterização de biochar de resíduos de laranjeira e seu efeito no crescimento inicial de ipê- roxo. Orientador: Jonnys Paz Castro. 2023. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Capitão Poço, 2023. Disponível em : <http://bdta.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/3483>. Acesso em: junho, 2024.
- BRESINSKY, A. et al. **Tratado de botânica de Strasburger**. 36. ed. Porto Alegre: Artmed, 2012. ISBN 978-85-363-2720-4.
- CLAUDINO, A. et al. Preparação de carvão ativado a partir de turfa e sua utilização na remoção de poluentes. Florianópolis, SC: **Universidade Federal de Santa Catarina, Tese de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química**, 2003.
- DENG, H.; et. al. Adsorption of methylene blue on adsorbent materials produced from cotton stalk. **Chemical Engineering Journal**, v. 172, p. 326– 334, 2011.
- FARIAS, F. O. M. Caracterização de biomassas brasileiras para fins de aproveitamento energético. Campinas, SP: **Universidade Estadual de Campinas, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Química**, 2012.
- HIDRAUTECSP. Poda de Citros: como funciona, época do ano, ângulo da poda. **HidrauTecSP**, 5 de Agosto de 2020. Disponível em: <https://blog.hidrautec.ind.br/2020/08/05/poda-de-citros/>. Acesso em: 16 de março, 2024.
- MARQUES, V. C. Valorization of tangerine peels in the preparation of adsorbents for removal of Ni(II) from aqueous solutions. Bragança, Portugal: **Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Tese de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança**, 2020.
- MARTINS, A. F. et al. Caracterização dos produtos líquidos e do carvão da pirólise de serragem de eucalipto. **Química Nova**, v. 30, n. 4, p. 873–878, ago. 2007.
- NABAIS, J. V. et al. Surface and porous characterisation of activated carbons made from a novel biomass precursor, the esparto grass. **Applied Surface Science**, v. 265, p. 919-924, 2013.

OLIVEIRA, A. C. S. D.; ALVES, C. C. F. Caracterização química e atividades biológicas do óleo essencial da casca da fruta citrus reticulata. Rio Verde, GO: **Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Tese de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Agroquímica**, 2020.

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

ROSSETO, V. et al. A Bergamoteira. **UNIPAMPA - Universidade Federal do Pampa**. 2014. Disponível em: <https://sites.unipampa.edu.br/programaarborizacao/bergamoteira/>. Acesso em 10 de março de 2024.

SILVA, G.A.; LANDAU, E. C. Evolução da produção de tangerina (Citrus reticulata, Rutaceae). In: LANDAU, E. C. et al. **Dinâmica da produção agropecuária e da paisagem natural no Brasil nas últimas décadas: produtos de origem vegetal**. Brasília, DF: Embrapa, v. 2, cap. 39, p. 1273-1300, 2020.

VISSOTTO, J. P. et al. Caracterização de Pinus, Eucaliptus, casca de Eucaliptus e resíduos florestais e de destoca para fins energéticos. In: **VII CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**. São Luís. Maranhão. 2012.