



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

CAMPUS PALMAS

CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL

GABRIEL AIRES OLIVEIRA CAMPOS

**DEGRADAÇÃO TÉRMICA DA CASCA DO LIMÃO VISANDO PRODUÇÃO DE
CARVÃO ATIVADO E SUA APLICAÇÃO COMO ADSORVENTE DE CORANTE
QUÍMICO**

PALMAS

2024

GABRIEL AIRES OLIVEIRA CAMPOS

**DEGRADAÇÃO TÉRMICA DA CASCA DO LIMÃO VISANDO PRODUÇÃO DE
CARVÃO ATIVADO E SUA APLICAÇÃO COMO ADSORVENTE DE CORANTE
QUÍMICO**

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

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

PALMAS

2024

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

C198d Campos, Gabriel Aires Oliveira
Degradação térmica da casca do limão visando produção de
carvão ativado e sua aplicação como adsorvente de corante químico /
Gabriel Aires Oliveira Campos. – PALMAS, TO, 2024.
37 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, 2024.

Orientador: Dr. Marcelo Pedroza

1. Casca do limão. 2. Pirólise. 3. Adsorção. I. Pedroza, Marcelo.
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

GABRIEL AIRES OLIVEIRA CAMPOS

DEGRADAÇÃO TÉRMICA DA CASCA DO LIMÃO VISANDO PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO E SUA APLICAÇÃO COMO ADSORVENTE DE CORANTE QUÍMICO

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: 27 /06 /2024.

BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador (IFTO)



Prof. Msc Evanuzia Miranda da Silva (IFTO)



Eng. Msc. Ranyere Nascimento Lobo (IFTO)

RESUMO

Com a crescente do setor industrial e agrícola ao longo do tempo, houve um aumento significativo na produção de resíduos sólidos. Ademais, o Brasil no cenário atual é um dos maiores produtores de limão do mundo, exportando o produto para diversos países, e por haver essa grande escala de produção, as indústrias geram muitos subprodutos desse material que muitas vezes não tem sua destinação adequada. Com essa questão em vigência, se torna viável a produção de carvão ativado para atender os mais diversos setores industriais, com indústria de cerveja, setor farmacêutico, no tratamento de águas, dentre outros, promovendo dessa forma uma gestão de resíduos que transforma a matéria descartada em algo funcional e útil para o desenvolvimento das indústrias. A finalidade deste trabalho foi degradar a casca do limão por meio da pirólise térmica, a fim de obter carvão ativado. Logo, as amostras do produto da casca do limão foram levadas inicialmente para uma estufa, foi feito o processo de formação do briquete do mesmo material em uma prensa hidráulica para ser possível obter dados como a caracterização da umidade (4,5%), o teor de carbono fixo (14%), teor de cinzas (6,4%) e teor de material volátil (75,1%). Em sequência a esse passo, a casca do limão foi pirolisada por meio de um reator de leito fixo e produzido o carvão ativado em duas temperaturas finais diferentes, primeiramente em uma temperatura 650 °C durante 30 minutos, com uma taxa de aquecimento de 20 °C/min obtendo um rendimento de 25,6% e após a obtenção do carvão ativado, foi feita a caracterização nos mesmos aspectos da amostra inicial, com a umidade (5,3%), o teor de carbono fixo (63,9%), teor de cinzas (10,7%) e o teor de material volátil (20,1%). E em uma temperatura 550 °C com um rendimento de 28,86% com dados de umidade (5,0%), o teor de carbono fixo (57,6%), teor de cinzas (10,1%) e o teor de material volátil (27,3%). Com isso, foi feito o teste de adsorção em uma mesa de agitação com 11 experimentos para se verificar os efeitos de duas variáveis independentes (massa de carvão e concentração da solução do corante azul de metileno) utilizando o carvão ativado obtido com temperatura final de 650° na forma de pó, com granulometria de 0,45 mm. Dessa forma, foi obtido uma razão de adsorção máxima de 5,40mg/g com uma massa de carvão de 0,50g e concentração do corante químico azul de metileno com 100mg/L, notando-se assim, uma eficiência em adsorção do experimento.

Palavras-chave: Biomassa, Casca do limão, Pirólise, Carvão ativado, Adsorvente.

ABSTRACT

With the growth of the industrial and agricultural sector over time, there has been a significant increase in the production of solid waste. Furthermore, Brazil in the current scenario is one of the largest lemon producers in the world, exporting the product to several countries, and because there is this large scale of production, industries generate many by-products of this material that often do not have their proper destination. With this issue in force, the production of activated carbon becomes viable to serve the most diverse industrial sectors, such as the beer industry, pharmaceutical sector, water treatment, among others, thus promoting waste management that transforms discarded matter into something functional and useful for the development of industries. The purpose of this work was to degrade lemon peel through thermal pyrolysis, in order to obtain activated carbon. Therefore, the samples of the lemon peel product were initially taken to a greenhouse, the briquette formation process of the same material was carried out in a hydraulic press to be possible to obtain data such as the characterization of humidity (4.5%), the fixed carbon content (14%), ash content (6.4%) and volatile material content (75.1%). Following this step, the lemon peel was pyrolyzed using a fixed bed reactor and activated carbon was produced at two different final temperatures, first at a temperature of 650 °C for 30 minutes, with a heating rate of 20 °C/ min obtaining a yield of 25.6% and after obtaining the activated carbon, the characterization was carried out in the same aspects as the initial sample, with humidity (5.3%), fixed carbon content (63.9%), ash content (10.7%) and volatile material content (20.1%). And at a temperature of 550 °C with a yield of 28.86% with data on humidity (5.0%), fixed carbon content (57.6%), ash content (10.1%) and volatile material (27.3%). Therefore, the adsorption test was carried out on a shaking table with 11 experiments to verify the effects of two independent variables (charcoal mass and concentration of the methylene blue dye solution) using activated carbon obtained with a final temperature of 650° in powder form, with a particle size of 0.45 mm. In this way, a maximum adsorption rate of 5.40mg/g was obtained with a charcoal mass of 0.50g and a concentration of methylene blue chemical dye of 100mg/L, thus noting the adsorption efficiency of the experiment.

Keywords: Biomass, Lemon peel, Pyrolysis, Activated carbon, Adsorbent.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Índices de fatores e níveis empregados.	23
Tabela 2: Ordem dos experimentos no planejamento experimental.....	24
Tabela 3: Comparativos de dados em análises imediatas	26
Tabela 4: Comparativo de dados obtidos de carvão ativado.....	27
Tabela 5: Resultados obtidos no processo de adsorção dos experimentos.....	28
Tabela 6: Coeficientes de regressão para definição da razão de adsorção.	29
Tabela 7: Dados razão de adsorção ANOVA.	32

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Mercado do limão no Brasil.....	13
Gráfico 2: Diagrama de Pareto	30
Gráfico 3: Representação do modelo ideal de razão de adsorção com pontos experimentais do projeto da casca do limão.	31
Gráfico 4: Razão da adsorção representada em superfície tridimensional	32
Gráfico 5: Razão da adsorção do carvão representada em níveis	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Composição morfológica da casca de diferentes espécies de limões.	12
Figura 2: Processos realizado durante a pesquisa	15
Figura 3: Amostra do material seca depositada no liquidificador industrial.....	16
Figura 4: Briquete a partir da amostra seca triturada da casca do limão	16
Figura 5: Amostra sendo inserida no reator.....	19
Figura 6: Forno Autoclave	19
Figura 7: Reator de leito fixo e sistema de condensação.	20
Figura 8: Mesa de agitação.	21
Figura 9: Massa de carvão ativado em pó	21
Figura 10: Amostra sendo filtrada em papel analítico.	22
Figura 11: Espectrofotômetro.	22
Figura 12: Massas de carvão pesadas e prontas para teste.....	24
Figura 13: Antes e depois de Teste de adsorção.....	29

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS, ACÔNOMOS, SIGLAS E SIMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Águas Cinza
ANA	Agência Nacional de Águas
APHA	American Public Health Association
Art	Artigo
AWWA	American Water Works Association
COT	carbono orgânico total
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DCCR	Delineamento Composto Central Rotacional
DQO	Demanda Química de Oxigênio
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
FIESP	Federação das Indústrias do Estado de São Paulo
JMP	Programa Conjunto de Monitoramento
L	Litro
Mg	Miligrama
Min	Minuto
mL	Mililitro
NBR	Norma Brasileira
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PAC	Solução de Policloreto de Alumínio
pH	Potencial Hidrogeniônico
RPM	Rotação por Minuto
SÃO	Caixa de Separação Água – Óleo
SDT	Sólido Dissolvido Total
SINDUSCON-SP	Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo
SST	Sólido Suspenso Total
UNICEF	Fundo das Nações Unidas para a Infância
uT	Unidade de Turbidez
WEF	Water Environment Federation

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	11
1.2 JUSTIFICATIVA	11
1.3 OBJETIVOS	11
1.3.1 Objetivo Geral.....	11
1.3.2 Objetivos Específicos	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DO LIMÃO	12
2.2 BIOMASSA PARA CARVÃO ATIVADO	13
2.3 PRODUÇÃO DO LIMÃO NO BRASIL E NO MUNDO	13
2.4 DEGRADAÇÃO TERMOQUÍMICA.....	14
2.5 EXPERIMENTOS COM PIRÓLISE DA CASCA DO LIMÃO.....	14
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA.....	15
3.1.1 Umidade	17
3.1.2 Teor de cinzas	17
3.1.3 Material Volátil	18
3.1.4 Teor de carbono fixo.....	18
3.1.5 Densidade	18
3.2 PIRÓLISE DA CASCA DO LIMÃO	19
3.3 CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO OBTIDO	20
3.3.1 Densidade	20
3.3.2 Teor de cinzas	21
3.3.3 Umidade	21
3.3.4 Material volátil.....	21
3.3.5 Teor de carbono fixo.....	21
3.4 ENSAIO DE ADSORÇÃO.....	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	25
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA.....	25
4.1.1 Análise imediata da casca do limão.....	25

4.2 RENDIMENTO DO CARVÃO ATIVADO DA CASCO DO LIMÃO	26
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO	27
4.4 ENSAIO DE ADSORÇÃO	28
4.4.1 Razão de adsorção (Q)	29
5 CONCLUSÃO	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

1. INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial causou profundas transformações no mundo, e uma dessas transformações deu-se no processo produtivo e no estilo de vida dos trabalhadores, ela representou um marco na história da humanidade, transformando as relações sociais, as relações de trabalho, o sistema produtivo, e estabeleceu novos padrões de consumo e uso dos recursos naturais. As consequências foram muitas e estão relacionadas à cada fase vivida no processo evolutivo das tecnologias que proporcionou a industrialização dos países. (SILVA, Daniel; SOUSA, Rafaela, 2014).

Inicialmente, com o aumento da demanda do setor industrial por produtos e bens de consumo, ele teve que expandir sua capacidade produtiva, provocando assim um aumento de resíduos sólidos gerados no processo da produção. Na indústria de produção de suco de limão por exemplo, cerca de 40% a 50% da massa da fruta é utilizada, o restante vira resíduo industrial. O Brasil se destaca como o segundo maior produtor de frutos cítricos e o maior exportador de sucos cítricos, tendo o limão Tahiti como um dos seus frutos de maior relevância comercial. A produção brasileira de limão no período de 1992 a 1999 passou de pouco mais de 600 mil toneladas para mais de 700 mil toneladas em 46.554 ha, com incremento de 4,5 mil ha no período. O Estado de São Paulo é o primeiro produtor deste fruto, tendo participação em 81,3% da produção, seguido pelo Rio de Janeiro e Bahia, com 3,9% e 2,7%, respectivamente (TODA FRUTA, 2006). Com essas informações pode-se inferir que o país é responsável por uma grande produção de resíduos nessa área.

O consumo mundial de água tem passado por um aumento considerável desde 1960, chegando a 5200 km³ ao ano, e ainda assim, aproximadamente 1,1 bilhão de pessoas vive sem fácil acesso à água (PENA, 2022). O carvão ativado é um dos mais poderosos adsorventes do mundo, podendo aderir em sua superfície as moléculas insolúveis presentes em líquidos e gases, é considerado um dos meios mais eficientes no tratamento da água contaminada, tornando-a um líquido inodoro, incolor e insípido e pode ser fabricado a partir de diversos materiais, o que o torna abundante e fácil de ser encontrado no mercado (HIPÓLITO, 2024).

Hoje em dia, com a grande escala de resíduos sendo gerados, vem à tona a ideia da produção de carvão ativado a partir da biomassa, podendo assim, obter uma fonte de

tratamento de água, de recursos para indústrias farmacêuticas e demais indústrias como da cerveja, gerando assim uma destinação adequada para os resíduos.

Através do processo de pirólise, em que ocorre com praticamente sem nenhuma fonte de oxigênio, podemos degradar termicamente a casca do limão e obter a transformação em carvão ativado. Dessa forma, o trabalho em questão tem por finalidade degradar a casca do limão através da pirólise e julgar a eficácia do carvão como adsorvente de corante químico azul de metileno.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

A falta de acesso de muitas pessoas pela água e a necessidade das indústrias por carvão ativado, tendo em vista a grande geração de resíduos pelas indústrias são uma problemática no Brasil. Uma indústria de suco de limão fornece esse produto para exportação no Tocantins, gerando em larga escala uma quantidade de casca do material que poderia servir para transformação em carvão ativado. Logo, qual o êxito do carvão ativado produzido a partir da casca do limão para as indústrias e no tratamento de águas?

1.2 JUSTIFICATIVA

Pelo fato de que, a indústria do suco de limão gerar uma grande produção de casca do fruto que não tem um destino adequado, deve-se haver um aproveitamento melhor desse material. Dessa forma, pretende-se estudar as características adquiridas pela casca do limão a partir da pirólise, com intuito final de averiguar a eficiência do carvão ativado em ser um agente adsorvente para indústrias e tratamento de águas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Degradar termicamente a casca do limão 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 azul de metileno.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

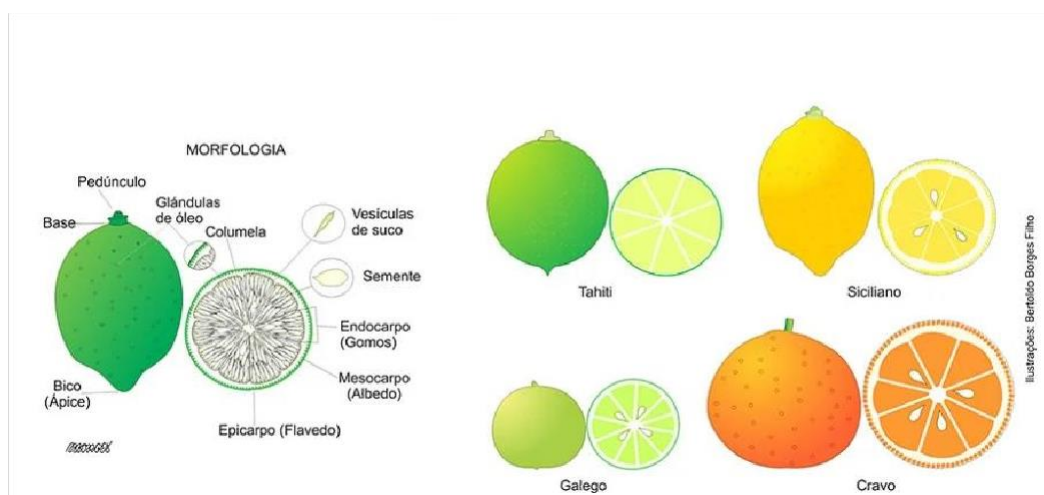
2.1 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DO LIMÃO

Os frutos possuem formato oval e podem ser de tamanhos variados, com casca lisa ou enrugados e adquirem cores que variam do verde-escuro ao amarelo-claro, a substância ativa da fruta de limão é o ácido cítrico. Também contém vitamina C, ferro, cálcio, potássio, magnésio, riboflavina e vitamina B6, entre outros. Algumas partes do limão como:

- Flavedo: glândulas com óleo essencial (parte amarela)
- Albedo: mesocarp ou parte branca
- Parede de papelão
- Segmento
- Sacos de suco
- Semente
- Columella: eixo central

Nota-se na Figura 1 a composição da casca do limão, sendo possível verificar as partes morfológicas em corte.

Figura 1. Composição morfológica da casca de diferentes espécies de limões.



Fonte: (FRUTIFERAS, sd)

2.2 BIOMASSA PARA CARVÃO ATIVADO

Pode-se definir biomassa como toda matéria orgânica de origem vegetal ou animal, e biomassa energética como os materiais que, por serem biomassa, podem ser utilizados para fins energéticos (MESA-PÉREZ, 2004).

O aumento das atividades tem elevado à produção e utilização de resíduos agroindustriais, como cascas e bagaços de frutas, denominada biomassa residual, que é uma importante fonte de matéria-orgânica renovável, com diversas utilizações possíveis. Nesse contexto, o uso de fibras, cascas e bagaços de frutas na preparação de carvão ativado (CA) se apresenta como alternativa econômica e ambiental, o que já é comprovado por diversos estudos (R.V.T.O. SILVA; V. N. de LIMA; A. S. MESSIAS, 2014).

É possível utilizar biomassa lignocelulósica para produção dos mesmos produtos originários do petróleo, como combustíveis, solventes e outros produtos químicos (Yaman, 2004). As propriedades do carvão produzido por materiais lignocelulósicos dependem do precursor e do método de produção usado. A composição desses materiais em relação à celulose, hemicelulose e lignina determina até certo ponto, o desenvolvimento de porosidade do carvão ativado produzido (NABAIS et al., 2013).

2.3 PRODUÇÃO DO LIMÃO NO BRASIL E NO MUNDO

O tamanho do mercado de limão brasileiro é estimado em US\$ 1,72 bilhão em 2024, e deverá atingir US\$ 2,05 bilhões até 2029, crescendo a uma taxa de 3,60% durante o período de previsão (2024-2029), conforme o Gráfico 1.

Gráfico 1: Mercado do limão no Brasil.



Fonte: (Mordor Intelligence, 2023)

O sucesso das exportações do limão brasileiro se dá em função do trabalho que vem sendo realizado para diversificar o mercado consumidor internacional. Tanto a Associação Internacional de Produtos Frescos (IFPA) como a Associação Brasileira dos Produtores e Exportadores de Frutas e Derivados (Abrafrutas) vem desenvolvendo ações para a abertura de novos mercados. Além do Chile, onde já iniciamos as operações de vendas, outros 8 países estão em negociação para importarem nossos produtos. Atualmente, os principais clientes internacionais para essa fruta são: Estados Unidos, Reino Unido, Países Baixos, Alemanha, Canadá, Japão, Coreia do Sul. O modal marítimo é o principal meio de transporte utilizado para a realização do transporte do limão brasileiro, contribuindo para que os preços sejam competitivos e garantindo qualidade e segurança logística na operação (MordorIntelligence, 2019).

2.4 DEGRADAÇÃO TERMOQUÍMICA

De origem grega, a palavra pirólise significa “decomposição por calor” e utiliza resíduos orgânicos de origem animal ou vegetal para produzir energia e reduzir nossa dependência a combustíveis fósseis, ela pode ser utilizada para o aproveitamento de resíduos vegetais provenientes de processos agroindustriais, são compactados em briquetes e, com a pirólise, adquirem maiores teores de carbono e poder calorífico. Isso permite que sejam usados com maior eficiência na geração de calor e potência. (BLOXS, 2021).

Define-se pirólise como a degradação térmica de um material orgânico na ausência parcial ou total de agente oxidante, ou em ambiente que não ocorra a gaseificação intensiva do material por existência de concentração de oxigênio suficiente. Existem dois tipos de pirólise, a convencional e a pirólise rápida, que se diferenciam nas variáveis como taxa de aquecimento, temperatura, tempo de residência das fases sólida e gasosa e os produtos desejados. Para a produção de carvão, é dirigido especificamente o processo de pirólise convencional (PEDROSA, 2011).

2.5 EXPERIMENTOS COM PIRÓLISE DA CASCA DO LIMÃO

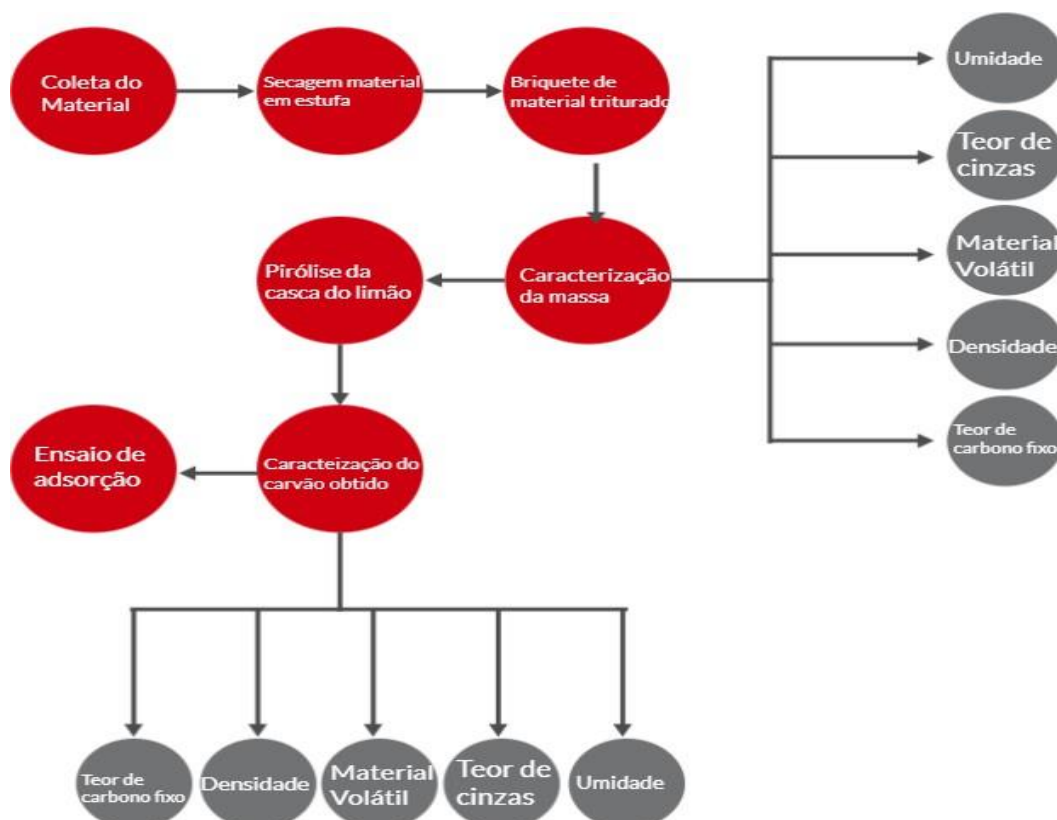
Resíduos de casca de limão foram pirolisados em reator de leito fixo de laboratório nas temperaturas finais de 300 °C, 400 °C e 500 °C com taxa de aquecimento de 10 °C/min, sob nitrogênio da atmosfera para produção de biocarvão, bio-óleo e gás. Os rendimentos máximos de bio-óleo, biocarvão e gás foram 16,66% em peso, 66,89% em

peso e 54,6% em peso, respectivamente, a 400 °C, 300 °C e 500 °C. O gás produzido tem um poder calorífico máximo em torno de 12 MJ/N m³ com uma composição de até 68,82 vol.% de CO, 5,25 vol.% de CH₄, 1,48 vol.% de C_nH_m. O biocarvão recuperado é um candidato promissor para a fabricação de materiais de carbono e para aplicações em combustíveis sólidos. A caracterização química do bio-óleo usando espectroscopia GC-MS e FTIR mostra sua riqueza com compostos bioativos como esqualeno, d-limoneno, β -Sitosterol e fenol. O biocarvão e o bio-óleo apresentaram atividade bactericida contra *Bacillus cereus*, *Micrococcus luteus*, *Salmonella enterica*, *Listeria monocytogenes* e *Staphylococcus aureus*. Os produtos pirolíticos da casca do limão apresentam grandes aplicações potenciais na agricultura e na indústria agroalimentar e permitem uma gestão sustentável dos resíduos de biomassa com benefícios económicos promissores (ABIDI, S; TRABELSI, A.B.H.; BOUDHRIQUA, N, 2023).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os processos desenvolvidos durante essa pesquisa estão apresentados na Figura 2. Os ensaios práticos de caracterização da amostra serão executados no (LARSEN) Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética do IFTO, campus Palmas.

Figura 2: Processos realizado durante a pesquisa



Fonte: Autor (2024).

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

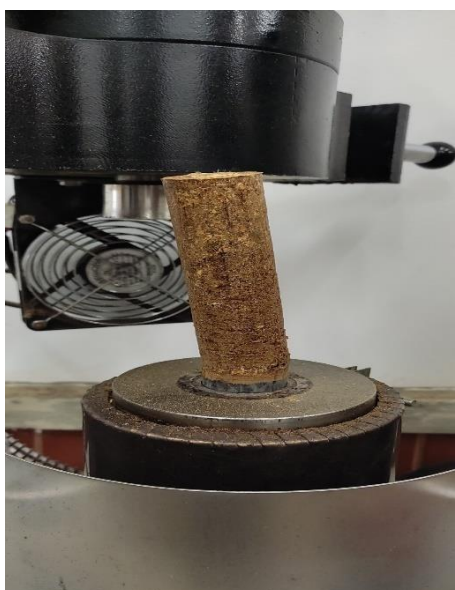
Com a casca do limão foi possível extrair resultados referentes à umidade, teor de cinzas, material volátil, teor de carbono fixo. Inicialmente, a amostra do material passou por um processo de secagem em estufa à 60 °C, e em seguida foi feito uma trituração do mesmo com auxílio de liquidificador industrial para a formação do briquete, que ganhará forma e que será posteriormente levado ao reator conforme as Figuras 3 e 4.

Figura 3: Amostra do material seca depositada no liquidificador industrial



Fonte: Autor (2024).

Figura 4: Briquete a partir da amostra seca triturada da casca do limão



Fonte: Autor (2024).

3.1.1 Umidade

Para se obter os dados referentes à umidade, utiliza-se a norma ASTM D 3173-85. Uma quantidade de 1g foi pesada de casca de limão triturada, após isso foi adicionada a um cadinho de porcelana com peso constante pré-fixado. Após isso, a amostra foi aquecida a temperatura de 105°C durante 1 hora. Em seguida, o cadinho será colocado em um dessecador por 15 minutos e pesado. A análise será realizada em triplicata e o teor de umidade foi determinado de acordo com a Equação 1:

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

A= peso do cadinho vazio + peso da amostra

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

C= peso da amostra

} (g)

3.1.2 Teor de cinzas

Foi calculado o teor de cinzas segundo o método sugerido por Sanchez *et al.*, (2009), onde uma massa em torno de 1g de casca de limão triturada em triplicata é adicionada a cadinhos de porcelana com peso constante pré-fixado. Com isso, a amostra será calcinada a uma temperatura de 710 °C durante 60 minutos em um forno mufla da marca EDG Equipamentos, modelo W-One. Após isso, os cadinhos serão colocados em um dessecador por 1 hora para esfriar e em seguida serem pesados. Para determinas o teor de cinzas será utilizada a norma ASTM 2415-66/86 e seus resultados serão obtidos através da Equação 2:

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

A= peso do cadinho + peso amostra após calcinação

B= peso do cadinho vazio

C= peso da amostra

} (g)

3.1.3 Material Volátil

A determinação do teor de material volátil da biomassa da casca do limão foi obtida em triplicata pesando aproximadamente 1g de amostra em um cadinho de porcelana com peso constante pré-fixado. Inicialmente a amostra será aquecida em um forno mufla à temperatura de 850° C, sem oxigênio por um prazo de 7 minutos. O teor de material volátil será obtido de acordo com a Equação 3:

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

A= peso do cadinho vazio + peso da amostra

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

C= peso da amostra

} (g)

3.1.4 Teor de carbono fixo

Para obtenção de teor de carbono fixo existente na biomassa foi realizada a diferença descrita de acordo com a Equação 4:

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

3.1.5 Densidade

Em resumo, para calcular a densidade aparente, uma proveta de 100ml será conectada a uma balança de precisão. Em seguida, a balança deve ser tarada e a biomassa de casca de limão seca e triturada deve ser adicionada. As massas (g) serão registradas ao adicionar os volumes de 20, 40, 60, 80 e 100ml. A densidade aparente será calculada usando a Equação 5:

$$\text{Densidade} \left(\frac{g}{mL} \right) = \left[\frac{m(g)}{V(mL)} \right] \quad (\text{Equação.5})$$

3.2 PIRÓLISE DA CASCA DO LIMÃO

O processo de conversão térmica foi realizado em um reator de leito fixo tubular de quartzo de 100 cm de comprimento. Inicialmente, a amostra foi pesada e após isso, inserida no compartimento na forma de briquete para o procedimento. Para o aquecimento do reator, têm-se um forno bipartido reclinável Autoclave, que operou em regime de batelada, sendo o vapor de água o gás de arraste. Ao longo do comprimento do tubo de quartzo foi inserido o vapor de água, o gás de arraste, local onde foi colocada a biomassa. Na parte final do ponto de saída há um sistema de condensação com intuito de que parte dos gases transportados se convertam em líquidos. O processo da pirólise vai variar a temperatura entre 550 °C e 650 °C, ficando durante 10 minutos estabilizado na temperatura de 150 °C e 30 min estabilizado na temperatura final de 650° e 550°, com uma taxa de aquecimento de 20 °C/min. As figuras 5, 6 e 7 mostram os equipamentos empregados no processo.

Figura 5: Amostra sendo inserida no reator.



Fonte: Autor (2024).

Figura 6: Forno Autoclave.



Fonte: Autor (2024).

Figura 7: Reator de leito fixo e sistema de condensação.



Fonte: Autor (2024).

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO OBTIDO

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

3.3.1 Densidade

Para obtenção da densidade aparente, o meio usado será o mesmo definido para a determinação da densidade da casca do limão triturado.

3.3.2 Teor de cinzas

Para obtenção do teor de cinzas do carvão, será a partir do método de Sanchez et al., (2009), descrito anteriormente para a determinação do teor de cinzas da casca do limão triturado.

3.3.3 Umidade

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

3.3.4 Material volátil

Ao utilizar o método de Sanchez et al., (2009), será obtido o teor do material volátil descrito anteriormente para a determinação do teor de material volátil da biomassa.

3.3.5 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi feito a partir da diferença exemplificada segundo a Equação X descrita anteriormente na caracterização da biomassa.

3.4 ENSAIO DE ADSORÇÃO

Inicialmente, o experimento foi realizado em uma mesa de agitação chamada Shaker TE 141 conforme a Figura 9, utilizando carvão ativado produzido a 650°C com taxa de aquecimento de 20°C/min, na forma de pó e granulometria de 0,45 mm como demonstra a Figura 8.

Figura 8: Massa de carvão ativado em pó



Fonte: Autor (2024).

Figura 9: Mesa de agitação.



Fonte: Autor (2024).

O teste foi conduzido com a solução corante Azul de Metileno ($C_{16}H_{18}ClN_3S \cdot 3H_2O$) em um volume padrão de 30 mL em todos os testes. Após a adsorção, as amostras serão filtradas em papel analítico como demonstra a Figura 10 e a concentração de azul de metileno será medida em um espectrofotômetro a 660 nm conforme a Figura 11 em seguida.

Figura 10: Amostra sendo filtrada em papel analítico.



Fonte: Autor (2024).

Figura 11: Espectrofotômetro.

Fonte: Autor (2024).

Um Delineamento de Faces Centradas (DFC) foi aplicado para analisar os efeitos da massa de carvão e da concentração da solução do corante no teste de adsorção. O pH da solução do corante foi ajustado para 7, a agitação foi de 70 rpm e o tempo de adsorção foi de 30 minutos, a Tabela 1 abaixo representa os níveis que foram empregados. O experimento foi realizado no LARSEN-IFTO/Campus Palmas.

Tabela 1: Índices de fatores e níveis empregados.

Fatores	Níveis		
	(-1)	(0)	(+1)
Massa do Carvão(g)	0,50	0,75	1
Concentração do Corante(mg/L)	0,20	0,60	1

Fonte: Autor (2024).

Nessa etapa do trabalho foram realizados 11 experimentos com massas de carvão em diferentes concentrações do corante, com intuito de se obter a partir destes resultados

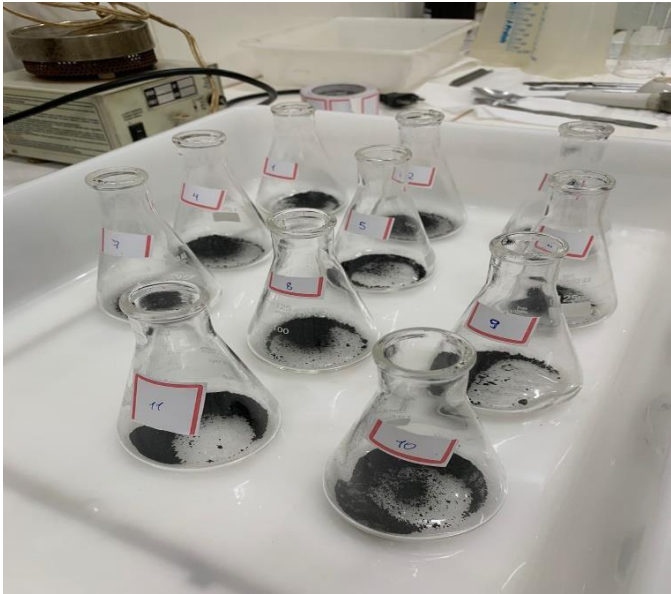
os pontos de absorbância do filtrado, eficiência de remoção e a razão de adsorção. Na Tabela 2 abaixo são listados os ensaios do planejamento experimental adotado nessa pesquisa.

Tabela 2: Ordem dos experimentos no planejamento experimental.

Ordem dos Experimentos	X ₁ Massa de carvão (g)	X ₂ Concentração do corante (mg/L)
1	-1(0,50)	-1(20)
2	1(1,00)	-1(20)
3	-1(0,50)	1(100)
4	1(1,00)	1(100)
5	-1(0,50)	0(60)
6	1(1,00)	0(60)
7	0(0,75)	-1(20)
8	0(0,75)	1(100)
9	0(0,75)	0(60)
10	0(0,75)	0(60)
11	0(0,75)	0(60)

Fonte: Autor (2024).

Figura 12: Massas de carvão pesadas e prontas para teste.



Fonte: Autor (2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

Nessa etapa do trabalho são apresentados os resultados obtidos durante as etapas dessa investigação científica, a saber: (a) caracterização da biomassa, (b) testes de pirólise, (c) caracterização do carvão obtido no processo e (d) testes de adsorção de corante químico no carvão produzido.

4.1.1 Análise imediata da casca do limão

A umidade é um dos fatores que influencia na produção e qualidade dos briquetes. Com o teor de umidade elevado demanda mais energia e influência na queima da biomassa vegetal, dificultando no processo de transferência de calor. Para valores de umidade superiores a 10% é indicado utilizar a biomassa em outros processos (AHMAD et al., 2021). No processo feito de análise, foi obtido um teor de umidade de 4,5% para a casca do limão.

As cinzas são substâncias inorgânicas ocluídas nos poros do CA. São principalmente óxidos e em menor quantidade fosfato, sulfatos, cloretos, carbonatos e silicatos K, Na, Ca, Mg, Fe e Al, solúveis em água e em ácidos diluídos. Geralmente as cinzas são indesejáveis em carvão ativado, pois podem alterar o pH das soluções e contaminá-las com sais (OZDEMIR et al, p.50, 2004). No experimento da análise da nossa amostra, foi observado um teor de cinzas de 6,4%.

De acordo com Cortez et al (2008), a importância dos materiais voláteis está durante a ignição e as etapas iniciais de combustão da biomassa e Brand (2010) define o teor de materiais voláteis como a facilidade com que um material queima, sendo determinado como fração em massa do combustível que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra padronizada. Sendo assim, no experimento, a casca do limão apresentou teor de 75,1% de material volátil.

O teor de carbono fixo representa a porcentagem da biomassa após a retirada da umidade, das cinzas e do material volátil. O Teor de carbono fixo não contém parte experimental direta, mas ele precisa das outras análises para que possa ser calculado, dessa forma, o obtido no experimento da casca do limão foi de 14% de teor de carbono fixo.

Miranda (2017), produziu carvão ativado a partir da casca do fruto Baru, obtendo alguns resultados que serão apresentados em comparativo com resultados obtidos por Pedroza et al (2021), sendo eles com bons potenciais de adsorção, exibindo seus valores referente à umidade, carbono fixo, volatilidade e cinzas, dessa forma, na Tabela 3 abaixo, está sendo feito o comparativo com a biomassa que foi trabalhado nesse estudo, que é a casca de limão, demonstrando a boa eficiência entre todos esses experimentos com boa capacidade de serem atuantes como adsorventes químicos.

Tabela 3: Comparativos de dados em análises imediatas.

Variável analítica	Casca do limão	Outros autores	
		Miranda (2017)	Pedroza et al. (2021)
Umidade (%)	4,5	12,02	6,4
Material volátil (%)	75,1	71,71	80
Cinzas (%)	6,4	2,6	6,5
Carbono fixo (%)	14,0	25,69	7,1

Fonte: Autor (2024).

4.2 RENDIMENTO DO CARVÃO ATIVADO DA CASCA DO LIMÃO

À medida que a umidade aumenta o teor de adsorção diminui, visto que a água ocupa os poros que seriam utilizados no processo de adsorção (ZHU et al., 2021). Durante o processo de degradação térmica da casca do limão, foram obtidos resultados de rendimento do carvão ativado para a temperatura finais de 550 e 650 °C. Na pirólise feita de 650 °C foi pirolisado uma biomassa de 125,3g, sendo produzido de carvão ativado 32,08g, sendo assim com um rendimento de 25,6%, enquanto na segunda pirólise de 550 °C foi utilizado uma biomassa de 98,32g, sendo produzido 28,41g de carvão ativado, sendo um rendimento de 28,89%. Dessa forma, nota-se que o segundo experimento teve uma taxa de rendimento maior, com cerca de aproximadamente 3,29% a mais que o primeiro experimento, dessa maneira, se formos considerar em larga escala esse rendimento em uma produção dessa biomassa de 1000kg, seriam produzidos cerca de 288,95kg de carvão ativado.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO

Da mesma maneira que a biomassa, foi feita a análise imediata do carvão obtido após o processo de pirólise, em que são demonstrados os valores na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4: Comparativo de dados obtidos de carvão ativado.

Variável analítica	Carvão 1 (550 °C)	Carvão 2 (650 °C)	Outros autores	
			Miranda (2017)	Pedroza et al. (2021)
Umidade (%)	5,0	5,3	-	-
Material volátil (%)	27,3	20,1	18,41	24,5
Cinzas (%)	10,1	10,7	0,99	18,3
Carbono fixo (%)	57,6	63,9	75,35	57,2

Fonte: Autor (2024).

Foram obtidos dois carvões em temperaturas finais diferentes da casca do limão, tendo seus dados expostos na tabela acima, em comparativo com dados de Miranda (2017) e Pedroza et al. (2021). De acordo com Barros (p. 32, 2006), um bom carvão não deve exceder a 8% de umidade, logo demonstra ser satisfatório o teor de umidade obtido nos dois carvões da casca do limão.

Em relação ao teor de volatilidade, fazendo um comparativo com o teor da biomassa e o do carvão, foi reduzido cerca de 50% da biomassa para o carvão em cima do teor percentual da amostra.

Brito e Barrichelo (1977) fizeram este estudo sobre as correlações das principais características e relataram esta relação positiva entre carbono fixo da biomassa e o rendimento em carvão, enquanto que os teores de voláteis e de cinzas relacionam-se negativamente com o rendimento em carvão. Em relação ao teor de cinzas obtido dos dois carvões da casca do limão estão próximos na faixa dos 10%, enquanto o teor de carbono fica na faixa dos 57% e 63% de rendimento, um aumento para os 14% referentes da biomassa.

4.4 ENSAIO DE ADSORÇÃO

O ensaio de adsorção advindo da pirólise da casca do limão (650°C), foi realizado conforme exemplificado no item 4 desse trabalho, sendo seguido fielmente todos os passos e feito todas as análises e demonstrações acerca dos resultados obtidos, sendo possível ser visualizado através do processo de leitura do espectrofotômetro no processo de Delineamento de Faces Centradas (DFC), dados como a Absorbância (Y1), Eficiência de remoção (Y2) e a Razão da adsorção (Y3), com cada resultado sendo correspondente a seu experimento expostos na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5: Resultados obtidos no processo de adsorção dos experimentos.

Ensaio	Massa do Carvão (g)	Concentração do Corante (mg/L)	Absorbância (-)	Eficiência de remoção (%)	Razão de adsorção (mg/g)
1	0,50	20	0,05	97,23	1,14
2	1	20	0,03	97,97	0,54
3	0,50	100	0,81	90,01	5,40
4	1	100	0,08	99,06	2,97
5	0,50	60	0,24	95,11	3,42
6	1	60	0,02	99,55	1,79
7	0,75	20	0,10	93,90	0,75
8	0,75	100	0,23	97,13	3,89
9	0,75	60	0,03	99,36	2,38
10	0,75	60	0,20	96,02	2,30
11	0,75	60	0,07	98,69	2,37

Fonte: Autor (2024).

Após os resultados expostos pela Tabela 5, podemos ver os diferentes dados acerca dos experimentos com alternadas composições de massa de carvão e solução corante durante o processo. Desse modo, na Figura 13 abaixo está demonstrado o contraste de um dos experimentos antes de ser feito o teste de adsorção e passar pelo papel analítico, e outro depois de ser passado por todo processo de adsorção.

Figura 13: Antes e depois de Teste de adsorção.



Fonte: Autor (2024).

Com os dados obtidos, foi inserido eles no programa “Protimiza Experimental Design”, para podermos gerar modelos de regressão linear para exemplificar as respostas adquiridas.

4.4.1 Razão de adsorção (Q)

Na Tabela 6, são listados os fatores identificados para a criação do modelo que se refere à variável razão de adsorção (Q). Esta medida está associada à quantidade de corante que fica retida em cada parte do carvão ativado após o processo de filtração. Por conseguinte, atingir valores elevados é preferível, pois indicam uma maior eficácia na capacidade de adsorção.

Tabela 6: Coeficientes de regressão para definição da razão de adsorção.

Fatores	Coeficiente de Regressão	Erro Padrão	t-calculado	p-valor
Média	2,36	0,03	72,03	0,0000
X_1	-0,77	0,03	-29,64	0,0000
X_1^2	0,23	0,04	5,81	0,0021
X_2	1,63	0,03	62,30	0,0000
X_2^2	-0,06	0,04	-1,40	0,2194
$X_1 - X_2$	-0,46	0,03	-14,47	0,0000

Fonte: Autor (2024).

Logo, para o modelo representado da razão de adsorção, foi modulado uma equação de regressão linear que é demonstrada logo abaixo.

$$Q = 2,37 - 0,90x_1 + 0,29x_1^2 + 1,75x_2 + 0x_2^2 - 0,59x_1 * x_2$$

Onde:

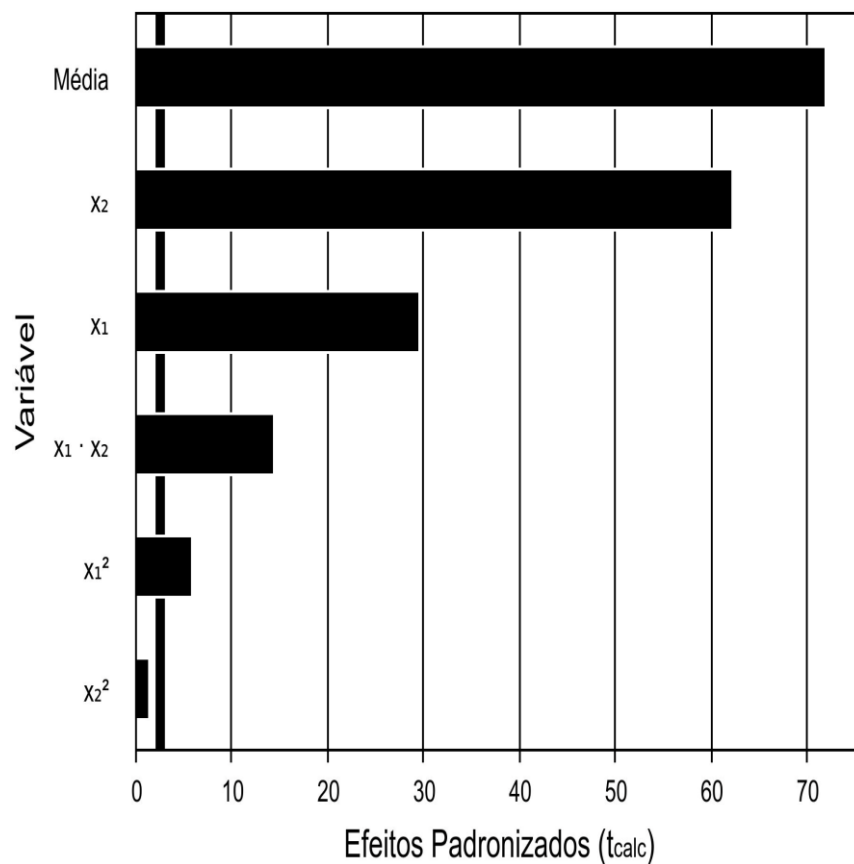
Q = razão de adsorção;

x_1 = massa de carvão (codificada);

x_2 = concentração do corante (codificada);

É possível examinar as variáveis que mais impactam no valor da Razão de adsorção do carvão produzido a partir da pirólise da casca do limão, utilizando o Diagrama de Pareto apresentado no Gráfico 2 a seguir.

Gráfico 2: Diagrama de Pareto.



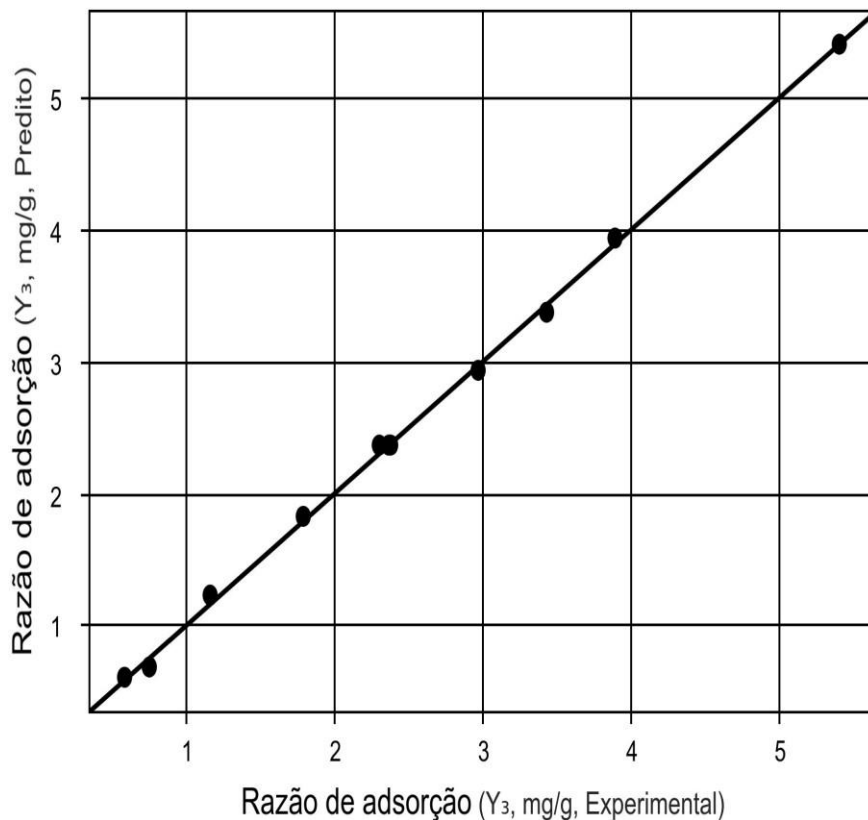
Fonte: Autor (2024).

A partir da análise do Gráfico 2, pode-se observar a demonstração das variáveis independentes mais significativas no experimento como sendo a x_2 , que representa a

solução do corante químico azul de metileno e seguido logo após o x_1 , que é representado pela massa de carvão.

Na representação do Gráfico 3 abaixo, está demonstrado a diagonal do modelo previsto e ideal para a razão de adsorção, e os pontos inseridos nessa linha são os dados previsto no experimento desse trabalho, notando-se assim, uma boa proximidade ou intersecção com a linha, fazendo com que seja demonstrado a eficiência do projeto.

Gráfico 3: Representação do modelo ideal de razão de adsorção com pontos experimentais do projeto da casca do limão.



Fonte: Autor (2024).

Dando sequência, na Tabela 7 abaixo, está representado os valores base do teste de variância (ANOVA) da razão de adsorção, sendo comparativo com os obtidos nesse trabalho, para ser demonstrado efetivamente sua eficiência em estatísticas de referência e ser comprovado o modelo.

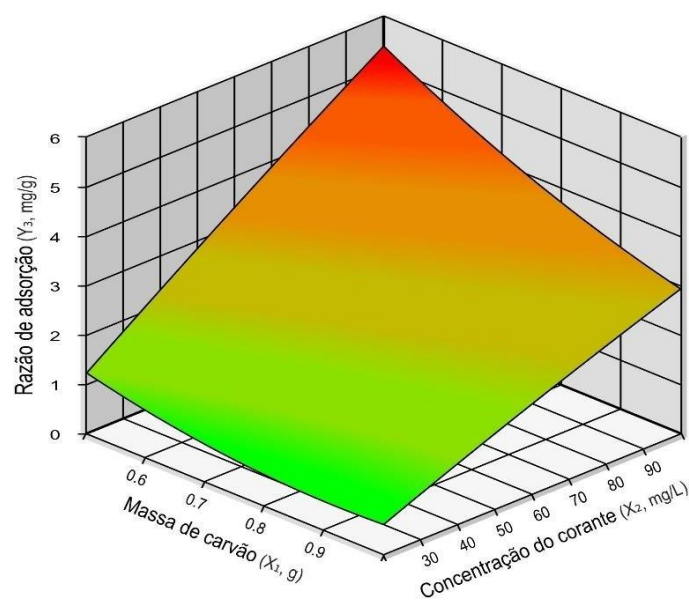
Tabela 7: Dados razão de adsorção ANOVA.

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado Médio	F calculado	P valor
Regressão	20,4	5	4,1	1000,5	0,0000
Resíduos	0,0	5	0,0	-	-
Falta de ajuste	0,0	3	0,0	3,1	0,25268
Erro puro	0,0	2	0,0	-	-
Total	20,5	10	-	-	-

Fonte: Autor (2024).

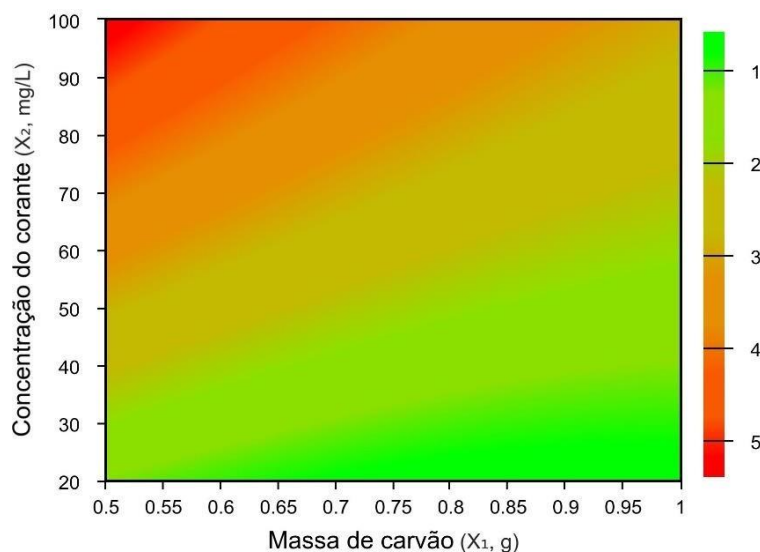
Para a maior representação dos dados, foi gerado dois gráficos, um Gráfico 4 de superfície e outro gráfico 5 de curva de nível a partir do planejamento experimental, a fim de se ter uma maior perspectiva dos resultados, após sua análise, nota-se uma razão de adsorção maior nos eixos em que a massa do carvão tende a cerca de 0,5g e a solução do corante azul de metileno na casa dos 100mg/L, gerando assim uma razão de adsorção na faixa dos 5,4mg/g.

Gráfico 4: Razão da adsorção representada em superfície tridimensional.



Fonte: Autor (2024).

Gráfico 5: Razão da adsorção do carvão representada em níveis.



Fonte: Autor (2024).

5 CONCLUSÃO

De acordo com os dados obtidos a partir das análises e experimentos feitos, a partir da análise imediata pode-se concluir algumas coisas acerca da produção de carvão ativado a partir da casca do limão. Primeiramente, referente à sua biomassa apresentando valores satisfatórios associados à sua umidade com 4,5% de taxa, e teor de material volátil alto de 75,1%, com características positivas e eficientes para a pirólise desse material.

Dessa maneira, após o processo de secagem e pirólise do material, obtivemos resultados também satisfatórios em relação a suas estatísticas, tendo como referência a literatura e outros pesquisadores de projetos semelhantes, com rendimento do carvão chegando a aproximadamente 29%, o que caracteriza um ótimo rendimento, podendo em larga escala obter uma proporção de comercialização maior do produto.

No teste de adsorção obteve ótimos resultados, tendo uma razão de adsorção de 5,40 mg/g, com uma proporção de massa de carvão de apenas 0,50g e solução do corante químico azul de metileno 100 mg/L.

Logo, é possível realizar um reaproveitamento em larga escala da casca do limão e ser utilizado para fins mais produtivos, ser instrumento que vai ser amplamente usado em indústrias, tanto em setores farmacêuticos, de bebidas, de tratamento de águas, entre

os demais variados tipos de setores que é utilizado o carvão ativado. Sob esse viés, é promovida a sustentabilidade do planeta com esse aproveitamento de resíduos e o setor econômico e produtivo inovando sempre, dessa forma, o carvão ativado da casca do limão conclui-se que tem um alto poder de adsorção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIDI, S; Trabelsi, A.B.H.; Boudhrioua, N. **Pirólise de resíduos de casca de limão em reator de leito fixo e caracterização de produtos pirolíticos inovadores.** *J Mater Ciclos Gestão de Resíduos* 25, 235–248 (2023). Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-022-01527-1#Fun> . Acesso em 26/02/2024.
- AHMAD, Mohd Azmier et al, 2021. **Adsorção de azul de metileno de solução aquosa por amendoim carvão ativado à base de casca.** *Materiais Hoje: Anais*, v. 47, p. 1246-1251, 2021. Acesso em 20/06/2024.
- BARROS, S. V. S, 2006, “**Avaliação da biomassa de espécies exóticas e nativas como fonte alternativa para geração de energia**”. Dissertação de Mestrado, UFAM, Manaus, AM. Acesso em 20/06/2024.
- BLOXS, 2021, **Pirólise: conheça a técnica que transforma resíduos em energia sustentável.** Disponível em: [Pirólise: conheça a técnica que transforma resíduos em energia sustentável \(bloxs.com.br\)](https://bloxs.com.br). Acesso em: 19/06/2024.
- BRAND, M. A. (2010). **Energia de biomassa florestal: fontes, propriedades energéticas; formas, viabilidade e eficiência na obtenção de energia.** 2010. 1 ed. Ed. Interciência , 2010 86p. Acesso em 20/06/2024.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. (1977). **Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto.** IPEF, n.14, p. 9-20, 1977. Acesso em 21/06/2024.
- CORTEZ, L. A. B., LORA, E. E. S., GÓMEZ, E. G. (2008). **Biomassa para energia.** 1 de Campinas. Editora Unicamp, Campinas, 2008. 728p. Acesso em 21/06/2024.
- FRUTIFERAS. **Os benefícios do Limão para a saúde.** Online. Disponível em: <https://www.frutiferas.com.br/limao>. Acesso em 12/03/2024.
- HIPÓLITO, gabriela (2024). **SISTEMAS INDUSTRIAIS: VANTAGENS DO CARVÃO ATIVADO PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA.** Disponível em: [Sistemas industriais e as vantagens do carvão ativado \(grupohidrica.com.br\)](https://grupohidrica.com.br). Acesso em: 24/06/2024.
- KOIFAMAN, Sergio. **Limão, características, usos, propriedades, história e muito mais.** Disponível em: <https://www.ideiasinteligentes.com/frutas/limao-caracteristicas-usos-propriedades-historia-e-muito-mais/>. Acesso em 16/03/2024.
- MENDONÇA, Luciana Maria Vieira Lope; CONCEIÇÃO, Alzira da; PIEDADE, Juliana; CARVALHO, Vânia de; THEODORO, Vanessa Cristina de Almeida. **Caracterização da composição química e do rendimento dos resíduos**

industriais do limão Tahiti (Citrus latifolia Tanaka). Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cta/a/X3SdYWY7qPh6MNzBZfk9zjL/>. Acesso em 17/03/2024.

MESA PEREZ, Juan Miguel. **Testes em uma planta de pirólise rápida de biomassa em leito fluidizado: critérios para sua otimização.** 2004. Acesso em 18/03/2024

MORDOR INTELLIGENCE. **Tamanho do mercado de limão brasileiro e análise de ações – Tendências e previsões de crescimento (2024 – 2029).** Online. Disponível em: [Tamanho do mercado de limão no Brasil e análise de participação- Relatório de pesquisa da indústria- Tendências de crescimento \(mordorintelligence.com\)](https://mordorintelligence.com/pt-br/relatorio/tamanho-do-mercado-de-limao-no-brasil-e-analise-de-participacao). Acesso em 24/03/2024.

NABAIS, JM Valente et al. (2013). **Caracterização superficial e porosa de carvões ativados a partir de um novo precursor de biomassa, o capim-esparto.** *Ciência de superfícies aplicada*, v. 265, p. 919-924, 2013. Acesso em 19/06/2024.

OZDEMIR, O.; ARMAGAN, B.; TURAN, M.; CELIK, M. S. (2004). **Comparison of the adsorption characteristics of azo-reactive dyes on mezoporous mineral.** *Dyes Pigments* v.62 p. 49-60, 2004. Acesso em 20/06/2024.

PEDROSA, Marcelo Mendes. **Bio-óleo e Biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo.** 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/15915> . Acesso em 28/03/2024.

PENA, Rodolfo F. Alves. **"Consumo de água no mundo"; Brasil Escola.** Disponível em: [Consumo de água no mundo - Brasil Escola \(uol.com.br\)](https://www.brasilescola.com/geografia/consumo-de-agua-no-mundo.htm). Acesso em 27/03/2024.

RENTALOG. **Limão brasileiro: o mercado e os desafios na exportação.** Online. Disponível em: <https://rentalog.com.br/limao-brasileiro-o-mercado-e-os-desafios-na-exportacao/>. Acesso em 28/02/2024.

(R. V. T. O. SILVA; V. N. de LIMA; A. S. MESSIAS.) **USO DE BIOMASSA RESIDUAL COMO ALTERNATIVA PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO.** Disponível em: [1482-19073-160916.pdf \(blucher.com.br\)](https://www.blucher.com.br/docview/1482-19073-160916.pdf). Acessado em 28/03/2024.

SANTOS, Michelle Ludmilla Guedes dos. **PARAMETROS QUE INFLUENCIAM A PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO DA BIOMASSA RESIDUAL DO ABACAXI (ANANAS COMOSUS) PARA REMOÇÃO DE CORANTE INDUSTRIAL.** Disponível em: <https://repositorio.unaerp.br/bitstream/handle/12345/460/tese%20michele%20ludmila.pdf?sequence=1>. Acesso em 12/03/2024.

TODA FRUTA. **Informações econômicas sobre o limão.** Disponível em <http://www.todafruta.com.br/>. Acesso em 19/03/2024.

YAMAN, Serdar. **Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks.** Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00177-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00177-8) , 2004. Acessado em 24/03/2024.

ZHU, Rong et al. (2021). **Análise dos fatores que influenciam o desenvolvimento da estrutura dos poros de agricultura e carvão ativado derivado de resíduos florestais para aplicação em gás e líquido fases: Uma revisão.** *Revista de Engenharia Química Ambiental*, v. 9, n. 5, p. 105905, 2021. Acesso em 21/06/2024.