



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

RAFAEL JOSÉ DE OLIVEIRA FILHO

**APROVEITAMENTO DE BORRA DE CAFÉ PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO
ATIVADO**

PALMAS

2023

RAFAEL JOSÉ DE OLIVEIRA FILHO

**APROVEITAMENTO DE BORRA DE CAFÉ PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO
ATIVADO**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes
Pedroza

PALMAS

2023

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

- O48a Oliveira Filho, Rafael José de
 Aproveitamento de borra de café para a produção de carvão
 ativado / Rafael José de Oliveira Filho. – Palmas, TO, 2023.
 63 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, 2023.
- Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza
1. Borra de café. 2. Pirólise. 3. Carvão ativado. 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

RAFAEL JOSÉ DE OLIVEIRA FILHO

APROVEITAMENTO DE BORRA DE CAFÉ PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO

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

Aprovado em: 04/12/2023

BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador
(IFTO)



Eng. Me. Ranyere do Nascimento Lôbo



Profª. Drª. Cláudia da Silva Aguiar Rezende
(IFTO)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por conceder-me força e cuidar do bem-estar dos meus familiares ao longo desses cinco anos, garantindo nossa saúde durante esse momento peculiar da história.

À minha família, por seu amor incondicional e compreensão durante essa jornada. Obrigado por serem os pilares inabaláveis da minha vida.

Aos professores do curso, expresso minha gratidão pelo conhecimento e experiência transmitidos.

Ao meu orientador, pela sua instrução, paciência e disponibilidade durante a concepção deste trabalho.

Aos meus amigos, que viveram essa rotina comigo, compartilhando experiências, incentivando-me nos momentos difíceis e celebrando as conquistas.

RESUMO

OLIVEIRA FILHO, Rafael José de. **Aproveitamento De Borra De Café Para A Produção De Carvão Ativado**. 2023. 63 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2023.

O propósito deste trabalho é aproveitar o resíduo proveniente do preparo do café como líquido consumível, denominado borra de café. Essa bebida estimulante é consumida em larga escala ao redor do mundo, sendo o Brasil um dos principais agentes nesse mercado. Nessa perspectiva, a quantidade desse rejeito orgânico produzido e descartado no país é preocupante, sendo necessário encontrar novos destinos para esse subproduto. Assim, a transformação térmica da borra de café através do processo de pirólise, com o intuito de produzir carvão ativado, pode ser uma saída interessante para reduzir o descarte equivocado dessa biomassa. Esse produto é conhecido por possuir uma notável propriedade adsorvente, capaz de agir na descontaminação de líquidos e gases, agregando valor ambiental e comercial ao material pirolisado. Para isso, a borra de café foi caracterizada através dos testes de análise imediata, sendo eles: teor de umidade (5,11%), teor de material volátil (84,38%), teor de cinzas (0,83%) e teor de carbono fixo (9,68%). Ademais, foram realizados ensaios de cinética de perda de massa e de densidade em base seca (0,95 g/mL). Essa biomassa sofreu processos de pirólise sob as temperaturas de 550 e 650 °C, ambos com tempo de residência de 30 minutos e taxa de aquecimento de 30 °C/min, apresentando rendimento de 21,16% e 22,50%, respectivamente. Então, os carvões ativados produzidos nesses procedimentos foram caracterizados, também, por análise imediata e o carvão produzido a 650 °C foi utilizado no ensaio de adsorção do composto azul de metileno, constatando valores altos na eficiência de remoção (99,74%) e na razão de adsorção (7,32 mg/g), que aumenta quando são utilizadas menores massas de carvão e maiores concentrações do corante azul. Dessa forma, analisando os resultados encontrados, entende-se que o carvão ativado, produzido através da pirólise de borra de café, é um adsorvente eficaz, acrescentando valor ao subproduto do café.

Palavras-chave: Café, Borra de café, Carvão ativado, Pirólise, Adsorção.

ABSTRACT

OLIVEIRA FILHO, Rafael José de. **Aproveitamento De Borra De Café Para A Produção De Carvão Ativado**. 2023. 63 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2023.

The purpose of this work is to use the residue from coffee preparation as a consumable liquid, called coffee grounds. This stimulating drink is consumed on a large scale around the world, with Brazil being one of the main players in this market. From this perspective, the amount of this organic waste produced and discarded in the country is worrying, and it is necessary to find new destinations for this byproduct. Thus, the thermal transformation of coffee grounds through the pyrolysis process, with the aim of producing activated carbon, can be an interesting way to reduce the incorrect disposal of this biomass. This product is known for having a notable adsorbent property, capable of acting in the decontamination of liquids and gases, adding environmental and commercial value to the pyrolyzed material. For this, the coffee grounds were characterized through proximate analysis tests, namely: moisture content (5.11%), volatile material content (84.38%), ash content (0.83%) and fixed carbon content (9.68%). Furthermore, mass loss kinetics and density tests were carried out on a dry basis (0.95 g/mL). This biomass underwent pyrolysis processes at temperatures of 550 and 650 °C, both with a residence time of 30 minutes and a heating rate of 30 °C/min, presenting a yield of 21.16% and 22.50%, respectively. Then, the activated carbons produced in these procedures were also characterized by proximate analysis and the carbon produced at 650 °C was used in the adsorption test for the methylene blue compound, finding high values in removal efficiency (99.74%) and in adsorption ratio (7.32 mg/g), which increases when smaller masses of charcoal and higher concentrations of blue dye are used. Therefore, analyzing the results found, it is understood that activated carbon, produced through the pyrolysis of coffee grounds, is an effective adsorbent, adding value to the coffee by-product.

Keywords: Coffee, Coffee grounds, Activated charcoal, Pyrolysis, Adsorption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da geração de resíduos entre 2010 e 2019	13
Figura 2 – Composição gravimétrica de resíduos domiciliares em Palmas–TO	14
Figura 3 – Fruto do cafeeiro	16
Figura 4 – Composição anatômica do fruto do café	17
Figura 5 – Diferenças entre o grão do café arábica e robusta	18
Figura 6 – Evolução do consumo interno de café no Brasil.....	19
Figura 7 – Borra de café retida em filtro de papel.....	20
Figura 8 – Carvão visto por microscópio	22
Figura 9 – Formatos mais usuais de carvão ativado	23
Figura 10 – Fluxograma contendo os testes e experimentos a serem realizados	24
Figura 11 – Borra de café coletada.....	25
Figura 12 – Estufa modelo SP-200.....	26
Figura 13 – Dessecador	27
Figura 14 – Forno tipo mufla aquecido com cadinhos em seu interior	28
Figura 15 – Forno mufla com cadinhos no interior	29
Figura 16 – Proveta em balança de precisão	30
Figura 17 – Balança de precisão modelo L1002i.....	31
Figura 18 – Reator termoeletrico utilizado nos processos de pirólise.....	32
Figura 19 – Autoclave vertical.....	33
Figura 20 – Equipamentos envolvidos na pirólise	34
Figura 21 – Frascos sendo preparados para o experimento	37
Figura 22 – Mesa agitadora orbital modelo “Shaker TE 141”	38
Figura 23 – Processo de filtração da substância adsorvida.....	38
Figura 24 – Espectrofotômetro	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variantes e variáveis do processo de pirólise.....	21
Tabela 2 – Variáveis independentes e sua codificação.....	36
Tabela 3 – Experimentos propostos pela metodologia DFC	37
Tabela 4 – Dados dos pesos iniciais e finais dos ensaios da biomassa	40
Tabela 5 – Resultados da análise imediata da biomassa	41
Tabela 6 – Comparativo entre trabalhos de análise imediata da biomassa	41
Tabela 7 – Resultados do ensaio de densidade da biomassa	42
Tabela 8 – Rendimento do carvão ativado 550 °C e 650 °C	44
Tabela 9 – Dados dos pesos iniciais e finais dos ensaios dos carvões ativados	45
Tabela 10 – Resultados da análise imediata dos carvões ativados	46
Tabela 11 – Comparativo entre trabalhos de análise imediata de carvões	47
Tabela 12 – Resultados do ensaio de adsorção do carvão 650 °C.....	48
Tabela 13 – Coeficientes de regressão e valores estatísticos para a absorbância...49	
Tabela 14 – ANOVA para a absorbância.....	51
Tabela 15 – Regressores e outros valores estatísticos para a razão de adsorção ...53	
Tabela 16 – ANOVA para a razão de adsorção.....	55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resultados da cinética de perda de massa	43
Gráfico 2 – Contribuição das variáveis para a absorbância	50
Gráfico 3 – Gráfico de predição do modelo da absorbância.	51
Gráfico 4 – Absorbância em função das variáveis independentes	52
Gráfico 5 – Relação Absorbância x Variáveis independentes	52
Gráfico 6 – Contribuição das variáveis para a razão de adsorção	54
Gráfico 7 – Gráfico de predição do modelo da razão de adsorção	55
Gráfico 8 – Relação tridimensional entre a razão de adsorção e as variáveis	56
Gráfico 9 – Relação Razão de adsorção x Variáveis independentes	57

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Problema de pesquisa	13
1.2 Justificativa	14
1.3 Objetivos.....	15
<i>1.3.1 Objetivo Geral.....</i>	<i>15</i>
<i>1.3.2 Objetivos Específicos.....</i>	<i>15</i>
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 O café	15
<i>2.1.1 História.....</i>	<i>15</i>
<i>2.1.2 Botânica.....</i>	<i>16</i>
<i>2.1.3 Perspectivas de mercado</i>	<i>18</i>
<i>2.1.4 Borra de café</i>	<i>19</i>
2.2 Pirólise	20
2.3 Carvão ativado e suas propriedades adsorventes.....	21
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	24
3.1 Coleta do material	25
3.2 Caracterização da biomassa	25
<i>3.2.1 Análise imediata.....</i>	<i>26</i>
3.2.1.1 Umidade	26
3.2.1.2 Material volátil.....	27
3.2.1.3 Teor de cinzas	29
3.2.1.4 Teor de carbono fixo	30
<i>3.2.2 Densidade.....</i>	<i>30</i>
<i>3.2.3 Cinética de perda de massa</i>	<i>31</i>
3.3 Pirólise do material	32
<i>3.3.1 Balanço de Massa e Rendimento</i>	<i>34</i>
3.4 Caracterização do carvão.....	35
<i>3.4.1 Análise imediata.....</i>	<i>35</i>
3.4.1.1 Umidade	35
3.4.1.2 Material volátil.....	35
3.4.1.3 Teor de cinzas	35
3.4.1.4 Teor de carbono fixo	35
3.4.2 Adsorção.....	35

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1 Caracterização da Biomassa.....	40
4.1.1 <i>Análise imediata</i>	40
4.1.2 <i>Densidade</i>	42
4.1.3 <i>Cinética de perda de massa</i>	43
4.2 Rendimento do Carvão Ativado da Borra de Café	44
4.3 Caracterização do carvão.....	45
4.3.1 <i>Análise imediata</i>	45
4.3.2 <i>Teste de Adsorção</i>	48
4.3.2.1 Resposta: Absorbância (Y_1).....	48
4.3.2.2 Resposta: Razão de adsorção (Q)	53
5. CONCLUSÃO	58
REFERÊNCIAS.....	59

1. INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos sólidos é tão antiga quanto a civilização humana, contudo, somente a partir da década de 1970, ela passa a ser considerada como uma preocupação ambiental de nível mundial, devido à organização de encontros internacionais para debater os problemas ambientais, como a Conferência de Estocolmo (1972) e a Eco-92, realizada no Brasil, na cidade do Rio de Janeiro em 1992 (Christensen, 2010; Velloso, 2008).

Essa mudança de comportamento foi impulsionada principalmente pelas consequências da industrialização promovida pelas Revoluções Industriais no século XVIII e XIX, que introduziram novos materiais e produtos químicos, alterando drasticamente os tipos e a composição dos resíduos (Christensen, 2010).

Ademais, a migração gradual da população rural para as áreas urbanas industrializadas originou um processo intenso de urbanização, acarretando mudanças na quantidade e no caráter dos resíduos, o que tornou sua gestão nessas áreas uma operação logística complexa e de alto custo (Christensen, 2010; Sasikumar; Krishna, 2009).

Com o passar dos anos, pode-se perceber que a causa da geração exagerada de resíduos sólidos em uma sociedade está associada aos seus padrões culturais, renda e hábitos de consumo (Roth; Garcias, 2008). Nesse sentido, o tradicional café desponta como um produto de consumo mundial, já que ultrapassa 150 milhões de sacas de 60 quilos consumidas por ano, segundo dados da Organização Internacional do Café (ICO, sigla em inglês).

Nesse contexto, o Brasil é o maior produtor e exportador de café do mundo, sendo o segundo maior consumidor do planeta (Cecafé, 2023). Desse modo, o Brasil se torna um dos principais geradores de subprodutos provenientes da preparação da bebida, sendo a borra um deles.

A borra de café é um material com alta concentração de carbono e, assim como qualquer outro material carbonáceo, pode ser transformado em carvão ativado (Ansari; Mohammad-Khah, 2009). Desse modo, uma das alternativas para converter esse coproduto, em algo com um maior valor agregado, é a produção de carvão ativado a partir do processo de pirólise (Velloso, 2008).

O principal uso do carvão ativado está na purificação de soluções e remoção de sabores, cores, odores e outras impurezas das fontes de água, devido à sua

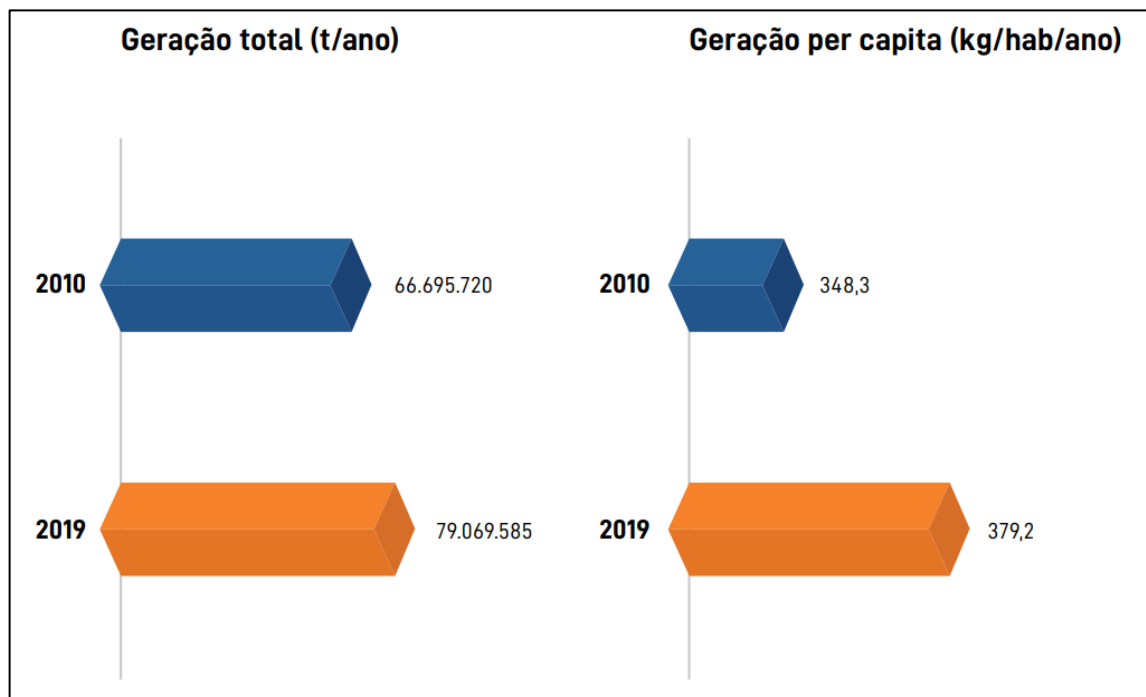
capacidade de adsorção de substâncias. Ele tem sido cada vez mais utilizado para a prevenção da poluição ambiental, o que aumentou sua comercialização devido às leis de controle à poluição (Ansari; Mohammad-Khah, 2009).

1.1 Problema de pesquisa

Além do seu apreço tradicional, os produtos da indústria cafeeira têm sofrido com o fenômeno da “gourmetização”, expressão que remete ao aumento do valor agregado de um item devido ao acréscimo de sofisticação e qualidade. O crescimento populacional aliado a essas culturas de consumo, tem feito com que a produção de resíduos sólidos aumentasse significativamente nos últimos anos.

O Brasil, de acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2020, disponibilizado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), registrou um crescimento de 18,55% na geração de rejeitos urbanos, chegando a 79 milhões de tonelada por ano (Figura 1).

Figura 1 – Evolução da geração de resíduos entre 2010 e 2019



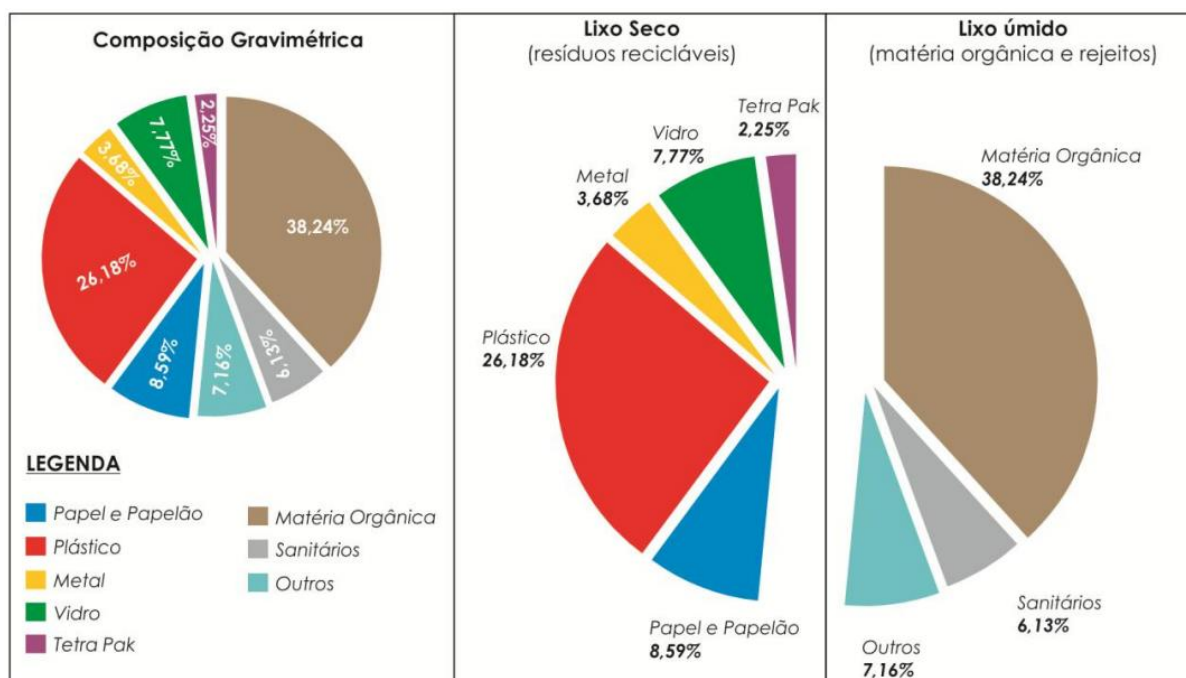
Fonte: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2020).

Nessa perspectiva, seria possível aproveitar a borra de café para a produção de carvão ativado através da pirólise convencional?

1.2 Justificativa

Na cidade de Palmas/TO, segundo o Plano Municipal de Saneamento Básico de 2014, a maior parte dos resíduos sólidos domiciliares gerados é de origem orgânica, correspondendo a 38,24% da produção municipal (Figura 2). De acordo com o mesmo estudo, nos primeiros seis meses de 2013, a população produziu em suas residências, em média, 5.655,8 toneladas de resíduos por mês, resultando em uma geração *per capita* de 0,78 kg/habitante por dia.

Figura 2 – Composição gravimétrica de resíduos domiciliares em Palmas/TO



Fonte: Plano Municipal de Saneamento Básico de Palmas/TO (2014).

Nesse contexto, encontrar uma maneira de reutilizar esses rejeitos é fundamental para a diminuição do impacto ambiental. Nesse sentido, o reaproveitamento da borra de café, pode contribuir significativamente para essa causa, já que ela é um subproduto orgânico da bebida mais consumida no mundo, após a água (Batista Júnior, 2017).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Reaproveitar a borra de café para a produção de carvão ativado, através do processo de pirólise convencional.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a biomassa escolhida (resíduo de borra de café);
- Realizar a pirólise da biomassa, analisando o rendimento de carvão ativado;
- Caracterizar o material adsorvente obtido (carvão ativado).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O café

2.1.1 História

Os registros históricos mais antigos sobre a descoberta do café são os manuscritos encontrados no lêmén, que datam do ano de 575, conhecidos como a Lenda de Kaldi. Essa lenda conta a respeito de um pastor de cabras da Etiópia que percebeu os efeitos estimulantes que uma planta, até então desconhecida, gerava em seus animais quando a mastigavam (Martins, 2012).

A origem geográfica do café remete-se ao nordeste da África, à antiga terra da Abissínia, hoje chamada de Etiópia, que possivelmente é o berço da humanidade e, também, o berço do café (Pendergrast, 2010). Apesar de sua origem africana, foram os vizinhos árabes os responsáveis por popularizar esse produto, pois, após a chegada do fruto em solo asiático na região do lêmén, eles dominaram as técnicas de plantio e processamento da planta (Martins, 2012).

O consumo da bebida na sociedade árabe era considerado, inicialmente, como um medicamento ou uma ajuda religiosa, sendo utilizado por monges para ficarem acordados com mais facilidade para as orações da meia-noite. Porém, a ingestão dessa infusão logo passou a ser usada diariamente (Pendergrast, 2010).

Os turcos são considerados os precursores do costume de “tomar café”, pois foi em sua luxuosa capital de Constantinopla, no século XV, que o ato de consumir esse líquido animador se tornou um ritual de sociabilidade (Martins, 2012).

No Brasil, a entrada do café é atribuída à figura de Francisco de Mello Palheta, um sargento português que, a mando do governador do Maranhão e Grão Pará na época, trouxe da Guiana Francesa em sua mala, de forma ilegal, as primeiras mudas da planta (Associação Brasileira da Indústria do Café, 2021).

No país, a planta encontrou condições climáticas favoráveis e logo se espalhou pelo território nacional, chegando aos estados do Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Paraná, São Paulo e Minas Gerais. Por volta de 1830, o grão se tornou a principal exportação do Brasil, alavancando a economia, principalmente do estado de São Paulo (Cecafé, 2023).

2.1.2 Botânica

Os grãos que são torrados, moídos e utilizados no preparo da bebida correspondem as sementes da fruta do Cafeeiro (Figura 3). Esse fruto é conhecido como cereja ou baga, sendo composto por uma casca lisa e avermelhada, quando madura, que envolve uma polpa fibrosa.

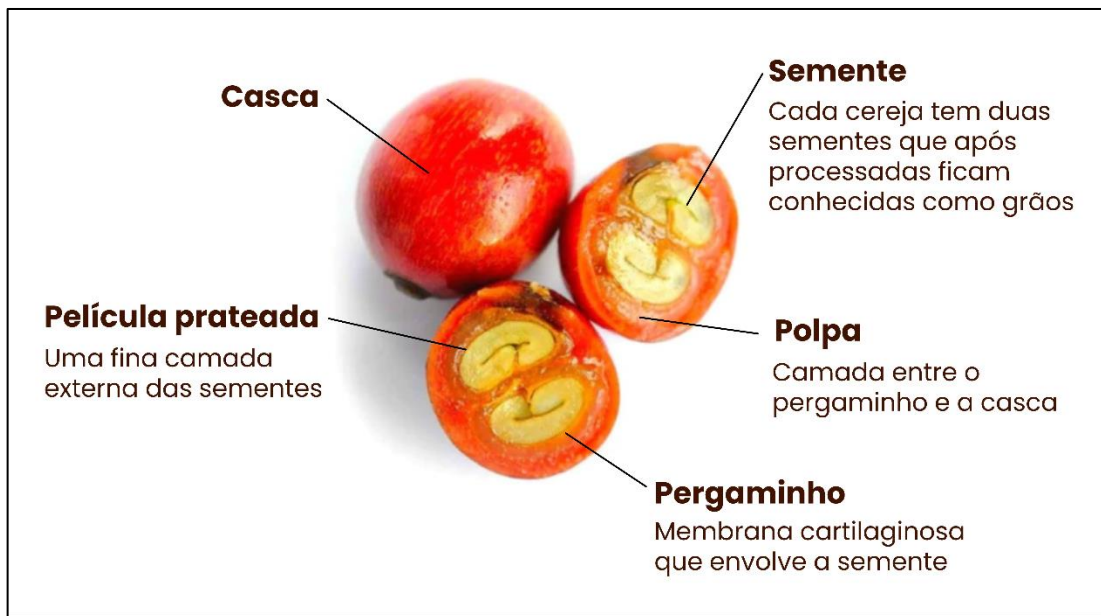
Figura 3 – Fruto do cafeeiro



Fonte: Borato (2022).

Essa camada, por sua vez, cobre o endocarpo fino, chamado de pergaminho, que é responsável pela fertilidade da planta e envolve a semente. A semente é coberta por uma película prateada, que é separada da semente no processo de torração (Figura 4).

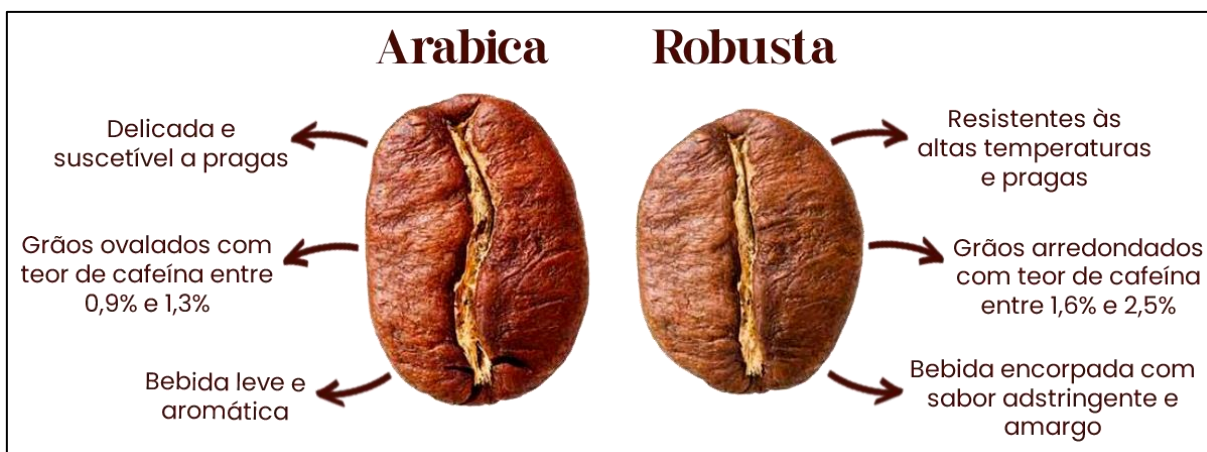
Figura 4 – Composição anatômica do fruto do café



Fonte: Autor (2023), adaptado de Monteiro (2022).

O café faz parte da família botânica *Rubiaceae*, do gênero *Coffea*, que possui pelo menos 25 espécies importantes, cultivadas para o consumo, ao redor do mundo. Contudo, apenas duas dessas espécies são comercializadas em grande escala, sendo elas: *Coffea arabica*, que fornece o café arábica e representa 60% da produção mundial; e *Coffea canephora*, que origina o café robusta (Teixeira, 2018; Martins, 2012; Monteiro, 2022). A Figura 5 elucida algumas diferenças características das espécies.

Figura 5 – Diferenças entre o grão do café arábica e robusta



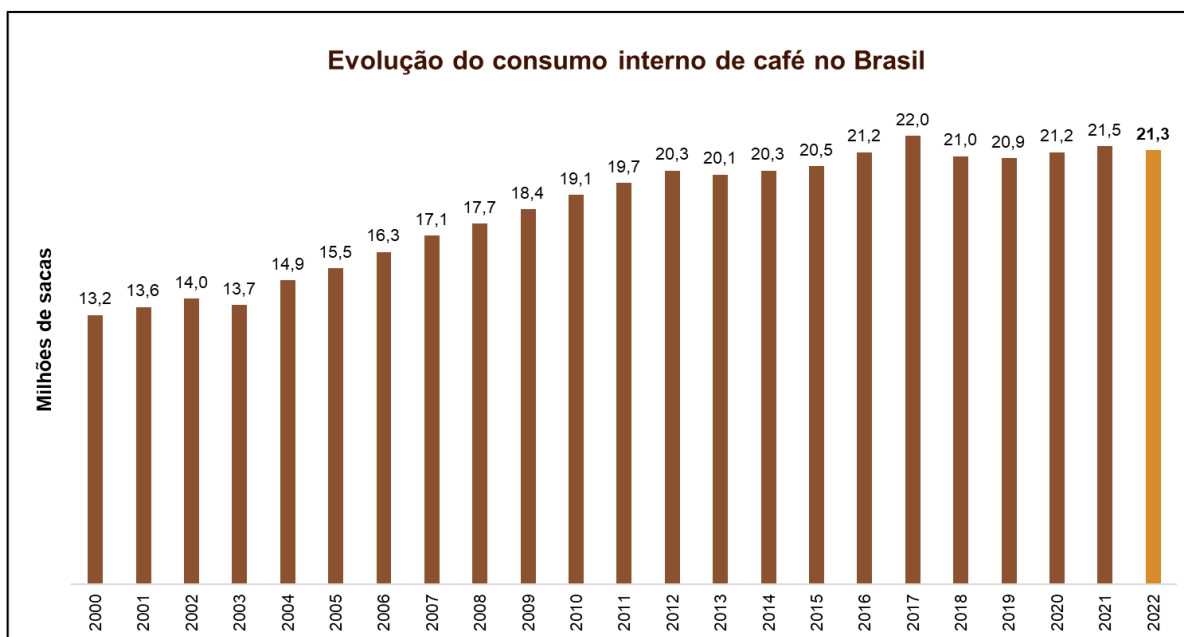
Fonte: Autor (2023), adaptado de Revista AgroRondônia (2019).

2.1.3 Perspectivas de mercado

O café é o segundo produto mais valioso produzido pelos países em desenvolvimento, depois do petróleo (Tucker, 2017). Segundo dados Organização Internacional do Café, a produção dessa *commodity* atingiu o recorde de 170,22 milhões de sacas de 60 kg, na temporada 2018/2019. Ainda, conforme dados da mesma Organização, o consumo global de café tem aumentado a cada ano, atingindo um recorde de 168,1 milhões de sacas nesse período.

Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), o Brasil é o maior produtor e exportador do grão, produzindo 50,92 milhões de sacas e exportando 39,4 milhões delas, principalmente, para os Estados Unidos e a Alemanha.

Ademais, de acordo com indicadores da Associação Brasileira da Indústria de Café (ABIC), somente no ano de 2022, o país registrou um consumo interno total de 21,3 milhões de sacas de 60 kg (Figura 6), sendo 20,3 milhões de café torrado/moído e 1 milhão da indústria de café solúvel, estimando um consumo *per capita* de 4,77 kg/habitante ano. Dessa maneira, o Brasil ocupa a posição de segundo maior consumidor de café mundialmente, atrás apenas dos Estados Unidos.

Figura 6 – Evolução do consumo interno de café no Brasil

Fonte: Autor (2023), adaptado de ABIC (2023).

2.1.4 Borra de café

O café é uma bebida consumida globalmente, logo a sua preparação varia de acordo com a região e com preferências individuais. Dessa maneira, existem variadas formas de preparar o líquido, através de filtragem, infusão e percolação, além da dissolução na variável solúvel. Nessa perspectiva, a quantidade e o tipo de resíduos gerados variam de acordo com a metodologia utilizada no preparo (Silva *et al.*, 2021).

Nesse sentido, nos métodos filtrados, o material residual obtido durante o tratamento do pó de café com água quente é denominado borra de café (Figura 7) (Ballesteros; Teixeira; Mussatto, 2014). Segundo os resultados de Silva *et al.* (2021), cerca de 85% do pó de café utilizado na extração da bebida é retido no filtro, sendo convertido em borra e descartado no meio ambiente.

Nesse contexto, se esses resíduos continuarem sendo lançados no ambiente, de maneira descontrolada, eles podem causar um desequilíbrio ambiental severo, já que possuem elevadas concentrações de compostos orgânicos, como os ácidos graxos, lignina, celulose, hemicelulose e outros polissacarídeos (Castro, 2009; Batista Júnior, 2017 *apud* Moura *et al.*, 2016).

Figura 7 – Borra de café retida em filtro de papel



Fonte: Café Jandaia (2023).

2.2 Pirólise

A pirólise é definida como um processo de degradação endotérmico realizado numa atmosfera parcialmente ou totalmente isenta de oxigênio, sob altas temperaturas, variando entre 500 e 800 °C. Em geral, esse processo gera produtos recicláveis, incluindo carvão, óleo e gases combustíveis, sendo possível otimizar as condições do procedimento para aumentar o volume de produção de cada um deles (Arenas, 2019; Chen *et al.*, 2014; Pedroza, 2011).

Nesse contexto, existem diferentes tipos de pirólise, com diferentes objetivos, condições e resultados. As variáveis que diferenciam esses processos são: taxa de aquecimento, temperatura, tempo de residência na fase sólida e gasosa e produtos almejados (Pedroza, 2011). Dessa maneira, esses procedimentos de degradação térmica podem ser divididos em categorias, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Variantes e variáveis do processo de pirólise

Variantes do processo	Tempo de residência	Taxa de aquecimento	Temperatura do processo (°C)	Produtos obtidos
Carbonização	Horas ou dia	muito baixa	400 à 450	Carvão vegetal
Convencional	5 à 30 min	baixa	até 600	Bio-óleo, carvão e gás
Rápida	0,5 à 5 s	média	500 à 550	Bio-óleo
Flash-líquido	menor que 1 s	alta	menor que 650	Bio-óleo
Flash-gás	menor que 1 s	alta	maior que 650	Gás combustível
Ultra-rápida	menor que 0,5 s	muito alta	1000	Produtos químicos e gás combustível
Vácuo	2 à 30 s	média	400	Bio-óleo
Metano-pirólise	menor que 10 s	alta	maior que 700	Produtos químicos
Hidro-pirólise	menor que 10 s	alta	maior que 500	Bio-óleo e produtos químicos

Fonte: Autor (2023), adaptado de Gómez (2002 *apud* Bridgwater, 1991).

Dessa maneira, a pirólise como forma de transformação de biomassas é uma alternativa interessante, se comparada com outras destinações de resíduos sólidos, já que a dimensão de uma usina pirolítica é mais flexível. Ademais, essa opção está recebendo cada vez mais atenção em pequenas cidades, pois evita o transporte de longa distância dos resíduos. Nas grandes cidades, também há demanda por novos métodos de descarte, devido à crescente dificuldade em encontrar novos locais para incineradores e aterros sanitários (Chen *et al.*, 2014).

2.3 Carvão ativado e suas propriedades adsorventes

O carvão ativado é um material composto majoritariamente por carbono, que apresenta um elevado grau de porosidade e grandes áreas superficiais entre suas partículas. Eles são obtidos através da decomposição térmica de uma variedade de materiais carbonáceos (com alto teor de carbono), como as biomassas provenientes da madeira, casca de coco e casca de nozes, por exemplo. Nesse contexto, as propriedades do produto final dependem da natureza da matéria-prima utilizada (Çeçen; Aktas, 2011; Bansal; Goyal, 2005).

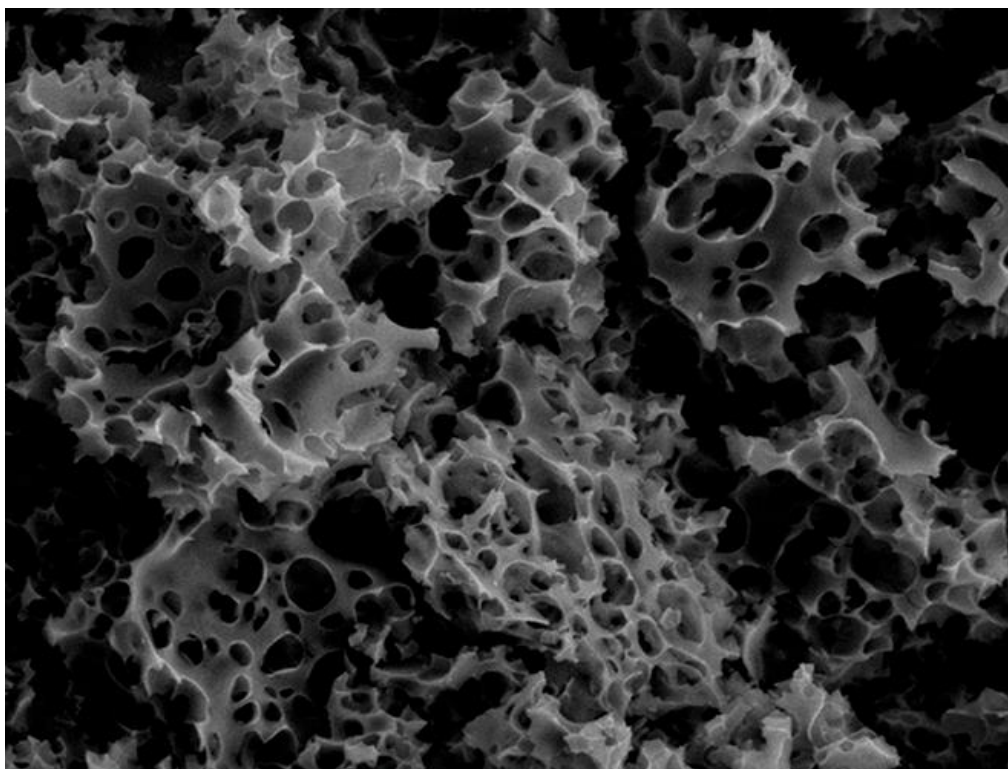
Um dos primeiros usos dessa substância à base de carbono foram em aplicações médicas, utilizando o carvão preparado a partir de madeira carbonizada

como adsorvente, conforme descrito pelos gregos em um papiro encontrado em Tebas datado de 1550 a.C. Posteriormente, os gregos ampliaram seu uso para filtrar água, a fim de eliminar maus odores e sabores, além de prevenir doenças (Luna *et al.*, 2006).

Nesse sentido, os carvões ativados são adsorventes únicos e versáteis, sendo amplamente utilizados como um método eficaz de separação física, com o objetivo de eliminar ou diminuir a concentração de uma vasta gama de poluentes, orgânicos ou inorgânicos, dissolvidos em um efluente, removendo odor, cor e sabor indesejáveis (Ansari; Mohammad-Khah, 2009; Bansal; Goyal, 2005).

A porosidade, proveniente da estrutura molecular (Figura 8), do carvão ativado é a principal responsável por conferir suas características adsorptivas. Nessa perspectiva, a adsorção é um processo pelo qual uma substância (adsorbato) adere à superfície de um sólido (adsorvente), como o carvão ativado. Esse processo é desencadeado por forças insaturadas nessa camada externa, que podem formar ligações com o adsorbato. Assim, quando os compostos desejados colidem com a extensão adsorvente, elas são atraídas por essas forças e permanecem na superfície sólida (Marsh; Reinoso, 2006; Hu; Xu, 2020; Noble; Terry, 2004).

Figura 8 – Carvão ativado visto por microscópio



Fonte: Meio Bit (2023).

Os carvões ativos são principalmente e quase exclusivamente preparados pela pirólise de matéria-prima carbonácea em temperaturas inferiores a 1.000 °C. Os formatos mais produzidos e utilizados desse material são na forma em pó ou na forma granular (Figura 9) (Bansal; Goyal, 2005).

Figura 9 – Formatos mais usuais de carvão ativado



Fonte: Autor (2023), adaptado de SNatural Ambiente (2023).

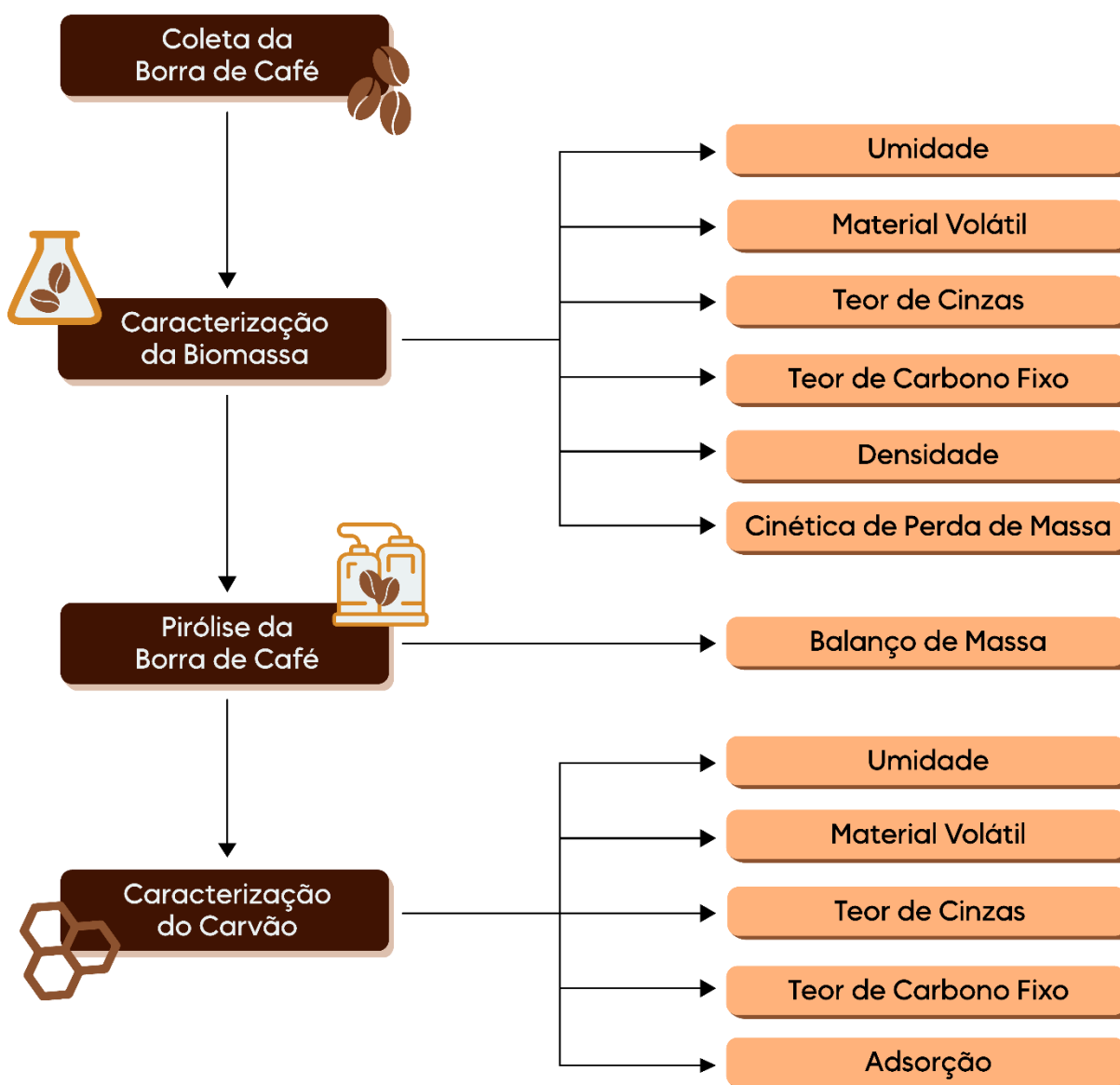
Nos últimos anos, esse composto tem sido cada vez mais utilizado para a prevenção e controle da poluição do ar e da água. Seu consumo é mais elevado no Japão e nos Estados Unidos, possuindo um consumo anual *per capita* de 0,5 e 0,4 kg/hab, respectivamente. No Brasil, as biomassas mais alocadas para a produção do carvão ativado são as madeiras e o endocarpo do coco-da-baía. Porém, o país encontra-se em escassez de matéria-prima para a produção desse ativo, possuindo uma capacidade de produção inferior à demanda nacional (Werlang *et al.*, 2013; Bansal; Goyal, 2005).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

As ações que foram realizadas neste estudo estão situadas de forma lógica e sequencial na Figura 10. As experimentações foram desenvolvidas no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN), localizado no Instituto Federal do Tocantins (IFTO), no Campus Palmas.

Os experimentos foram conduzidos baseados em normas e metodologias reconhecidas, como as da Sociedade Americana para Ensaio e Materiais (*American Society for Testing and Materials – ASTM*, em inglês).

Figura 10 – Fluxograma contendo os testes e experimentos a serem realizados

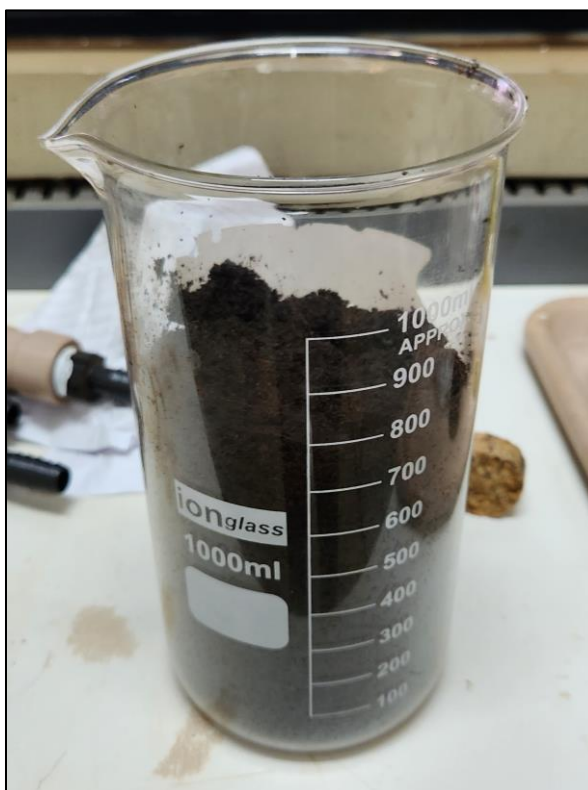


Fonte: Autor (2023)

3.1 Coleta do material

Com o intuito de causar um impacto ambiental imediato, o resíduo coletado (Figura 11) foi proveniente do descarte diário de rejeito de café filtrado, da lanchonete “Cantinho de Casa” estabelecida no Instituto Federal do Tocantins (IFTO), campus Palmas.

Figura 11 – Borra de café coletada



Fonte: Autor (2023).

3.2 Caracterização da biomassa

Com o intuito de caracterizar a biomassa estudada (borra de café), alguns procedimentos foram feitos para obter essas características, como: análise imediata, densidade e análise cinética de perda de massa. O material inicialmente passou por uma secagem em estufa à 50 °C, com o objetivo de remover o excesso de umidade intrínseco à borra de café, decorrente da sua origem.

3.2.1 Análise imediata

A análise imediata equivale aos experimentos para determinar o teor de umidade, teor de cinzas, teor de material volátil e teor de carbono fixo. Os ensaios foram realizados em triplicata.

3.2.1.1 Umidade

A determinação do teor de umidade do material foi feita de acordo com a norma ASTM D3173-87. Nesse sentido, uma amostra com cerca de 1 g foi colocada dentro de um cadinho de porcelana, sendo registrados seus pesos iniciais. O recipiente foi inserido em uma estufa modelo SP-200 (Figura 12) a uma temperatura de 105 °C durante o período de 1 hora.

Figura 12 – Estufa modelo SP-200



Fonte: Autor (2023).

Após esse tempo, o receptáculo foi retirado da estufa e transferido para um dessecador (Figura 13), local onde permaneceu por 15 minutos, sendo pesado após esse intervalo. Com os dados em mãos, a Equação 1 foi aplicada para obter o percentual de umidade.

$$Umidade (\%) = \left(\frac{p-p'}{a} \right) \times 100 \quad (Equação 1)$$

Onde:

p = peso próprio do cadinho + peso da amostra inicial (em gramas);

p' = peso próprio do cadinho + peso da amostra pós aquecimento em estufa (em gramas);

a = peso da amostra inicial (em gramas).

Figura 13 – Dessecador



Fonte: Autor (2023).

3.2.1.2 Material volátil

Seguindo o método aplicado por Batista Júnior (2017) e a norma ASTM D3175-07, para aferir o teor de material volátil da borra de café, a parcela do material previamente seca, ainda alocada no cadinho de porcelana, foi inserida em um forno tipo mufla (Figura 14).

Figura 14 – Forno tipo mufla aquecido com cadinhos em seu interior



Fonte: Autor (2023).

Essa amostra foi aquecida à 850 °C durante 7 minutos e seu peso aferido após esse processo. Para determinar o teor, em porcentagem, de material volátil, foi utilizada a Equação 2.

$$\text{Material volátil (\%)} = \left(\frac{p-p'}{a} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

p = peso próprio do cadinho + peso da amostra inicial (em gramas);

p' = peso próprio do cadinho + peso da amostra pós aquecimento em forno (em gramas);

a = peso da amostra inicial (em gramas).

3.2.1.3 Teor de cinzas

Seguindo as recomendações da norma ASTM D3174-04, para aferir o teor de cinzas da biomassa, a fração dela restante no cadinho de porcelana, foi introduzida em um forno mufla (Figura 15) por 1 hora, à uma temperatura de 710 °C.

Figura 15 – Forno mufla com cadinhos no interior



Fonte: Autor (2023).

Posteriormente, o recipiente foi removido do forno realocado para um dessecador durante outra 1 hora, sendo pesado após esse tempo. Com essas informações disponíveis, foi usada a Equação 3 para calcular a porcentagem.

$$\text{Teor de cinzas (\%)} = \left(\frac{p' - p_0}{a} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

p' = peso próprio do cadinho + peso da amostra pós aquecimento em forno (em gramas);

p_0 = peso próprio do cadinho (em gramas);

a = peso da amostra inicial (em gramas).

3.2.1.4 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi determinado por diferença, aplicando os resultados dos outros ensaios descritos anteriormente, seguindo a Equação 4.

$$Tcf (\%) = 100 - [Umidade(\%) - Material volátil(\%) - Teor de cinzas (\%)]$$

(Equação 4)

3.2.2 Densidade

Para determinar a densidade do resíduo sólido (borra), uma proveta de 100 mL foi vinculada à uma balança de precisão (Figura 16), com o intuito de tarar o seu peso.

Figura 16 – Proveta em balança de precisão



Fonte: Autor (2023).

Após esse procedimento, parcelas da biomassa foram colocadas progressivamente na proveta e seus pesos anotados, nos intervalos de volume correspondentes a 20, 40, 60, 80 e 100 mL. Com esses dados, a densidade média do elemento foi estimada através da Equação 5.

$$\text{Densidade (g/mL)} = \frac{m}{v} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

m = massa (em gramas);

v = volume (em mL).

3.2.3 Cinética de perda de massa

Com o intuito de determinar a quantidade relativa de perda de massa do material estudado com o processo de secagem em estufa da amostra, foram colocadas duas amostras de borra de café, de cerca de 10 gramas, em cadinhos de porcelana separados. Esses cadinhos foram pesados, vazios e com os resíduos, em uma balança de precisão modelo L1002i (Figura 17), a fim de determinar seus pesos iniciais.

Figura 17 – Balança de precisão modelo L1002i



Fonte: Autor (2023).

Nesse contexto, esses recipientes contendo o material foram levados à estufa de secagem, modelo SP-200, sob uma temperatura de 50 °C e lá permaneceram por uma hora. Após esse período, a massa dos cadinhos, após resfriamento em dessecador, foi aferida e eles retornaram à estufa por mais uma hora. Esse processo se seguiu por 4 horas, anotando os dados para análise.

3.3 Pirólise do material

Neste estudo, foram realizados dois procedimentos de pirólise com temperaturas distintas, sendo elas 550 °C e 650 °C. Ambos os experimentos foram processados por 30 minutos nas temperaturas propostas, com uma taxa de aquecimento de 30 °C por minuto.

O material que sofreu o processo de pirólise foi alocado, já previamente seco em estufa a 50 °C, em uma barca metálica e pesado em uma balança analítica, assim como a barca vazia, com o intuito de aferir a massa de resíduo a ser pirolisada e analisar o rendimento. Após isso, esse recipiente contendo a amostra foi inserido em um reator termoeletrônico (Figura 18), do modo mais centralizado possível, a fim de garantir uma uniformidade no procedimento.

Figura 18 – Reator termoeletrônico utilizado nos processos de pirólise



Fonte: Autor (2023).

Antes do início da conversão térmica, foi preciso configurar o equipamento termoelétrico, inserindo as características desejadas, como a temperatura e taxa de aquecimento da matéria, além do tempo de permanência da biomassa no reator. Ademais, foi definida a potência da autoclave vertical (Figura 19), responsável por produzir o vapor d'água que foi empregado como gás de arraste no procedimento pirolítico. A Figura 20 revela os aparelhos que trabalharam no sistema de pirólise.

Figura 19 – Autoclave vertical



Fonte: Autor (2023).

Figura 20 – Equipamentos envolvidos na pirólise



Fonte: Autor (2023).

3.3.1 Balanço de Massa e Rendimento

O balanço de massa de entrada e saída do processo pirolítico foi baseado no princípio da Lei de Conservação de Massa, popularizada pelo químico Antoine Lavoisier. Nesse sentido, foi aferido o peso de biomassa que entrará no reator e o peso do carvão obtido após o procedimento, calculando o balanço de massa (Equação 6) e o rendimento (Equação 7).

$$M_c = M_e - M_s \quad (\text{Equação 6})$$

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{M_c}{M_e} * 100 \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

M_c = massa do carvão (em gramas);

M_e = massa de entrada (em gramas);

M_s = massa de saída (em gramas);

3.4 Caracterização do carvão

O carvão ativado que foi obtido após o processo de pirólise, passou por uma caracterização semelhante à da biomassa, conforme os métodos elencados a seguir.

3.4.1 *Análise imediata*

3.4.1.1 Umidade

O teor de umidade foi determinado conforme o exposto no item 3.2.1.1, seguindo as recomendações da norma ASTM D3173-87.

3.4.1.2 Material volátil

O teor de material volátil foi definido de acordo com o item 3.2.1.2 e as instruções da norma ASTM D3175-07.

3.4.1.3 Teor de cinzas

O teor de cinzas foi aferido seguindo o item 3.2.1.3 e as orientações da norma ASTM D3174-04.

3.4.1.4 Teor de carbono fixo

A determinação do teor de carbono fixo seguiu a metodologia previamente exposta no item 3.2.1.4.

3.4.2 *Adsorção*

O teste de adsorção foi realizado com o carvão ativado proveniente da pirólise da borra de café na temperatura de 650 °C e taxa de aquecimento igual a 30 °C/min, na forma de pó, com granulometria de 0,45 mm. Para mensurar a capacidade adsortiva desse carvão produzido, foi empregado a solução corante Azul de Metileno em distintas concentrações, com um volume padrão de 30 mL, associadas a diferentes massas de carvão ativado.

Para determinar esses valores distintos e conduzir o estudo, o experimento foi desenvolvido com o auxílio do *software* “Protimiza Experimental Design”, de autoria

de Maria Isabel Rodrigues e Paulo Costa, sendo planejado com base na metodologia denominada Delineamento de Faces Centradas (DFC). Esse método permite avaliar dados em um espaço multidimensional de forma otimizada, estudando a relação entre as variáveis dependentes (respostas) e as variáveis independentes: massa do carvão (X_1) e concentração de corante (X_2).

Nesse método, para otimizar a avaliação, os fatores são codificados em três níveis: (-1) (0) e (+1). Esses códigos representam os níveis mínimo, médio e máximo, que serão utilizados no teste, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Variáveis independentes e sua codificação

Fatores	Unidade	Níveis		
		-1	0	+1
Massa de carvão (X_1)	g	0,40	0,60	0,80
Concentração do corante (X_2)	mg/L	20	60	100

Fonte: Autor (2023).

O número de experimentos necessários para a análise foi estipulado com a ajuda do programa, instituindo o número de repetições genuínas igual a 1 e o número de pontos centrais igual a 3, totalizando 11 experimentações, englobando todas as combinações de níveis possíveis, além dos três pontos centrais. Desse modo, os frascos de Erlenmeyer foram numerados e preenchidos (Figura 21), seguindo a Tabela 3.

Figura 21 – Frascos sendo preparados para o experimento

Fonte: Autor (2023).

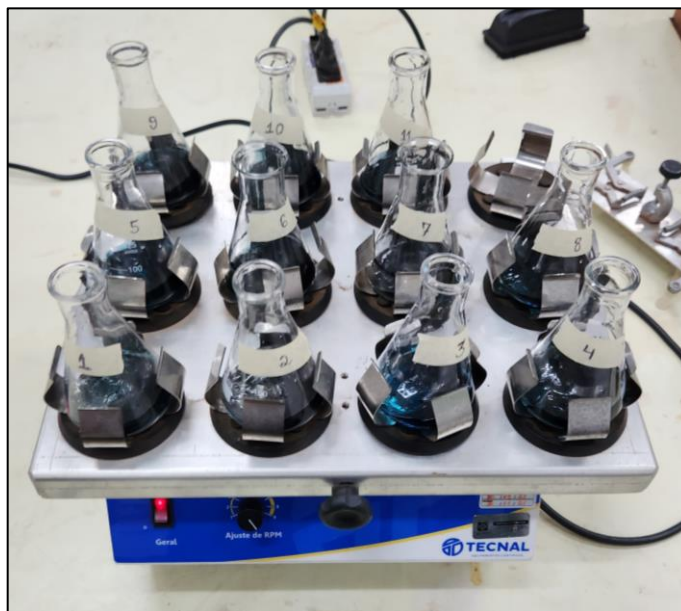
Tabela 3 – Experimentos propostos pela metodologia DFC

Experimentos	Níveis decodificados		Níveis codificados	
	Massa de carvão (g)	Concentração do corante (mg/L)	X ₁	X ₂
1	0,40	20	-1	-1
2	0,80	20	+1	-1
3	0,40	100	-1	+1
4	0,80	100	+1	+1
5	0,40	60	-1	0
6	0,80	60	+1	0
7	0,60	20	0	-1
8	0,60	100	0	+1
9	0,60	60	0	0
10	0,60	60	0	0
11	0,60	60	0	0

Fonte: Autor (2023).

O ensaio foi realizado em uma mesa agitadora orbital modelo “Shaker TE 141” (Figura 22), durante 30 minutos com uma rotação igual a 30 rpm.

Figura 22 – Mesa agitadora orbital modelo “Shaker TE 141”



Fonte: Autor (2023).

Após o processo de agitação, os conteúdos dos recipientes foram despejados em funis de vidro com papel filtro qualitativo (Figura 23), com intuito de realizar a filtração, separando as partículas de carvão e o azul de metileno já adsorvido.

Figura 23 – Processo de filtração da substância adsorvida



Fonte: Autor (2023).

Posteriormente, esse líquido filtrado foi analisado em um espectrofotômetro (Figura 24), que mede a absorbância da substância em relação a um determinado comprimento de onda, que no caso do corante azul é de 660 nm.

Com a absorbância medida e com o auxílio de uma curva de calibração padrão do aparelho, expressa pela Equação 8, foi possível determinar a absorbância calibrada das 11 experimentações.

$$y = 0,1768x - 0,1006 \quad (\text{Equação 8})$$

Figura 24 – Espectrofotômetro



Fonte: Autor (2023).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização da Biomassa

Com intuito de caracterizar a biomassa, foi feito a análise imediata, o estudo da densidade e um ensaio de cinética de perda de massa, cujos resultados serão apresentados e discutidos adiante.

4.1.1 Análise imediata

Os dados iniciais referentes aos pesos próprios dos cadinhos (p_0) e das amostras da biomassa (a), além de seus somatórios (p), estão dispostos na Tabela 4. Ademais, também estão expostos na Tabela 4, o peso do cadinho em conjunto com a biomassa após o teste de umidade (p'_{105}), o ensaio de teor de material volátil (p'_{850}) e o ensaio de teor de cinzas (p'_{710}).

Tabela 4 – Dados dos pesos iniciais e finais dos ensaios da biomassa

Nº amostra	p_0 (g)	Amostra (g)	p (g)	p'_{105} (g)	p'_{850} (g)	p'_{710} (g)
A1	32,0151	1,0049	33,0200	32,9707	32,1016	32,0181
A2	36,4459	1,0080	37,4539	37,4070	36,5660	36,4567
A3	34,7517	1,0057	35,7574	35,6995	34,8624	34,7630

Fonte: Autor (2023).

Com esses valores em mãos, seguindo a metodologia expressa neste trabalho, encontrou-se os resultados dos testes de análise imediata da borra de café (Tabela 5), utilizando do valor médio como parâmetro final dos experimentos.

Tabela 5 – Resultados da análise imediata da biomassa

Nº amostra	Umidade (%)	Material Volátil (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)
A1	4,9060	86,4862	0,2985	8,3093
A2	4,6528	83,4325	1,0714	10,8433
A3	5,7572	83,2356	1,1236	9,8837
Valores médios (%)	5,1053	84,3848	0,8312	9,6787

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 6 traz um comparativo dos resultados deste estudo com outros trabalhos da literatura inseridos em contextos semelhantes, a fim de validar a consistência dos dados, identificando padrões, tendências ou até discrepâncias.

Tabela 6 – Comparativo entre trabalhos de análise imediata da biomassa

Biomassa	Referência	Umidade (%)	Material Volátil (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)
	Autor (2023)	5,1053	84,3848	0,8312	9,6787
Borra de café	Batista Júnior (2017)	9,76	77,06	3,00	10,18
	Li; Strezov; Kan (2014)	8,10	82,00	1,70	16,30
	Bok <i>et al.</i> (2012)	1,31 ^(*)	77,51	1,35	19,83
Borra de café solúvel	Boligon (2015)	21,00	81,00	0,78	19,00

(*) A borra passou por secagem em estufa a 115 °C durante 24 horas, tempo superior ao estudado.

Fonte: Autor (2023).

Dessa forma, nota-se que os resultados vistos neste trabalho possuem similaridades com outros encontrados em bibliografias paralelas, evidenciando um alto teor de voláteis (84,38%), com um baixo teor umidade (5,11%) e de cinzas (0,83%).

Segundo Uzakov, Davlonov e Holikov (2018), um alto teor de umidade das matérias-primas leva a um aumento no consumo de energia para processamento térmico da biomassa. Conforme Almeida (2008), os teores de umidade adequados para transformações termoquímicas são inferiores a 10%.

Já, de acordo com Castro (2009), um baixo teor de cinzas é uma característica muito desejada em um bom precursor de carvões ativados.

Assim, os resultados obtidos são satisfatórios, pois a biomassa apresentou características padronizadas e recomendadas pela literatura.

4.1.2 Densidade

O ensaio de densidade transcorreu de acordo com os procedimentos metodológicos indicados, tendo os seus resultados expostos na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de densidade da biomassa

Massa (g)	Volume (mL)	Densidade (g/mL)
29,57	20	1,48
40,15	40	1,00
50,71	60	0,85
59,27	80	0,74
68,78	100	0,69
Densidade média (g/mL)		0,95

Fonte: Autor (2023).

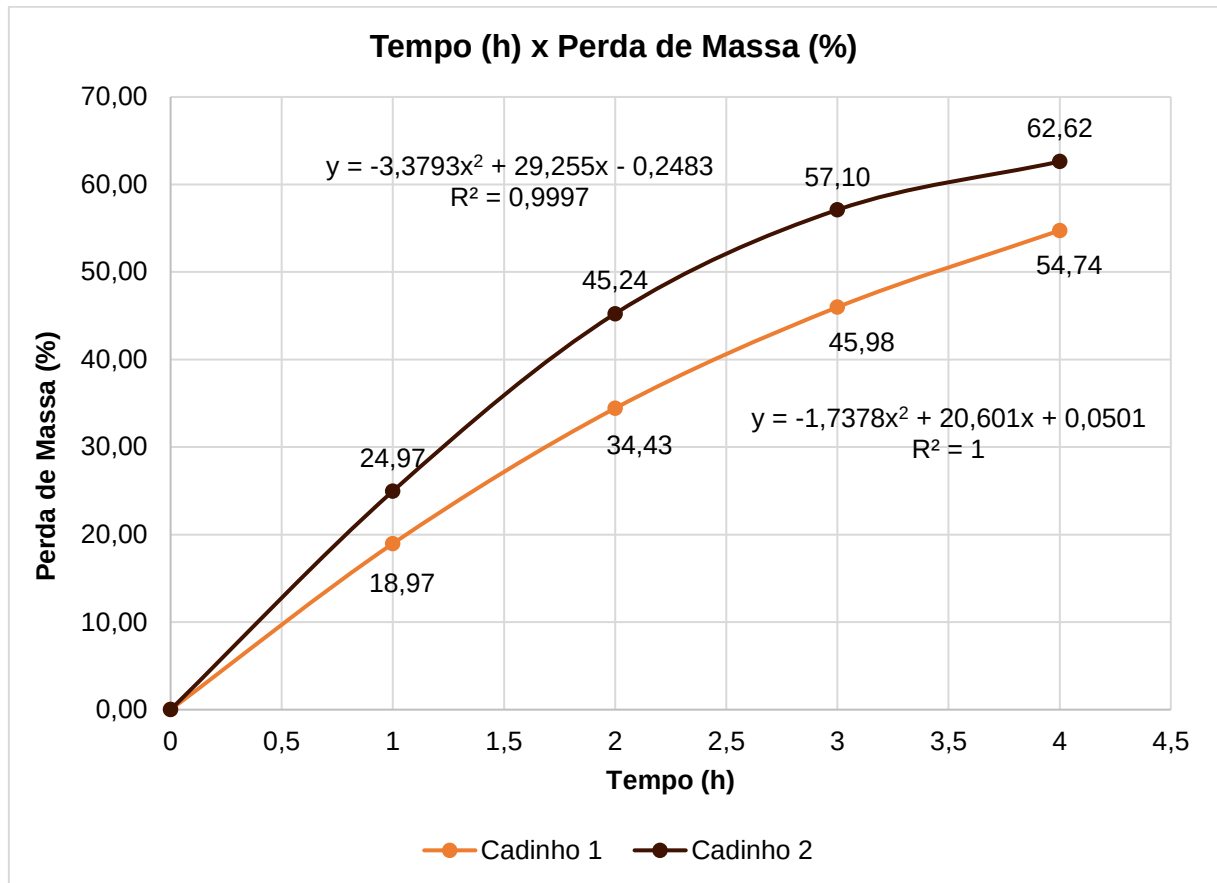
Santos (2009), em seu estudo, encontrou 1,05 g/mL para a densidade da borra de café. Rocha (2019) também realizou uma análise de densidade da mesma biomassa, chegando ao valor de 1,10 g/mL.

Nessa perspectiva, a densidade média encontrada de 0,95 g/mL é similar às encontradas na literatura. Percebe-se que a medida em que a borra era adicionada, uma menor quantidade de massa ocupava um maior volume, isso pode ter ocorrido devido ao acúmulo de vazios durante a alocação da biomassa.

4.1.3 Cinética de perda de massa

Os resultados do ensaio de cinética de perda de massa estão apresentados no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Resultados da cinética de perda de massa



Fonte: Autor (2023).

Utilizando os dados observados, foi desenvolvido um modelo quadrático para cada cadinho, com o auxílio do programa *Excel*, para descrever o comportamento da borra de café no estudo de perda de massa ao longo do tempo em estufa. Foram encontradas duas equações com coeficientes de determinação (R^2) satisfatórios, sendo de 1,0 para o primeiro cadinho e de 0,9997 para o segundo.

Assim, foram estimados os pontos máximos dos modelos de segundo grau, para aferir a porcentagem e o tempo nos quais a perda de massa se estabilizou, chegando a 61,10% em 5,93 h para o Cadinho 1 e 63,07% em 4,33 h para o Cadinho 2, inferindo, assim, um teor médio aproximado de 62% em 5 horas.

4.2 Rendimento do Carvão Ativado da Borra de Café

Após os processos de pirólise, o peso de carvão produzido foi obtido por diferença entre os pesos de entrada e saída dos procedimentos, analisando o rendimento, conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Rendimento do carvão ativado 550 °C e 650 °C

Descrição	Carvão 550 °C	Carvão 650 °C
Peso barca (g)	189,17	189,00
Peso barca + borra (g)	219,41	229,00
Peso borra (g)	30,24	40,00
Peso barca + carvão (g)	195,57	198,00
Peso carvão (g)	6,40	9,00
Rendimento (%)	21,16	22,50

Fonte: Autor (2023).

Desse modo, percebe-se que o processo de pirólise a 550 °C produziu 6,40 g de carvão ativado, sendo a massa de entrada da borra de café igual a 30,24 g, apresentando, assim, um rendimento de 21,16%. Já o carvão produzido a 650 °C teve uma massa de 9 g, a partir de 40 g de biomassa inserida, resultando em 22,50% de rendimento.

Esses valores encontrados se assemelham ao de Teixeira (2018), que realizou 27 pirólises da borra de café em diferentes condições, encontrando um rendimento médio de 19%. Boligon (2015) obteve um aproveitamento de 22,56%, a partir de borra de café solúvel.

Assim, é perceptível que a eficiência produtiva encontrada neste trabalho é compatível com a literatura analisada. Dessa forma, com o rendimento médio constatado e com a análise da perda de massa, uma tonelada de borra de café em base úmida produziria 380 kg de biomassa em base seca, que, por sua vez, seria capaz de gerar cerca de 80 kg de carvão ativado produzido a 550 °C ou 85,5 kg de carvão processado a 650 °C.

4.3 Caracterização do carvão

4.3.1 Análise imediata

De forma análoga ao feito com a biomassa, os carvões ativados produzidos em nas duas temperaturas passaram pelos testes de análise imediata, sendo expostos na Tabela 9, os dados de entrada e os resultados de saída de cada um desses ensaios, que também foram produzidos em triplicata.

Tabela 9 – Dados dos pesos iniciais e finais dos ensaios dos carvões ativados

Carvão	Nº amostra	p₀ (g)	Amostra (g)	p (g)	p'₁₀₅ (g)	p'₈₅₀ (g)	p'₇₁₀ (g)
Carvão 550 °C	B1	33,4879	1,0051	33,0200	34,4462	34,1494	33,5328
	B2	33,9460	1,0119	37,4539	34,9098	34,6046	33,9908
	B3	33,1589	1,0061	35,7574	34,1136	33,8133	33,2013
Carvão 650 °C	C1	43,2535	0,7247	43,9782	43,9443	43,7022	43,2874
	C2	33,4458	0,5002	33,9460	33,9248	33,7278	33,4690
	C3	33,7351	0,7167	34,4518	34,4179	34,2183	33,7705

Fonte: Autor (2023).

Após os testes, aferiu-se, através da metodologia proposta, os valores característicos do carvão produzido a partir da pirólise a 550 °C e 650 °C (Tabela 10), admitindo o valor médio entre as três amostras como a característica final de cada um.

Tabela 10 – Resultados da análise imediata dos carvões ativados

Carvão	Nº amostra	Umidade (%)	Material Volátil (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)
Carvão 550 °C	B1	4,6563	29,5294	4,4672	61,3471
	B2	4,7534	30,1611	4,4273	60,6582
	B3	5,1088	29,8479	4,2143	60,8289
Valores médios (%)		4,8395	29,8461	4,3696	60,9447
Carvão 650 °C	C1	4,6778	33,4069	4,6778	57,2375
	C2	4,2383	39,3842	4,6381	51,7393
	C3	4,7300	27,8499	4,9393	62,4808
Valores médios (%)		4,5487	33,5470	4,7517	57,1525

Fonte: Autor (2023).

Observa-se que com o aumento da temperatura da pirólise, o carvão produzido apresentou uma menor umidade, como esperado.

Para efeito de comparação e análise, a Tabela 11 traz os resultados deste estudo e de outras obras da literatura acadêmica. Os carvões comparados foram produzidos em processos termoquímicos com temperatura entre 500 e 650 °C.

Tabela 11 – Comparativo entre trabalhos de análise imediata de carvões

Precursor	Referência	Umidade (%)	Mat. Volátil (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)
Borra de café	Autor (2023)	4,8395	29,8461	4,3696	60,9447
		4,5487	33,5470	4,7517	57,1525
	Tangmankongworakoon (2019)	4,16	11,89	6,18	77,77
Casca de café	Kiggundu; Sittamukyoto (2015)	4,64	15,08	15,01	61,71
	Setter (2020)	12,98	16,26	15,14	68,59

Fonte: Autor (2023).

Desse modo, os resultados obtidos na análise imediata dos carvões são semelhantes aos encontrados na literatura, inclusive com outra biomassa derivada do café, apresentando um baixo teor de umidade e de cinzas (<5%). Se comparado à biomassa, os carvões apresentaram um baixo teor de voláteis, cerca de 30%, já que boa parte dessas substâncias são volatilizadas durante a pirólise.

De acordo com Silva (2009), é recomendado que se tenha uma baixa umidade no carvão ativado, já que as moléculas de água ocupariam os espaços destinados a adsorção da substância alvo.

Segundo Scroder (2007), a presença de um teor de cinzas excessivo pode prejudicar o carvão, pois pode levar à obstrução dos poros do carvão ativado, reduzindo sua área superficial.

Assim, os resultados da análise imediata são adequados, tanto com relação ao comparativo com outros trabalhos, quanto com relação às recomendações de outros autores.

4.3.2 Teste de Adsorção

Os resultados do teste de adsorção do carvão ativado produzido a 650 °C estão expostos na Tabela 12, sendo constatados a absorbância do filtrado (Y_1), a eficiência de remoção (E) e a razão de adsorção (Q).

Tabela 12 – Resultados do ensaio de adsorção do carvão 650 °C

Exp.	Massa de carvão (g)	Concentração do corante (mg/L)	Absorbância do filtrado	Eficiência de remoção (%)	Razão de adsorção (mg/g)
1	0,40	20	0,09	99,52	1,49
2	0,80	20	0,05	99,70	0,75
3	0,40	100	2,46	97,53	7,32
4	0,80	100	1,07	98,93	3,71
5	0,40	60	1,24	97,92	4,41
6	0,80	60	1,10	98,15	2,21
7	0,60	20	0,04	99,74	1,00
8	0,60	100	1,54	98,45	4,92
9	0,60	60	1,30	97,83	2,93
10	0,60	60	1,14	98,08	2,94
11	0,60	60	0,95	98,41	2,95

Fonte: Autor (2023).

Com a inserção desses dados no programa “Protimiza Experimental Design”, foi possível gerar modelos de regressão linear, para explicar a relação das respostas obtidas com as diferentes massas de carvão e concentração de corante experimentadas.

4.3.2.1 Resposta: Absorbância (Y_1)

Os coeficientes de regressão encontrados para modelar a variável absorbância (Y_1), estão apresentadas na Tabela 13. Essa variável está relacionada com a quantidade de luz, de um determinado comprimento de onda, que é absorvida

pelo filtrado no ensaio de espectrofotometria. Desse modo, é desejável a obtenção de valores mais baixos, que representam uma melhor adsorção.

Tabela 13 – Coeficientes de regressão e valores estatísticos para a absorbância

Nome	Coeficiente	Erro Padrão	t calculado	p-valor
X_1	-0,26	0,08	-3,31	0,0213
X_1^2	0,08	0,12	0,70	0,5169
X_2	0,81	0,08	10,30	0,0001
X_2^2	-0,29	0,12	-2,40	0,0613
$X_1 \cdot X_2$	-0,34	0,10	-3,50	0,0172

Fonte: Autor (2023).

Desse modo, com o auxílio do *software*, determinou-se a equação de regressão (Equação 9) para a absorbância. É importante salientar que para inserir valores reais na equação, eles devem ser codificados proporcionalmente entre os níveis (-1) e (+1).

Logo, o limite amostral para o uso dessa relação, é entre 0,40 e 0,80 g para massa de carvão ativado e, para concentração de azul de metileno, entre 20 e 100 mg/L, não admitindo extrapolações.

$$Y_1 = 1,11 - 0,26 X_1 + 0,08 X_1^2 + 0,81 X_2 - 0,29 X_2^2 - 0,34 X_1 \cdot X_2 \quad (\text{Equação 9})$$

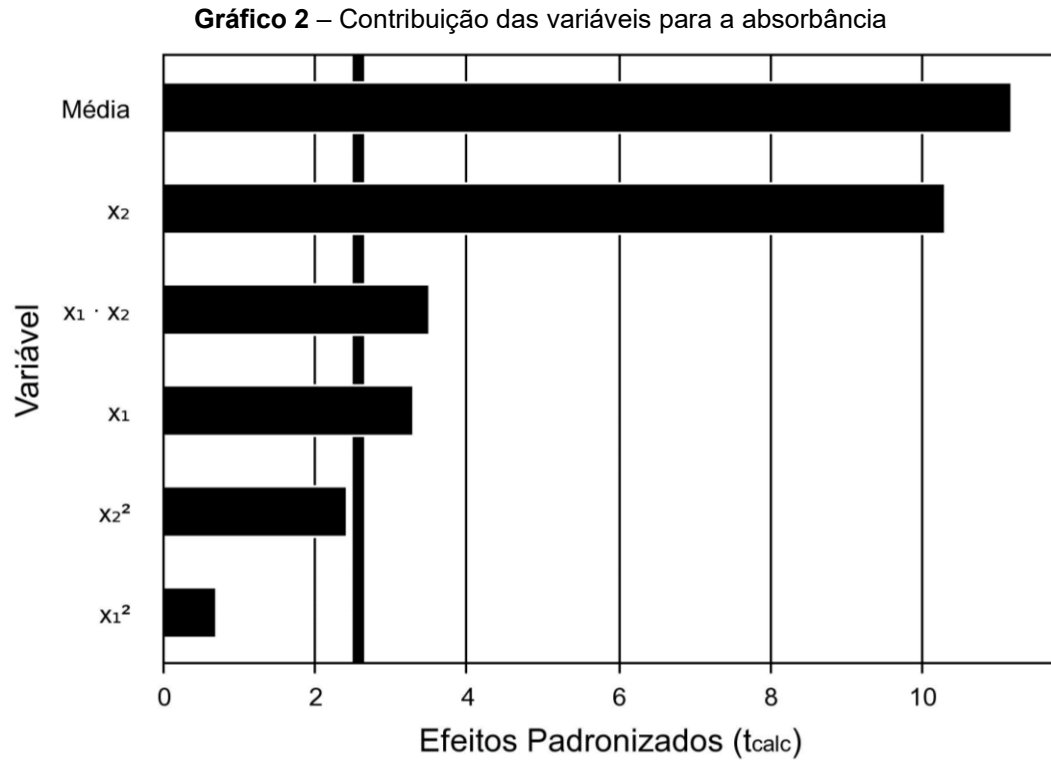
Onde:

Y_1 = absorbância;

X_1 = massa de carvão (codificada);

X_2 = concentração do corante (codificada);

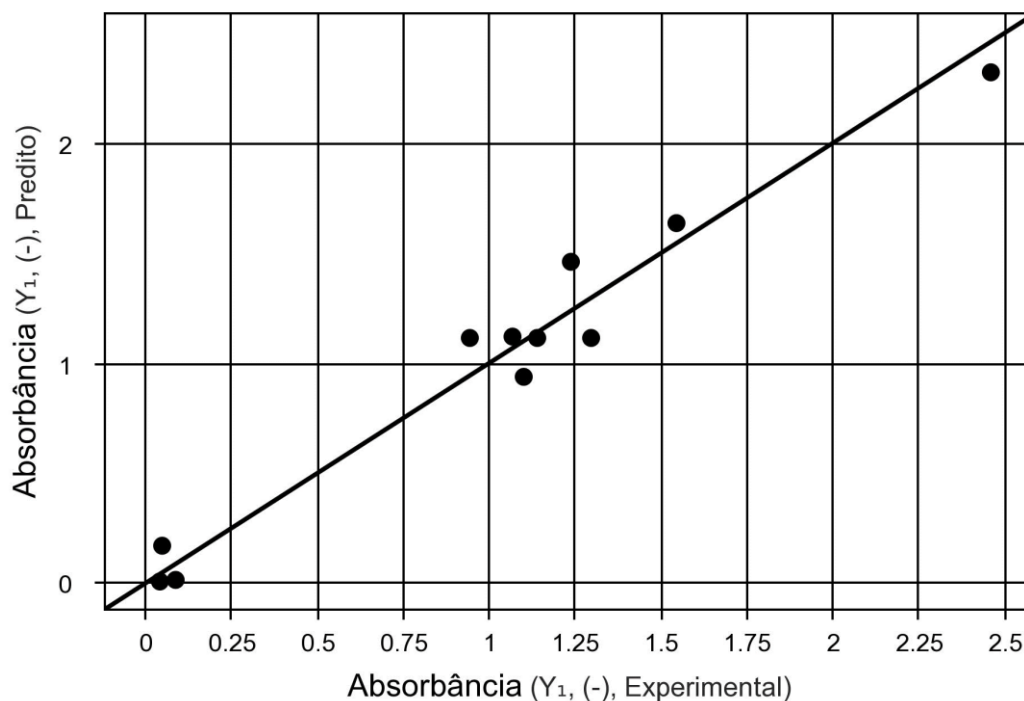
Ademais, foi produzido um gráfico de Pareto (Gráfico 2), no qual é possível enfatizar as variáveis que contribuem mais significativamente para o determinado resultado.



Fonte: Autor (2023).

Dessa forma, é possível notar que, para esta resposta, a variável independente com o coeficiente estatisticamente mais significativo é a concentração do corante (X_2), denotado pelo seu baixo p-valor e pelo Gráfico 2.

O gráfico de predição (Gráfico 3) relaciona os resultados encontrados efetivamente no experimento e os esperados pelo modelo de regressão. Assim, é notório que o modelo obtido possui uma boa aderência estatística, já que os dados observados não estão dispersos, se mantendo próximos a linha diagonal.

Gráfico 3 – Gráfico de predição do modelo da absorbância.

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 14 traz as informações da análise de variância (ANOVA) da absorbância do filtrado.

Tabela 14 – Análise de variância para a absorbância

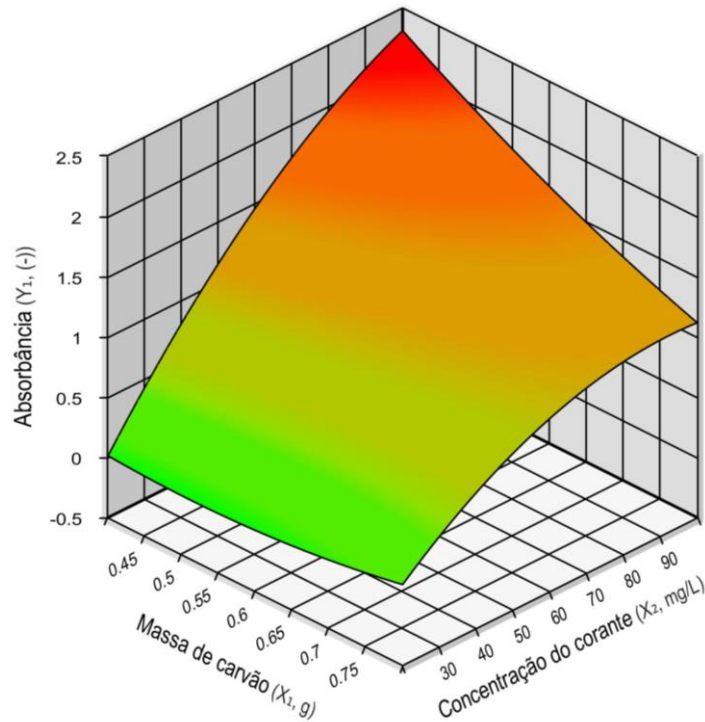
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	5,1	5	1,0	27,0	0,00126
Resíduos	0,2	5	0,0	-	-
Falta de Ajuste	0,1	3	0,0	1,4	0,44779
Erro Puro	0,1	2	0,0	-	-
Total	5,2	10	-	-	-

Fonte: Autor (2023).

Através do teste da análise de variância (ANOVA), obteve-se um coeficiente de determinação (R^2) de 96,43%. Esse valor é satisfatório, já que uma alta porcentagem indica uma maior qualidade de ajuste do modelo, conseguindo explicar a variação dos dados observados.

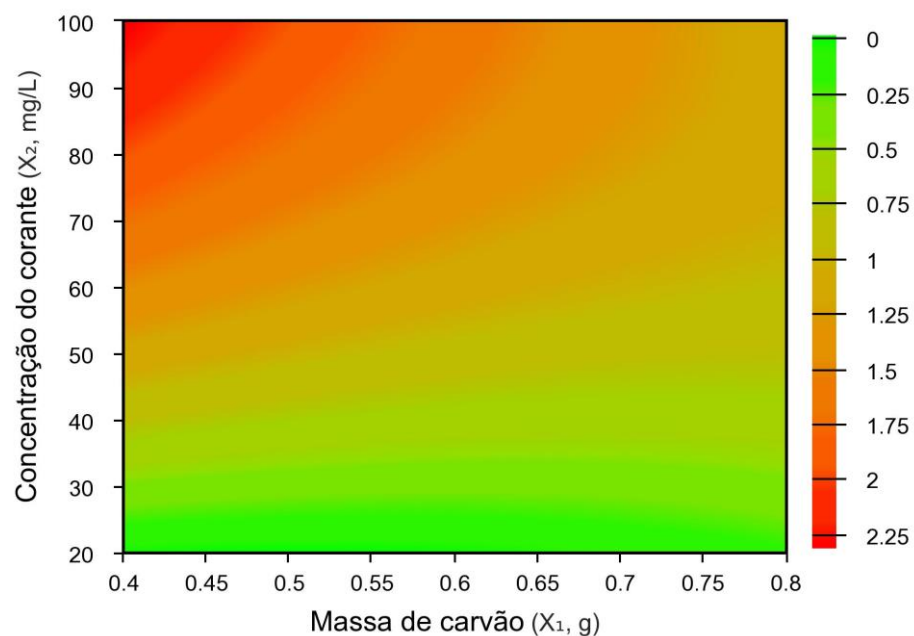
Os Gráficos 4 e 5 apresentam a relação encontrada entre as variáveis: massa de carvão (X_1), concentração do corante (X_2) e a absorbância (Y_1). No gradiente de cores, o verde representa os valores com menor absorbância e o vermelho com maior.

Gráfico 4 – Absorbância em função das variáveis independentes



Fonte: Autor (2023).

Gráfico 5 – Relação Absorbância x Variáveis independentes



Fonte: Autor (2023).

Analisando os gráficos, percebe-se que a absorbância apresentou valores mais elevados quando a concentração do azul de metileno era alta e a massa de carvão ativado era baixa, resultado logicamente adequado. Além disso, é possível visualizar novamente que a concentração do corante é o fator que mais influencia essa resposta encontrada, já que a variação da massa de carvão pouco alterou a absorbância observada, principalmente em baixas concentrações de azul.

4.3.2.2 Resposta: Razão de adsorção (Q)

Na Tabela 15, estão apresentados os regressores descobertos para a produção do modelo relacionado à variável razão de adsorção (Q). Essa métrica está ligada à quantidade de corante retida em cada fração de carvão ativado, que foi separado durante o processo de filtração. Assim, alcançar razões altas é o ideal, pois elas indicam uma eficácia maior de adsorção.

Tabela 15 – Regressores e outros valores estatísticos para a razão de adsorção

Nome	Coeficiente	Erro Padrão	t calculado	p-valor
X_1	-1,09	0,05	-22,11	0,0000
X_1^2	0,36	0,08	4,74	0,0051
X_2	2,12	0,05	42,91	0,0000
X_2^2	0,01	0,08	0,71	0,8746
$X_1 \cdot X_2$	-0,72	0,06	-11,83	0,0001

Fonte: Autor (2023).

Com isso, foi definida a equação de regressão linear para o modelo estatístico referente a razão de adsorção (Equação 10).

$$Q = 2,94 - 1,09 X_1 + 0,36 X_1^2 + 2,12 X_2 + 0,01 X_2^2 - 0,72 X_1 \cdot X_2 \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

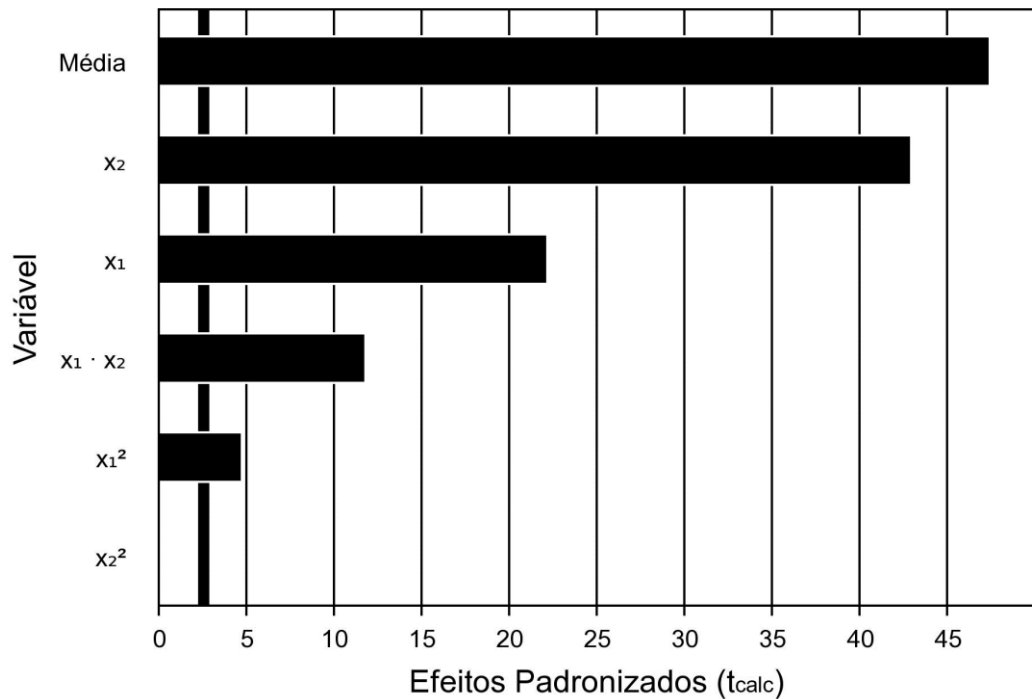
Q = razão de adsorção;

X_1 = massa de carvão (codificada);

X_2 = concentração do corante (codificada);

Além disso, foi gerado o gráfico de Pareto (Gráfico 6), para destacar as variáveis e suas interações que possuem uma contribuição mais expressiva na relação com a adsorção.

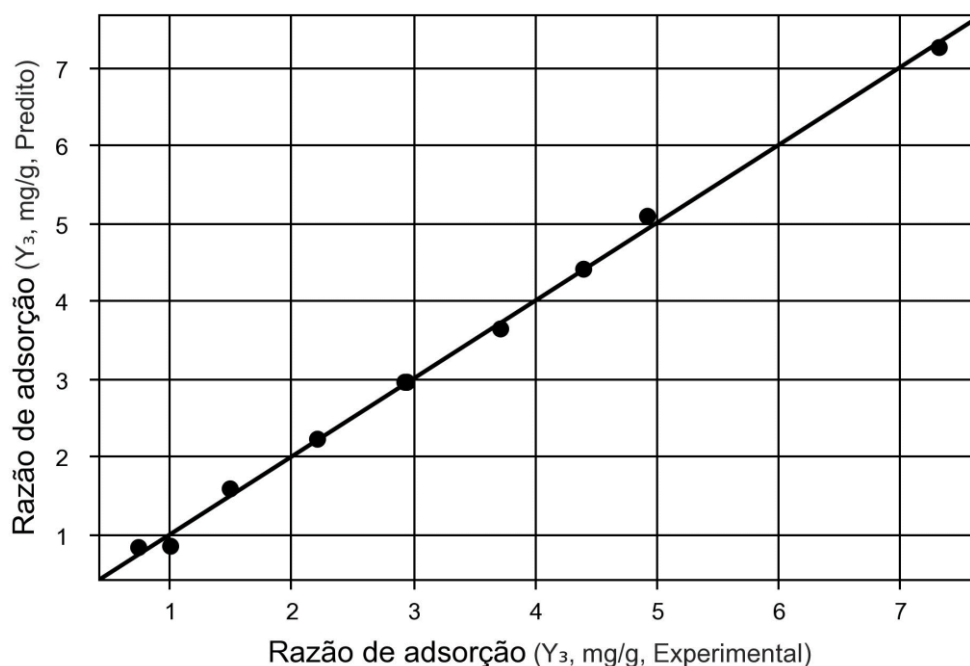
Gráfico 6 – Contribuição das variáveis para a razão de adsorção



Fonte: Autor (2023).

Assim, através do baixo p-valor associado e do gráfico de Pareto, pode-se observar que a concentração do azul de metileno (X_2) se destaca como a variável independente mais significativa estatisticamente para esta resposta, seguida da massa de carvão (X_1) utilizada.

Como é possível observar no gráfico de predição (Gráfico 7), os dados experimentais apresentam excelente aderência com os resultados previstos no modelo, com pontos interceptando ou muito próximos da diagonal de referência.

Gráfico 7 – Gráfico de predição do modelo da razão de adsorção

Fonte: Autor (2023).

Na Tabela 16 estão disponíveis os dados referentes à análise de variância (ANOVA) da razão de adsorção.

Tabela 16 – Análise de variância para a razão de adsorção

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F_{calc}	p-valor
Regressão	36,5	5	7,3	499,0	0,00000
Resíduos	0,1	5	0,0	-	-
Falta de Ajuste	0,1	3	0,0	317,8	0,00314
Erro Puro	0,0	2	0,0	-	-
Total	36,5	10	-	-	-

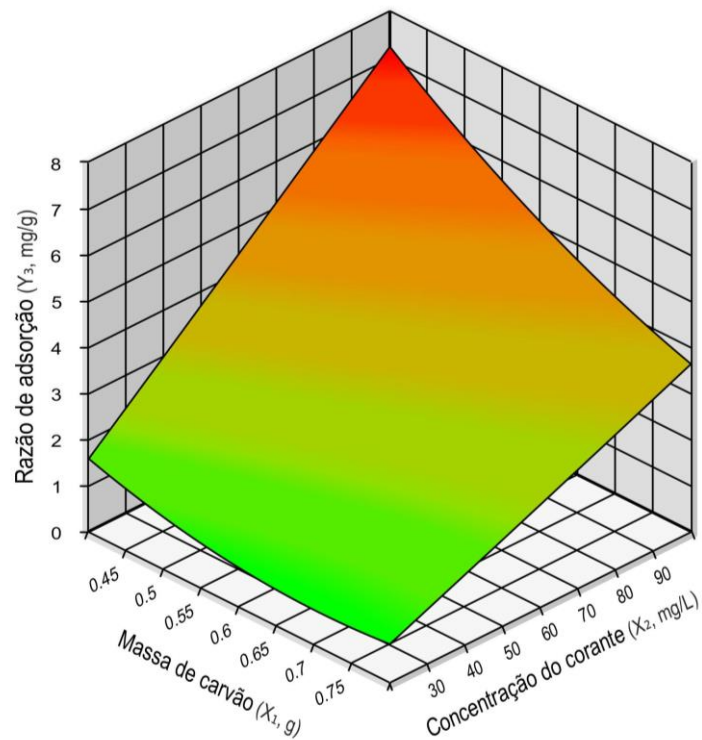
Fonte: Autor (2023).

Foi obtido, para esse modelo referente a adsorção, um coeficiente de determinação (R^2) de 99,80% através do teste. Tal valor é considerado bem satisfatório, pois uma porcentagem tão elevada indica que a formulação estatística foi

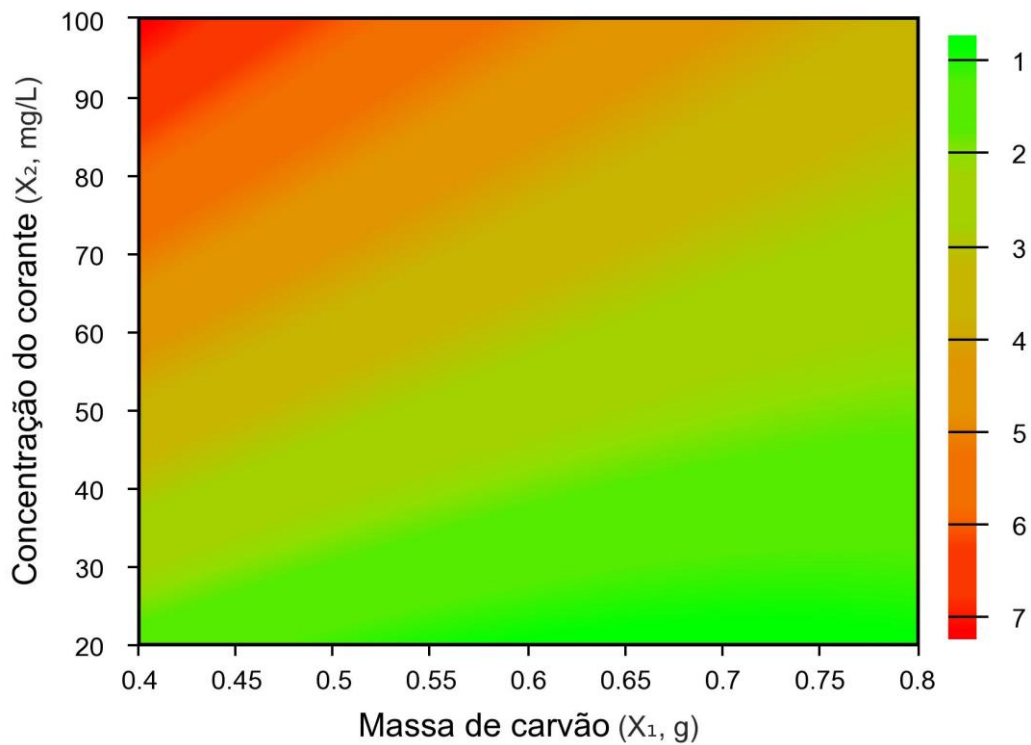
capaz de explicar grande parte da variação presente nos dados experimentados, garantindo uma qualidade superior de ajuste do modelo à realidade.

Nos Gráficos 8 e 9, é apresentada a relação encontrada entre as variáveis: massa de carvão (X_1), concentração do corante (X_2), e a razão de adsorção (Q). Na escala de cores, o verde representa os valores de menor razão de adsorção e o vermelho de maior.

Gráfico 8 – Relação tridimensional entre a razão de adsorção e as variáveis



Fonte: Autor (2023).

Gráfico 9 – Relação Razão de adsorção x Variáveis independentes

Fonte: Autor (2023).

Nessa perspectiva, realizando uma análise gráfica, infere-se que o carvão ativado responde de forma eficiente em todas as quantias de massa estudadas, tendo um desempenho melhor com reduzidas massas. Nesse sentido, quanto maior a concentração de azul de metileno disponível, maior a razão de adsorção desse carvão produzido a partir da pirólise a 650 °C.

5. CONCLUSÃO

O reaproveitamento da borra de café, através do processo de pirólise convencional, para a produção de carvão ativado se mostrou um processo com resultados satisfatórios. A biomassa apresentou um baixo teor de umidade (5,11%) e um alto teor de voláteis (84,38%), características essenciais para uma pirólise mais eficiente, tendo um menor consumo de energia.

Além disso, a pirólise da borra de café fabricou carvões com especificações desejáveis, como os reduzidos teores de umidade e cinzas (< 5%), que aumentam a capacidade de adsorção das substâncias.

Nessa perspectiva, os resultados do ensaio de adsorção foram notáveis. O carvão ativado gerado a 650 °C demonstrou uma alta razão de adsorção (até 7,32 mg/g), com a mínima quantia de massa de carvão experimentada (0,40 g). Além do mais, os processos termoquímicos ofereceram rendimentos adequados e compatíveis com a literatura (> 20%), conseguindo produzir, assim, cerca de 80 kg de carvão ativado para cada tonelada de biomassa em base úmida.

Portanto, este estudo revelou uma solução viável para o reaproveitamento da borra de café, através de sua transformação em carvão ativado, pois essa nova destinação ajudaria a mitigar os impactos ambientais do descarte inadequado desse abundante resíduo. Ademais, devido ao seu uso no tratamento de água e remediação ambiental, o carvão ativado gera novas oportunidade econômicas para a borra de café, agregando valor ao subproduto de uma das bebidas mais consumidas no mundo.

REFERÊNCIAS

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

ANSARI R.; MOHAMMAD-KHAH, A. Activated Charcoal: Preparation, characterization and Applications: A review article. **International Journal of ChemTech Research**, Vol. 1, N. 4, p. 859-864, 2009.

ARENAS C. N., *et al.* **Pyrolysis kinetics of biomass wastes using isoconversional methods and the distributed activation energy model**. Bioresource Technology, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO CAFÉ – ABIC. **A Expansão do café no Brasil**. Disponível em: <<https://www.abic.com.br/tudo-de-cafe/a-expansao-do-cafe-no-brasil/>>. Acesso em: 06 de setembro de 2023.

ASTM D3173-87. **Standard Method for Determination of Moisture Content in Biomass, Society of Testing Materials International**. West Conshohocken, 2003.

ASTM D3174-04. **Standard method for ash in the analysis sample of coal and coke**. West Conshohocken, 2004.

ASTM D3175-07. **Standard method for volatile matter in the analysis sample of coal**. West Conshohocken, 2007.

BALLESTEROS, L. F.; TEIXEIRA, J. A.; MUSSATTO, S. I. **Chemical, Functional, and Structural Properties of Spent Coffee Grounds and Coffee Silverskin**. Food Bioprocess Technol 7, p. 3493–3503. 2014.

BANSAL, R. C.; GOYAL, M. **Activated Carbon Adsorption**. 2005.

BATISTA JÚNIOR, Ronydes. **Pirólise da borra de café: cinética química e operação em leito fixo**. Dissertação (Mestrado em Química), Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba/MG, 2017.

BOK, J. P. *et al.* **Fast pyrolysis of coffee grounds: Characteristics of product yields and biocrude oil quality**. Vol. 47, 2012.

BOLIGON, Jacqueline. **Produção e caracterização de carvão ativado a partir da borra de café solúvel**. Dissertação (Mestrado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2015.

CASTRO, C. S. **Preparação de carvão ativado a partir de borra de café: uso como adsorvente e como suporte catalítico para a remoção de poluentes orgânicos em meio aquoso**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2009.

CECAFÉ – Conselho dos Exportadores de Café do Brasil. **Sobre o café**. Disponível em: <cecafe.com.br/sobre-o-cafe/producao/>. Acesso em: 06 de setembro de 2023.

ÇEÇEN, F.; AKTAS, O. **Activated Carbon for Water and Wastewater Treatment: Integration of Adsorption and Biological Treatment**. 2011.

CHEN D., *et al.* Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. **Waste Management**. Vol. 34, Ed. 12, p. 2466-2486, 2014.

CHRISTENSEN, T. H. (ed.). **Solid Waste Technology & Management**, John Wiley & sons, Ltd, Chichester. 2010.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Levantamento da Conab estima produção de café em 54,74 milhões de sacas na safra 2023**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5003-levantamento-da-conab-estima-producao-de-cafe-em-54-74-milhoes-de-sacas-na-safra-2023>>. Acesso em: 12 de setembro de 2023.

GÓMEZ, E. O. **Estudo da pirólise rápida de capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão**. Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, 2002.

HU H.; XU K. High-Risk Pollutants in Wastewater. **Physicochemical technologies for HRP and risk control**, cap. 8, p. 169-207. 2020.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION – ICO. **Annual Review 2019: Addressing the Coffee Price Crisis**. 2019.

KIGGUNDU, N.; SITTAMUKYOTO, J. Pyrolysis of Coffee Husks for Biochar Production. **Journal of Environmental Protection**, p. 1553-1564, 2019.

LI, Xiaofeng; STREZOV, Vladimir; KAN, Tao. Energy recovery potential analysis of spent coffee grounds pyrolysis products. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Vol. 110, p. 79-87, 2014.

LINHARES, F. A.; MELO, P. J.; MARCÍLIO, N. R. **Estudo da produção de carvão ativado a partir do resíduo de casca da acácia negra com e sem ativação química**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Departamento de Engenharia Química – Laboratório de Processamento de Resíduos (LPR), 2016.

LUNA, D. *et al.* **Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco**. UAM-Iztapalapa, Depto. Química, 2006.

MARSH, H.; REINOSO, F. R. **Activated Carbon**. Cap. 2, p. 13. 2006.

MARTINS, A. L. **História do café**. Ed. 2. São Paulo, 2012.

MONTEIRO, L. **Commodities: conheça a botânica do Café, espécies e características**. Disponível em: <<https://blog.terrainvestimentos.com.br/botanica-do-cafe/>>. Acesso em: 6 de setembro de 2023.

NOBLE, R.; TERRY, P. Adsorption. **Principles of Chemical Separations with Environmental Applications**. Cambridge Series in Chemical Engineering, p. 182-213. 2004.

PEDROZA, M. M. **Bio-óleo e biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. 2011.

PENDERGRAST, M. **Uncommon grounds: the history of coffee and how it transformed our world**. 2010.

ROCHA, Thalyne de Almeida Ferreira. **Contribuições ao estudo da secagem da borra de café em leite vibrofluidizado**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos, 2019.

ROTH, C. G. & GARCIAS, C. M. **A influência dos padrões de consumo na geração de resíduos sólidos dentro do sistema urbano**. Redes. Revista do Desenvolvimento Regional, 13(3), 5-13, 2008.

SANTOS, Johnson Clay Pereira. **Secagem da borra de café em secador ciclônico**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Lavras, 2009.

SASIKUMAR, K.; KRISHNA, S. G. **Solid Waste Management**. PHI Learning Private Limited, New Delhi, 2009.

SCRODER, E. *et al.* Experiment on the Generation of activated carbon from Biomass. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Vol. 79, 2007.

SETTER, C. *et al.* **Energy quality of pellets produced from coffee residue: Characterization of the products obtained via slow pyrolysis**. Industrial Crops and Products, Vol. 154, 2020.

SILVA, *et al.* **Quantificação dos resíduos gerados no preparo de cafés filtrados**. Congresso Internacional da Agroindústria (CIAGRO), 2021.

SILVA, J. da. **Estudo da eficiência e aplicabilidade de carvão ativado resultante de pirólise de casca de arroz em barreiras reativas na remoção de contaminantes em solos**. Tese de Doutorado, UFRS, Porto Alegre, p. 204, 2009.

TANGMANKONGWORAKOON, Naruephat. An approach to produce biochar from coffee residue for fuel and soil amendment purpose. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**. 2019.

TEIXEIRA, T. F. V. F. **Estudo da pirólise de borra de café com vista à produção de biochar e bioóleo**. Mestrado em Engenharia Química. Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), 2018.

TUCKER, C. M. **Coffee culture**: local experiences, global connections. 2ed. 2017.

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

VELLOSO, M.P. **Os restos na história: percepções sobre resíduos**. Ciência & Saúde Coletiva, v. 13, n. 6, p. 1953-1964, 2008.

WERLANG, E. B., *et al.* Produção de carvão ativado a partir de resíduos vegetais. **Revista Jovens Pesquisadores**, v. 3, n. 1, 16 jul. 2013.