



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

**BRUNA CIRQUEIRA ALMEIDA**

**PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA PIRÓLISE DA CASCA DE  
LARANJA**

**PALMAS**  
**2023**

**BRUNA CIRQUEIRA ALMEIDA**

**PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA PIRÓLISE DA CASCA DE  
LARANJA**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes  
Pedroza

**PALMAS**

**2023**

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

---

A447p Almeida, Bruna Cirqueira  
Produção de carvão ativado a partir da pirólise da casca de  
laranja / Bruna Cirqueira Almeida. – Palmas, TO, 2023.  
51 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. Biomassa residual. 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

**BRUNA CIRQUEIRA ALMEIDA**

### **PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA PIRÓLISE DA CASCA DE LARANJA**

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

Aprovado em: 02/06/2023

#### **BANCA AVALIADORA**



---

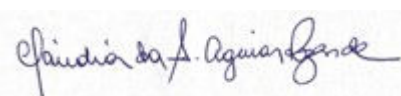
Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza  
Orientador

(IFTO)



---

Eng. Me. Ranyere do Nascimento Lôbo



---

Prof. Dra. Claudia da Silva Aguiar Rezende

## RESUMO

Como o Brasil é o maior produtor de laranjas do mundo, uma grande quantidade de biomassa residual é gerada, nem sempre recebendo uma destinação final adequada, o que pode ocasionar danos ambientais. Sendo assim, o objetivo deste estudo é converter a casca de laranja em carvão ativado por meio do processo de pirólise e caracterizar o produto resultante. A biomassa seca foi caracterizada através das análises imediatas: teor de umidade (0,88%), teor de cinzas (1,36%), material volátil (85,37%), teor de carbono fixo (12,39%) e densidade (0,44%). A degradação térmica do resíduo foi realizada em reator de leito fixo, em duas temperaturas distintas (500 °C e 600 °C) durante 30 minutos de degradação, a uma taxa de 30 °C/min. O rendimento do carvão ativado foi de 27,092% para a pirólise a 500 °C e de 18,094% para a pirólise a 600°C. Após os ensaios de pirólise, as amostras de carvão obtidas durante o processo foram coletadas, armazenadas e caracterizadas pelos mesmos parâmetros empregados com a biomassa seca, além do teste de adsorção de azul de metileno em mesa agitadora orbital, no qual foi utilizado o planejamento de delineamento de faces centradas com 11 tipos de combinações de massa e concentração de corante, sendo o tempo de adsorção de 30 minutos e o volume fixo de 30 mL da solução em todos os testes. O experimento revelou que a capacidade de adsorção desse carvão se torna mais eficiente com uma baixa quantidade de massa e uma alta concentração de corante azul de metileno. Após a análise dos resultados, percebe-se a eficiência da utilização da biomassa da casca de laranja na produção de carvão ativado, com capacidade adsorvente, através da pirólise.

**Palavras-chave:** Biomassa, casca de laranja, aproveitamento, resíduo, pirólise, carvão ativado

## ABSTRACT

As Brazil is the largest producer of oranges in the world, a large amount of residual biomass is generated, not always receiving an adequate final destination, which can cause environmental damage. Therefore, the objective of this study is to convert orange peel into activated carbon through the pyrolysis process and to characterize the resulting product. Dry biomass was characterized through immediate analysis: moisture content (0,88%), ash content (1,36%), volatile material (85,37%), fixed carbon content (12,39%) and density (0,44%). The thermal degradation of the residue was carried out in a fixed bed reactor, at two different temperatures (500 °C and 600 °C) for 30 minutes of degradation, at a rate of 30 °C/min. The activated carbon yield was 27,092% for pyrolysis at 500 °C and 18,094% for pyrolysis at 600 °C. After the pyrolysis tests, the charcoal samples obtained during the process were collected, stored and characterized by the same parameters used with the dry biomass, in addition to the methylene blue adsorption test on an orbital shaking table, in which the centered face design with 11 types of mass and dye concentration combinations, with an adsorption time of 30 minutes and a fixed volume of 30 mL of solution in all tests. The experiment revealed that the adsorption capacity of this carbon becomes more efficient with a low amount of mass and a high concentration of methylene blue dye. After analyzing the results, the efficiency of using orange peel biomass in the production of activated carbon, with adsorbent capacity, through pyrolysis, can be seen.

**Keywords:** Biomass, orange peel, use, waste, pyrolysis, activated carbon

## SUMÁRIO

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                              | <b>12</b> |
| <b>2 PROBLEMA DE PESQUISA.....</b>                                     | <b>13</b> |
| <b>3 JUSTIFICATIVA.....</b>                                            | <b>14</b> |
| <b>4 OBJETIVOS .....</b>                                               | <b>15</b> |
| <b>4.1 Objetivo geral.....</b>                                         | <b>15</b> |
| <b>4.2 Objetivos específicos .....</b>                                 | <b>15</b> |
| <b>5 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>                                    | <b>16</b> |
| <b>5.1 Laranja: histórico e trajetória no Brasil.....</b>              | <b>16</b> |
| <b>5.2 Características físicas da laranja .....</b>                    | <b>17</b> |
| <b>5.3 Produção de laranja no mundo, no Brasil e no Tocantins.....</b> | <b>18</b> |
| <b>5.4 Carvão ativado a partir da biomassa .....</b>                   | <b>19</b> |
| <b>5.5 Degradação térmica .....</b>                                    | <b>20</b> |
| <b>5.6 Experiências com pirólise da casca de laranja .....</b>         | <b>21</b> |
| <b>6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....</b>                              | <b>23</b> |
| <b>6.1 Coleta do resíduo .....</b>                                     | <b>24</b> |
| <b>6.2 Caracterização da biomassa .....</b>                            | <b>24</b> |
| 6.2.1 Cinética de perda de massa.....                                  | 24        |
| 6.2.2 Umidade.....                                                     | 25        |
| 6.2.3 Teor de cinzas.....                                              | 26        |
| 6.2.4 Material volátil.....                                            | 27        |
| 6.2.5 Teor de carbono fixo.....                                        | 28        |
| 6.2.6 Densidade.....                                                   | 28        |
| <b>6.3 Pirólise da casca de laranja.....</b>                           | <b>29</b> |
| 6.3.1 Balanço de massa .....                                           | 30        |
| <b>6.4 Caracterização do carvão obtido .....</b>                       | <b>31</b> |
| 6.4.1 Umidade....                                                      | 31        |
| 6.4.2 Teor de cinzas .....                                             | 32        |
| 6.4.3 Material volátil.....                                            | 32        |
| 6.4.4 Teor de carbono fixo .....                                       | 32        |
| 6.4.5 Densidade.....                                                   | 32        |
| 6.4.6 Adsorção.....                                                    | 32        |
| <b>7 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                                 | <b>35</b> |
| <b>7.1 Cinética de perda de massa.....</b>                             | <b>35</b> |

|                                                                                 |           |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>7.2 Balanço de massa do carvão ativado.....</b>                              | <b>36</b> |
| <b>7.3 Umidade.....</b>                                                         | <b>36</b> |
| <b>7.4 Teor de cinzas.....</b>                                                  | <b>37</b> |
| <b>7.5 Teor de material volátil.....</b>                                        | <b>38</b> |
| <b>7.6 Teor de carbono fixo.....</b>                                            | <b>39</b> |
| <b>7.7 Densidade.....</b>                                                       | <b>39</b> |
| <b>7.8 Adsorção.....</b>                                                        | <b>40</b> |
| 7.8.1 Primeira resposta do planejamento experimental: absorbância.....          | 41        |
| 7.8.2 Segunda resposta do planejamento experimental: razão de adsorção (Q)..... | 44        |
| <b>8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                                              | <b>47</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                         | <b>48</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1:</b> Composição da laranja.....                                                             | 18 |
| <b>Figura 2:</b> Procedimentos que foram realizados no decorrer da pesquisa.....                        | 23 |
| <b>Figura 3:</b> Coleta da biomassa.....                                                                | 24 |
| <b>Figura 4:</b> Estufa.....                                                                            | 25 |
| <b>Figura 5:</b> Balança de precisão.....                                                               | 25 |
| <b>Figura 6:</b> Dessecador utilizado.....                                                              | 26 |
| <b>Figura 7:</b> Forno mufla.....                                                                       | 27 |
| <b>Figura 8:</b> Reator de leito fixo que foi utilizado no ensaio de pirólise.....                      | 29 |
| <b>Figura 9:</b> Autoclave que foi utilizada no ensaio de pirólise.....                                 | 29 |
| <b>Figura 10:</b> Bio-Óleo.....                                                                         | 30 |
| <b>Figura 11:</b> Fração gasosa.....                                                                    | 30 |
| <b>Figura 12:</b> Barca com fragmentos de casca de laranja antes do processo de degradação térmica..... | 31 |
| <b>Figura 13:</b> Carvão ativado após o processo de degradação térmica.....                             | 31 |
| <b>Figura 14:</b> Mesa agitadora.....                                                                   | 33 |
| <b>Figura 15:</b> Filtração das amostras.....                                                           | 33 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1:</b> Produção mundial de laranja na safra de 2021/22, em milhões de toneladas.....   | 19 |
| <b>Tabela 2:</b> Produção regional de laranja em 2021.....                                       | 19 |
| <b>Tabela 3:</b> Variáveis e níveis empregados no ensaio de adsorção.....                        | 34 |
| <b>Tabela 4:</b> Dosagem de carvão e concentração do corante para ensaio de adsorção.....        | 34 |
| <b>Tabela 5:</b> Resultados do ensaio de cinética de perda de massa.....                         | 35 |
| <b>Tabela 6:</b> Balanço de massa e rendimento do carvão ativado.....                            | 36 |
| <b>Tabela 7:</b> Teor médio de umidade da biomassa e carvão.....                                 | 36 |
| <b>Tabela 8:</b> Teor médio de cinzas da biomassa e carvão.....                                  | 37 |
| <b>Tabela 9:</b> Teor médio de material volátil da biomassa e carvão.....                        | 38 |
| <b>Tabela 10:</b> Teor médio de carbono fixo da biomassa e carvão.....                           | 39 |
| <b>Tabela 11:</b> Densidade média da biomassa e carvão.....                                      | 40 |
| <b>Tabela 12:</b> Resultado do ensaio de adsorção.....                                           | 41 |
| <b>Tabela 13:</b> Coeficientes de regressão para definição da absorbância.....                   | 41 |
| <b>Tabela 14:</b> ANOVA para a absorbância das amostras de carvão ativado.....                   | 43 |
| <b>Tabela 15:</b> Coeficientes de regressão para definição da capacidade máxima de adsorção..... | 44 |
| <b>Tabela 16:</b> ANOVA para a capacidade máxima de adsorção das amostras de carvão ativado..... | 46 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Gráfico 1:</b> Cinética de perda de massa da biomassa seca em função do tempo.....                                       | 36 |
| <b>Gráfico 2:</b> Diagrama de Pareto da absorbância do carvão da casca de laranja.....                                      | 42 |
| <b>Gráfico 3:</b> Valores experimentais X valores preditos quanto à absorbância do carvão.....                              | 42 |
| <b>Gráfico 4:</b> Superfície para absorbância em relação à massa de carvão e concentração de corante.....                   | 43 |
| <b>Gráfico 5:</b> Diagrama de Pareto da capacidade máxima de adsorção do carvão da casca de laranja.....                    | 45 |
| <b>Gráfico 6:</b> Valores experimentais X valores preditos quanto à capacidade máxima de adsorção do carvão ativado.....    | 45 |
| <b>Gráfico 7:</b> Superfície para capacidade máxima de adsorção em relação à massa de carvão e concentração de corante..... | 46 |

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com Circhia (2022), a principal fonte utilizada para a produção de energia e reagentes químicos é o petróleo. O interesse crescente em substituir tal recurso, por fontes renováveis, como a biomassa, tem sido motivado pelo aumento significativo dos preços do petróleo bruto nos últimos anos, pela preocupação com sua disponibilidade limitada, bem como pelos danos ambientais decorrentes da utilização de combustível fóssil (ZANATTA *et al.*, 2016).

A biomassa, que consiste na matéria orgânica proveniente de resíduos agroflorestais, domésticos e industriais, tem ganhado destaque por seu potencial energético e pela sua abundância (PEDROZA, 2011). Sabendo que o Brasil é o maior produtor mundial de laranja e de suco de laranja e que, por conta disso, uma grande quantidade de resíduos é gerada, a utilização da biomassa residual (casca e bagaço), torna-se uma alternativa sustentável e viável para a produção de carvão ativado.

De acordo com Claudino (2003), a utilização do carvão ativado como um adsorvente eficaz de poluentes líquidos e gasosos se deve às suas propriedades texturais e à natureza química da sua superfície, que conferem a ele uma alta capacidade de adsorção. O carvão ativo mais comum é obtido através do eucalipto, no entanto, o carvão produzido através da pirólise de biomassa também pode ser utilizado na remoção de metais pesados e substâncias orgânicas de efluentes, substituindo o carvão ativado comercial (PEDROZA *et al.*, 2017).

Dessa forma, a utilização de resíduos agroindustriais é uma opção mais rentável do ponto de vista econômico e ajuda a diminuir os custos associados à eliminação desses resíduos. Além disso, essa prática contribui para a redução dos impactos ambientais gerados pelo descarte inadequado de material orgânico (SANTOS, 2015).

O processo de pirólise é capaz de converter a biomassa da casca de laranja em carvão ativado por meio da degradação termoquímica, que ocorre na ausência parcial ou total de oxigênio. Nesse contexto, este estudo visa realizar a degradação térmica da casca de laranja e caracterizar o carvão resultante do processo.

## **2 PROBLEMA DE PESQUISA**

Segundo Vidal (2021, p.3), “o Brasil é o segundo maior produtor mundial de citros e o maior produtor global de laranja e de suco de laranja”. Sabendo disso, e de que o setor alimentício é um dos que mais gera resíduos sólidos, dentre os quais se encontram as cascas de frutas, a busca por medidas sustentáveis de aproveitamento da casca de laranja se torna indispensável.

Dessa forma, a utilização dessa biomassa seria uma solução eficaz para a produção de carvão ativado por meio da pirólise?

### 3 JUSTIFICATIVA

Segundo o IBGE (2023), a área utilizada para o cultivo de laranja no Brasil em 2022, foi de aproximadamente 583 mil hectares e a produção no mesmo ano foi de 16,7 milhões de toneladas. Tais dados mostram que o país é pioneiro mundial na produção da fruta e isso se dá pelas condições climáticas favoráveis para o cultivo. A laranja está entre as frutas mais consumidas pelos brasileiros e, por isso, a maior parte da produção abastece o mercado interno, potencializando o PIB nacional (SENAR, 2016). Dessa forma, há a concentração de resíduos provenientes do consumo, acarretando em descarte sem o devido aproveitamento.

Com isso, existe a necessidade de estudar possibilidades para a utilização dessa biomassa. De acordo com Rodrigues (2019, p.24), “a biomassa é apontada como a maior fonte de energia renovável e o seu uso como fonte alternativa de carbono é importante para o Brasil que possui grandes áreas de terras cultiváveis e clima favorável”. Portanto, esse é um dos principais motivos que justificam o estudo de produção de carvão ativado a partir da degradação térmica da casca de laranja.

Dentre os métodos de tratamento térmico, a pirólise apresenta muitos benefícios no aproveitamento de biomassa comparados aos demais. Por conta de suas capacidades energéticas, os materiais oriundos da pirólise, que podem ser líquidos (bio-óleo), sólidos (carvão) e gasosos, podem ser comercializados como produtos químicos ou combustíveis, tendo diversas possibilidades de utilização. A pirólise se mostra eficaz, pois através dela obtêm-se produtos com densidade energética e características melhores do que àquelas da biomassa in natura (PEDROZA, 2011).

## **4 OBJETIVOS**

### **4.1 Objetivo geral**

Estudar as características do carvão ativado obtido através da degradação térmica da casca da laranja.

### **4.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar a biomassa in natura;
- Efetuar a pirólise da biomassa em reator de leito fixo para a produção de carvão ativado;
- Caracterizar o carvão obtido no processo de pirólise e comparar com as características encontradas na literatura.

## 5 REVISÃO DE LITERATURA

### 5.1 Laranja: histórico e trajetória no Brasil

A laranjeira é natural da Ásia e uma das árvores mais populares, semeadas e estudadas no mundo. Após a fruta seguir da Ásia para a África e, em seguida, para o sul da Europa- Idade Média- ocorre sua chegada ao Brasil no período de colonização. Por conta da disseminação da fruta pelo mundo, originaram-se modificações em sua cor, sabor e tamanho em função do clima e solo do país em que era cultivada (FERNANDES, 2010).

Chegando ao Brasil, as plantas cítricas se adaptaram de tal forma que eram confundidas com plantas nativas. A partir dessa adaptação, em meados de 1800, se originou uma variedade conhecida por laranja Bahia, surgindo por meio de mutações da variedade seleta (*Citrus sinensis*), em Salvador. Com isso, em 1873, mudas de laranja Bahia foram introduzidas na Califórnia, nos Estados Unidos, fazendo com que tal intercâmbio fosse fundamental para o início da citricultura nesses dois países (OLIVEIRA e RODRIGUES, 2004).

Apesar das sementes de laranja doce terem sido cultivadas nos estados da Bahia e de São Paulo em meados de 1530, foi somente a partir da década de 1930 que se iniciou a cultura de citros visando o comércio nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Bahia, e, em seguida, espalhando-se por todo o país (SENAR, 2019). Alguns fatores que proporcionaram o desenvolvimento da plantação de laranja no estado de São Paulo em 1930, que futuramente seria o estado detentor da maior produção da fruta no país, foram a decadência do cultivo de café ocasionada pelas geadas de 1918 e 1929, o apoio governamental, o baixo custo de produção, as condições climáticas favoráveis da região e o alto crescimento populacional, aumentando-se o mercado interno, conforme afirma Fernandes (2010).

No entanto, com a Segunda Guerra Mundial e a propagação da doença “tristeza” nas laranjeiras, a produção brasileira declinou e a exportação de laranja para a Europa foi praticamente extinta. Com isso, a oferta de laranja superou a demanda interna, fazendo com que os preços caíssem. Além disso, tal crise gerou problemas sociais, como o aumento de desemprego e a diminuição de investimento nos pomares (BORGES e COSTA, 2005). Ainda segundo Borges e Costa (2005), a situação de super oferta da fruta foi revertida, após o alastramento crescente da doença “tristeza”,

levando à falta de laranja. Na década de 1940, houve a perda de 10 a 12 milhões de plantas.

Após pesquisas sobre a doença que se disseminara, foi descoberto que a utilização de porta-enxerto de Limão-Cravo solucionaria o problema. Com o fim da Segunda Guerra Mundial e o controle da doença, a produção e exportação, agora seguindo exigências internacionais, foram reestabelecidos. As exigências do mercado internacional causaram a substituição da variedade laranja Bahia pela laranja Pera, e isso se deu pela alta resistência às doenças apresentada pela segunda quando comparada com a primeira.

A partir de 1960, ocorreram mudanças na citricultura brasileira. Por meio da modernização da agricultura e surgimento da agroindústria processadora, a laranja passou a ser insumo para a indústria, e não apenas produto final. Isso afetou diretamente as pequenas propriedades, como afirma Martinelli Jr. (1989, p. 292):

Isto significa que a importância econômica das pequenas propriedades na citricultura tem declinado desde a década de 60, época em que se instalam as empresas processadoras que requerem novas exigências econômicas e técnicas, exigências estas que as pequenas propriedades não foram capazes de oferecer. Por esse motivo, perderam espaços econômicos dentro do conjunto de atividade onde as maiores empresas, mais capitalisticamente organizadas e, conseqüentemente mais dinâmicas economicamente, sustentaram a grande expansão da cultura em São Paulo.

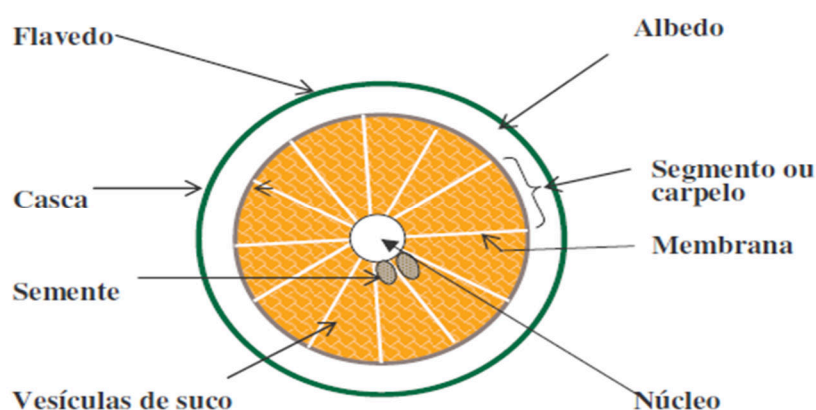
Tal expansão, se dá pelo fato de o Brasil se beneficiar com a crise de 1962 nos Estados Unidos, onde ocorreu uma geada que levou a morte de milhares de pomares, acarretando numa queda drástica da produção Americana. De acordo com Fernandes (2010), “os Estados Unidos, na década de 60, detinham a maior produção de laranjas no mundo e foi o pioneiro na produção de suco de laranja concentrado”. Com os danos causados pela frente fria, afetando principalmente o estado da Flórida, o Brasil foi estimulado a entrar no mercado de exportação de suco concentrado, que ficara sem seu principal fornecedor. Dessa forma, a cultura brasileira de laranja deixa de fornecer interna e externamente apenas a fruta in natura, mas também passa a ser a líder mundial em fornecimento de suco de laranja concentrado e congelado (VIDAL, 2021).

## **5.2 Características físicas da laranja**

A laranja pertence à família *Rutaceae* e pertence ao gênero *Citrus*. A fruta é dividida em exocarpo (casca exterior, também chamada flavedo), mesocarpo (albedo) e endocarpo (lóculos). Os lóculos são preenchidos pelas vesículas de suco, que é a

parte comestível do fruto. Já o albedo, também chamado de pele interior, é a parte desprovida de pigmentação da casca, além de ser constituído pelo núcleo. Em contrapartida, o flavedo possui pigmentação e é o material utilizado para o presente estudo. A Figura 1 apresenta a composição da laranja (SANTANA, 2005).

**Figura 1:** Composição da laranja.



Fonte: Santana (2005).

As principais variedades de laranja, segundo a Embrapa (2005), são a laranja bahia ou baianinha, laranja valência, laranja Pera e laranja Lima. Dentre as quais a laranja Pera é a mais produzida e consumida no Brasil.

### **5.3 Produção de laranja no mundo, no Brasil e no Tocantins**

O Brasil é líder mundial na produção de laranja desde a década de 1980 (SANTANA, 2005). São Paulo é o estado brasileiro que mais produz a fruta, responsável por 77,1% das laranjas produzidas no país (IBGE, 2021). O cultivo é destinado, em sua maioria, para a produção de suco, fazendo com que ele seja o principal produto citrícola exportado pelo Brasil (EMBRAPA, 2005). De acordo com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), na safra de 2021/22, a produção mundial de laranja foi de 50 milhões de toneladas. Além do Brasil, os países que se destacam na produção nesta mesma safra, em ordem crescente, são: China, União Europeia, México, Estados Unidos e Egito, conforme mostra a Tabela 1 a seguir.

**Tabela 1:** Produção mundial de laranja na safra de 2021/22, em milhões de toneladas.

| Países         | Produção |
|----------------|----------|
| Brasil         | 16,932   |
| China          | 7,550    |
| União Europeia | 6,720    |
| México         | 4,595    |
| Estados Unidos | 3,149    |
| Egito          | 3,000    |
| Turquia        | 1,750    |
| África do Sul  | 1,600    |
| Marrocos       | 1,150    |
| Vietnã         | 1,150    |
| Outros         | 2,404    |

Fonte: adaptado de USDA (2023).

Segundo o IBGE (2021), as regiões brasileiras que mais produzem a fruta são: sudeste (83,7%), nordeste (7,1%) e sul (6,2%), como apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2:** Produção regional de laranja em 2021.

| Região brasileira | Área colhida (ha) | Quantidade produzida (t) | Participação na produção (%) |
|-------------------|-------------------|--------------------------|------------------------------|
| Norte             | 18.216,00         | 292.204,00               | 1,80%                        |
| Nordeste          | 93.794,00         | 1.147.656,00             | 7,10%                        |
| Sudeste           | 414.602,00        | 13.567.947,00            | 83,70%                       |
| Sul               | 42.896,00         | 1.013.007,00             | 6,20%                        |
| Centro-Oeste      | 8.549,00          | 194.168,00               | 1,20%                        |
| <b>BRASIL</b>     | <b>578.057,00</b> | <b>16.214.982,00</b>     | <b>100,00%</b>               |

Fonte: adaptado de IBGE (2021).

O Tocantins, por sua vez, no ano de 2021, foi responsável por uma produção de 800 toneladas de laranja, cerca de 0,27% da produção da região norte e menos de 0,01% da produção brasileira, ficando à frente apenas do estado do Maranhão (IBGE, 2021).

#### 5.4 Carvão ativado a partir da biomassa

De acordo com Macêdo (2012), um dos problemas ambientais prioritários do século XXI, diz respeito aos resíduos sólidos. Segundo a Embrapa, o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de frutas, chegando a produzir aproximadamente 45 milhões de toneladas anualmente. Grande parte da produção abastece o mercado interno- apenas 2,5% é exportada. Um grande desafio, é a redução de perdas que alcançam

30 a 40% e afetam a produção agrícola brasileira (EMBRAPA, 2003). Dentre os motivos das perdas, é importante ressaltar as que ocorrem no plantio e na etapa da colheita, por conta da estrutura precária, infraestrutura inadequada e pela falta de tecnologia no manejo das lavouras, e no manuseio, causando deterioração física na produção e, como consequência, o descarte (BUENO, 2019).

Além das perdas nos processos iniciais da cadeia produtiva, existe a geração de resíduos sólidos por parte das indústrias processadoras. Sabendo que a agroindústria é uma das principais geradoras de resíduos (CANCHÉ-ESCAMILLA *et al.*, 2005), a quantidade de pesquisas sobre o uso de biomassa para produzir energia renovável e outros materiais de valor agregado, abordando assim a produção de energia limpa e a destinação adequada de resíduos sólidos, tem aumentado (RODRIGUES, 2019). Em geral, os resíduos sólidos passam por um processo de tratamento chamado compostagem, onde a matéria orgânica é estabilizada e ocorre a geração de compostos que podem ser utilizados como fertilizantes agrícolas (BAPTISTA e RODOLPHO, 2021).

No entanto, existe a possibilidade da utilização da biomassa na produção de material adsorvente. A produção de carvão ativado a partir da biomassa, apresenta uma relação custo-benefício satisfatória, já que o material adsorvente pode ser utilizado para controle ambiental e sua matéria-prima possui baixo custo, já que o Brasil é um dos maiores produtores mundiais de biomassa (MACÊDO, 2012). Dentre as funcionalidades do carvão ativado, pode-se citar a remoção de metais pesados e substâncias tóxicas no tratamento de águas residuais (PEÑA H. *et al.*, 2012).

## **5.5 Degradação térmica**

A técnica da pirólise se apresenta como uma opção alternativa viável para o correto descarte de materiais com potencial de poluição no meio ambiente. Isso se deve ao fato de que a pirólise consiste em um processo de transformação energética da biomassa. Nesse processo, a decomposição termal dos elementos moleculares ocorre em condições de ausência parcial ou total de oxigênio, em temperaturas que variam de 300 a 1000 °C. Isso resulta na produção de produtos, tais como carvão, bio-óleo e gases, que possuem um potencial energético mais elevado (RODRIGUES, 2019).

De acordo com Pedroza (2011), há dois métodos distintos de pirólise:

convencional e rápida. As técnicas se distinguem por variáveis como a taxa de aquecimento, a temperatura, o tempo de permanência das fases sólida e gasosa, bem como pelos produtos desejados. Quando o objetivo é produzir carvão, o processo de pirólise convencional é o mais indicado. Nesse contexto, enfatiza-se o processo de pirólise como uma alternativa relevante para a utilização de biomassas e como uma possível forma de agregar valor e produzir produtos químicos renováveis (PEDROZA, 2017).

## **5.6 Experiências com pirólise da casca de laranja**

Circhia (2022), realizou um estudo cinético da pirólise da casca da laranja, sob atmosfera inerte de gás nitrogênio na faixa de temperatura de 30 a 900°C, utilizando quatro diferentes taxas de aquecimento: 5, 10, 15 e 20°C/min. Com base nisso, os resultados da análise física da casca de laranja mostraram uma alta concentração de substâncias voláteis, representando 84,14% do total, além de uma baixa presença de cinzas, que corresponderam a apenas 4,17%. Essas características indicam uma potencialidade positiva para a produção de líquidos durante o processo de pirólise. Além disso, o poder calorífico superior medido foi de 16,85 MJ/kg, o que é significativo para a geração de energia, sendo favorecido pela baixa concentração de cinzas.

Maia *et al.* (2019), produziram e caracterizaram o carvão ativado obtido da casca da laranja. Para obter o carvão ativado, secaram a biomassa triturada em estufa a 105 °C e, posteriormente, impregnaram o material precursor com 200 ml de solução ácida. A impregnação foi seguida por ativação sob agitação constante por 12 horas e, em seguida, as amostras foram secas em estufa a 70 °C e submetidas à pirólise em forno mufla com aquecimento até 500 °C por 2 horas. O carvão resultante foi lavado com água destilada e seco em estufa a 105 °C por 12 horas para remover o excesso de água de lavagem. Os testes de caracterização revelaram que o carvão ativado apresentou um teor de umidade de 1,58%, teor de cinzas de 6,85%, grupos básicos totais de 0,98 mEq/g, grupos carboxílicos de 1,36 mEq/g, grupos lactônicos de 0,39 mEq/g e fenólicos de 1,45 mEq/g.

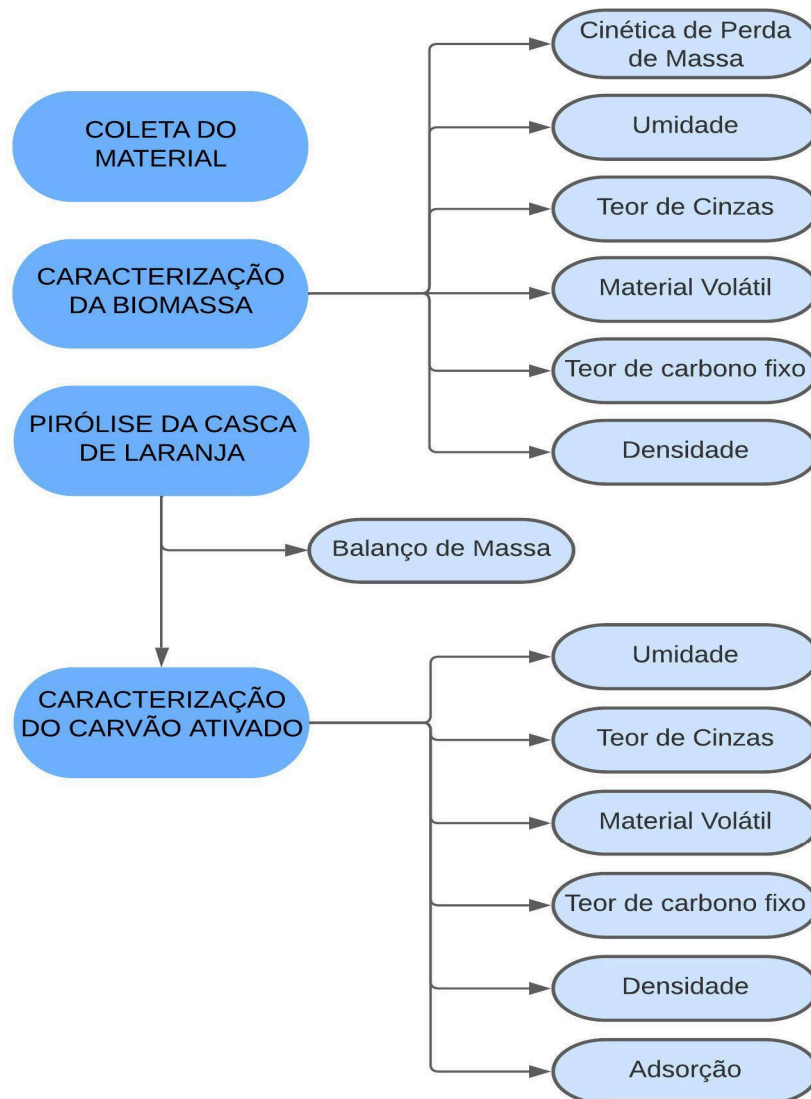
Santos (2015), avaliou o potencial de utilização de cascas de laranja, secas ou submetidas a tratamento térmico, como material adsorvente para remover contaminantes inorgânicos e do orgânico etilbenzeno. A análise das características morfológicas e da área superficial das amostras indicou que esses materiais possuem

uma grande capacidade de adsorção, que aumenta conforme a temperatura de pirólise é elevada. A utilização desses materiais é recomendada para tratar águas contaminadas com chumbo, cobre, níquel e etilbenzeno, principalmente no tratamento terciário. Para cádmio, zinco e alumínio, é recomendado o uso de outros adsorventes já testados. Em conclusão, os experimentos executados demonstraram o potencial de aplicação de cascas de laranja e de seus derivados obtidos pela pirólise como material adsorvente.

## 6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os testes experimentais juntamente com a pesquisa foram conduzidos no *Campus* Palmas do Instituto Federal do Tocantins (IFTO), no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN). Esta seção irá detalhar os processos de caracterização da biomassa e os métodos empregados para produzir carvão ativado através da pirólise da casca de laranja. A Figura 2 apresenta o procedimento que foi utilizado neste estudo.

**Figura 2:** Procedimentos que foram realizados no decorrer da pesquisa.

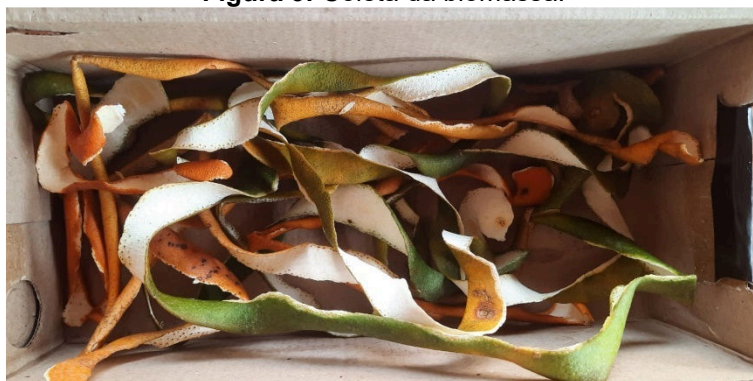


Fonte: Autora (2023).

## 6.1 Coleta do resíduo

A coleta da biomassa residual da casca de laranja, ocorreu no ambiente domiciliar da autora do presente estudo, devido à observação de grandes quantidades de cascas de laranja descartadas no local. Para isso, foram estabelecidos pontos de descarte na residência, onde os residentes receberam orientações sobre o descarte adequado da biomassa (Figura 3). A casca empregada foi proveniente da laranja Pera, a qual é considerada, segundo a Embrapa (2005), a variedade mais amplamente cultivada e consumida no território brasileiro.

**Figura 3:** Coleta da biomassa.



Fonte: Autora (2023).

## 6.2 Caracterização da biomassa

Nesta etapa, a casca de laranja foi submetida a testes para sua caracterização. Esses procedimentos foram necessários para determinar a cinética de perda de massa, umidade, teor de cinzas, teor de material volátil, teor de carbono fixo e densidade da biomassa. A parte da biomassa utilizada para tais ensaios, consistiu no flavedo (casca externa pigmentada) seco em estufa a 60 °C e fragmentado em pequenas partes.

### 6.2.1 Cinética de perda de massa

Para tal ensaio, foi adicionado aproximadamente 3 gramas de biomassa fragmentada em um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. Esse cadinho foi levado à estufa (Figura 4) a uma temperatura fixa de 50 °C.

**Figura 4:** Estufa.



Fonte: Autora (2023).

A cada hora, a amostra foi retirada, pesada em uma balança de precisão (Figura 5) e, em seguida, colocada novamente na estufa, visando-se obter a perda de massa em relação ao tempo.

**Figura 5:** Balança de precisão.



Fonte: Autora (2023)

### 6.2.2 Umidade

A umidade foi determinada seguindo a norma ASTM D 3173-87. Dessa forma, foi pesada uma quantidade de cerca de 1g de fragmentos de casca de laranja seca e adicionada a um cadinho de porcelana com peso previamente determinado. A amostra foi aquecida em uma estufa a 105°C por uma hora e, em seguida, o cadinho foi colocado em um dessecador (Figura 6) por 10 minutos e pesado novamente. Para assegurar a precisão e confiabilidade dos resultados, a análise foi feita em triplicata e o teor de umidade foi calculado segundo a Equação 1:

$$\text{Umidade (\%)} = \left( \frac{A-B}{C} \right) * 100$$

**(Equação 1)**

Onde:

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

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

C = peso da amostra (em gramas).

**Figura 6:** Dessecador utilizado.



Fonte: Autora (2023).

### 6.2.3 Teor de cinzas

Para a determinação do teor de cinzas, foi utilizado o método descrito por Sanchez *et al.* (2009), no qual uma massa de cerca de 1g de fragmentos de casca de laranja seca em estufa foi adicionada, em triplicata, a cadinhos de porcelana com peso constante pré-determinado. As amostras foram calcinadas em um forno mufla (Figura 7) da marca Fornitec, modelo 15x15x30, a uma temperatura de aproximadamente 710°C por 60 minutos. Em seguida, os cadinhos foram resfriados em um dessecador por 30 minutos antes da pesagem. O teor de cinzas será determinado de acordo com a norma ASTM D 2415:2020, e os resultados foram obtidos pela Equação 2:

$$\text{Teor de Cinzas (\%)} = \left( \frac{A-B}{C} \right) * 100$$

**(Equação 2)**

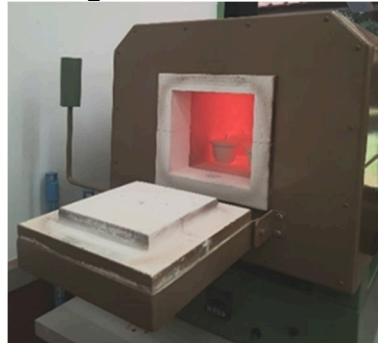
Onde:

A = peso do cadinho + peso amostra pós-aquecimento no forno mufla a 710°C (em gramas);

B = peso do cadinho vazio (em gramas);

C = peso da amostra (em gramas).

**Figura 7:** Forno mufla.



Fonte: Autora (2023).

#### 6.2.4 Material volátil

O material volátil da biomassa seca em estufa, foi definido utilizando o método proposto por Sanchez *et al.* (2009), em que foi pesada aproximadamente 1 grama de amostra em triplicata, em cadinhos de porcelana com peso constante pré-determinado. A seguir, a amostra foi aquecida em um forno mufla à temperatura de 850°C, por um período de 7 minutos, na ausência de oxigênio. Após o processo, os cadinhos foram pesados e o teor de material volátil foi determinado segundo a Equação 3, conforme proposto pelo método de Sanchez *et al.* (2009):

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

Onde:

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

B = peso do cadinho + peso amostra pós-aquecimento no forno mufla a 850°C (em gramas);

C = peso da amostra (em gramas).

#### 6.2.5 Teor de carbono fixo

A partir dos testes mencionados anteriormente, foi possível calcular o teor de carbono fixo contido na biomassa, utilizando a seguinte equação matemática descrita como Equação 4:

$$\text{Carbono Fixo (\%)} = 100 - [\text{Umididade (\%)} - \text{Cinzas (\%)} - \text{Material Volátil (\%)}]$$

**(Equação 4)**

#### 6.2.6 Densidade

Para a determinação da densidade aparente da biomassa da casca de laranja, foi necessário acoplar uma proveta de 25 mL a uma balança de precisão. Em seguida, a biomassa previamente seca e cortada em tiras foi adicionada na proveta. A massa (g) foi registrada nas sucessivas adições dos volumes de 5 mL, 10 mL, 15 mL, 20 mL e 25 mL. A densidade aparente foi calculada utilizando a Equação 5 a seguir:

$$\text{Densidade} \left( \frac{g}{mL} \right) = \left[ \frac{M(g)}{V(mL)} \right]$$

**(Equação 5)**

Onde:

m = massa (em gramas);

V = volume (em mililitros).

### 6.3 Pirólise da casa de laranja

Foi conduzida a degradação térmica da biomassa em um reator tubular de leito fixo feito de aço (Figura 8). O reator tem 100 cm de comprimento e um diâmetro externo de 10 cm. A biomassa fragmentada e seca foi introduzida no reator após ter sido submetida a uma estufa a 60°C. O gás de arraste utilizado na reação foi o vapor de água, aquecido em uma autoclave (Figura 9) em um intervalo de temperatura de 133°C a 139°C.

**Figura 8:** Reator de leito fixo que foi utilizado no ensaio de pirólise.



Fonte: Autora (2023).

**Figura 9:** Autoclave que foi utilizada no ensaio de pirólise.



Fonte: Autora (2023).

O vapor de água passou por todo comprimento do tubo, fazendo a degradação térmica da biomassa, com o tempo de reação de 30 minutos e taxa de aquecimento de 30°C/min. Na extremidade de saída, tinha um sistema de condensação para converter uma parte dos vapores produzidos na reação em líquido, chamado de bio-óleo (Figura 10). A fração não condensada foi liberada para atmosfera (Figura 11). Nesse estudo, foram conduzidos testes de pirólise em duas temperaturas diferentes (500 e 600°C).

**Figura 10:** Bio-Óleo.



Fonte: Autora (2023).

**Figura 11:** Fração gasosa.



Fonte: Autora (2023).

### 6.3.1 Balanço de massa

O balanço de massa foi dado de acordo com a massa que entrou e que saiu do reator. Sendo assim, a equação utilizada para calcular o balanço de massa foi a Equação 6:

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

Onde:

M = massa de carvão, em gramas;

$M1$  = massa da barca + massa do carvão ativado, em gramas;

$M2$  = massa da barca vazia, em gramas.

Utilizando o peso inicial do conjunto antes do processo de pirólise (Figura 12), a massa do carvão (Figura 13) obtida através do balanço de massa e as demais variáveis da Equação 6, foi possível calcular o rendimento do carvão ativado produzido através da degradação térmica.

**Figura 12:** Barca com fragmentos de casca de laranja antes do processo de degradação térmica.



Fonte: Autora (2023).

**Figura 13:** Carvão ativado após o processo de degradação térmica.



Fonte: Autora (2023).

## 6.4 Caracterização do carvão obtido

A caracterização do carvão foi realizada utilizando os métodos descritos abaixo.

### 6.4.1 Umidade

O teor de umidade do carvão foi obtido consoante o método descrito anteriormente (item 6.2.2) para a biomassa, seguindo a norma ASTM D 3173-87.

#### 6.4.2 Teor de cinzas

O teor de cinzas do carvão foi determinado segundo o método descrito anteriormente (item 6.2.3) para a casca de laranja fragmentada, utilizando o método de Sanchez *et al.* (2009).

#### 6.4.3 Material volátil

O teor de material volátil do carvão foi obtido através do método descrito anteriormente (item 6.2.4) para a biomassa, utilizando o método de Sanchez *et al.* (2009).

#### 6.4.4 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi calculado utilizando a equação descrita anteriormente (item 6.2.5) para a caracterização da biomassa.

#### 6.4.5 Densidade

A densidade aparente foi determinada utilizando o mesmo método definido anteriormente (item 6.2.6) para a casca de laranja, através da relação entre massa e volume.

#### 6.4.6 Adsorção

Quanto a adsorção, o ensaio foi feito numa mesa agitadora orbital TE141, da marca Tecnal (Figura 14), com o carvão ativado obtido na temperatura de 600 °C, com tempo de reação de 30 minutos e taxa de aquecimento de 30 °C/min. O ensaio foi realizado no LARSEN-IFTO/*Campus* Palmas.

**Figura 14:** Mesa agitadora.



Fonte: Autora (2023).

Foi utilizado o corante Azul de Metileno, como solução no teste, sendo aplicado um volume fixo de 30 mL dessa solução em todos os testes. A solução do corante teve seu pH ajustado para 7, enquanto a agitação foi mantida constante a 70 rpm. Após o processo de adsorção, que durou 30 minutos, as amostras foram filtradas utilizando papel filtro (Figura 15), e a concentração resultante de Azul de Metileno foi determinada por meio de espectrofotometria, utilizando um comprimento de onda de 660 nm.

**Figura 15:** Filtração das amostras.



Fonte: Autora (2023).

Foi utilizado um planejamento experimental do tipo Delineamento de Faces Centradas (DFC) para investigar os efeitos de duas variáveis independentes, a massa de carvão e a concentração da solução do corante, no teste de adsorção. Com o

auxílio do software *Protimiza Experimental Design*, foi realizada a análise dos resultados do ensaio. Os níveis dos fatores utilizados estão apresentados na Tabela 3 a seguir:

**Tabela 3:** Variáveis e níveis empregados no ensaio de adsorção..

| Variável                                 | Unidade | Código | Nível |      |      |
|------------------------------------------|---------|--------|-------|------|------|
|                                          |         |        | -1    | 0    | +1   |
| Massa de Carvão Ativado                  | g       | X1     | 0,10  | 0,30 | 0,50 |
| Concentração do corante Azul de Metileno | Mg/L    | X2     | 20    | 60   | 100  |

Fonte: Autora (2023).

Foram definidas duas respostas para o planejamento, a saber: (a) a absorbância do filtrado e (b) a capacidade de adsorção (Q). Realizou-se 11 ensaios, conforme indicado na Tabela 4 abaixo:

**Tabela 4:** Dosagem de carvão e concentração do corante para ensaio de adsorção.

| Ensaio | Variáveis                      |                                   |
|--------|--------------------------------|-----------------------------------|
|        | Massa de carvão ativado X1 (g) | Concentração do corante X2 (mg/L) |
| 1      | 0,10                           | 20                                |
| 2      | 0,50                           | 20                                |
| 3      | 0,10                           | 100                               |
| 4      | 0,50                           | 100                               |
| 5      | 0,10                           | 60                                |
| 6      | 0,50                           | 60                                |
| 7      | 0,30                           | 20                                |
| 8      | 0,30                           | 100                               |
| 9      | 0,30                           | 60                                |
| 10     | 0,30                           | 60                                |
| 11     | 0,30                           | 60                                |

Fonte: Autora (2023).

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos por meio dos ensaios de caracterização da biomassa da casca de laranja seca, dos ensaios de pirólise a 500 °C e 600 °C e da caracterização dos carvões obtidos.

### 7.1 Cinética de perda de massa

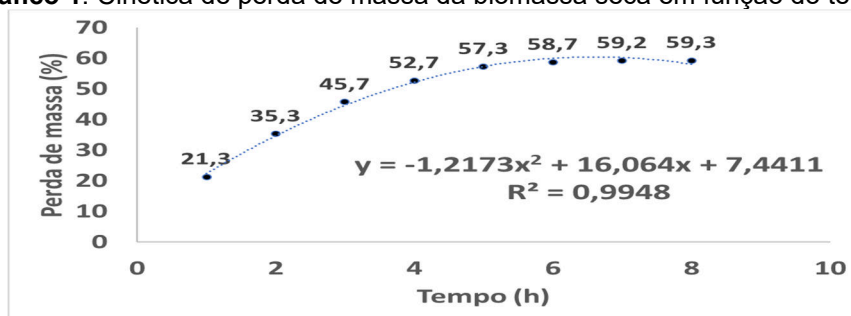
Os dados obtidos no ensaio de cinética de perda de massa da biomassa seca, estão representados na Tabela 5. Tal ensaio foi realizado por 8 horas, a uma temperatura de 50 °C e com uma massa de, aproximadamente, 3 gramas de biomassa.

**Tabela 5:** Resultados do ensaio de cinética de perda de massa.

| Tempo (h) | Peso do cadinho sem amostra (g) | Massa inicial da amostra (g) | Peso do cadinho com amostra <i>in natura</i> (g) | Peso do cadinho com amostra seca (g) | Diferença de peso de amostra (g) | Perda de massa (%) |
|-----------|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| 0         | 114,752                         | 3,051                        | 117,803                                          | -                                    | -                                | -                  |
| 1         | 114,752                         | 3,051                        | 117,803                                          | 117,152                              | 0,651                            | 21,3               |
| 2         | 114,752                         | 3,051                        | 117,803                                          | 116,726                              | 1,077                            | 35,3               |
| 3         | 114,752                         | 3,051                        | 117,803                                          | 116,407                              | 1,396                            | 45,7               |
| 4         | 114,752                         | 3,051                        | 117,803                                          | 116,196                              | 1,607                            | 52,7               |
| 5         | 114,752                         | 3,051                        | 117,803                                          | 116,053                              | 1,750                            | 57,3               |
| 6         | 114,752                         | 3,051                        | 117,803                                          | 116,011                              | 1,792                            | 58,7               |
| 7         | 114,752                         | 3,051                        | 117,803                                          | 115,996                              | 1,807                            | 59,2               |
| 8         | 114,752                         | 3,051                        | 117,803                                          | 115,992                              | 1,811                            | 59,3               |

Fonte: Autora (2023).

O Gráfico 1 abaixo, representa a perda de massa da amostra em função do tempo. Dessa forma, a equação que melhor representa o modelo é quadrática, e mostra haver uma tendência à estabilização da perda de massa da biomassa em, aproximadamente, 60%. Isso significa, que para o aproveitamento de 400 kg de casca de laranja para produção de carvão, por exemplo, será necessário o recolhimento de 1000 kg dessa biomassa.

**Gráfico 1:** Cinética de perda de massa da biomassa seca em função do tempo.

Fonte: Autora (2023).

## 7.2 Balanço de massa do carvão ativado

A Tabela 6 a seguir, demonstra o balanço de massa e o rendimento do carvão nas duas faixas de temperatura, após o procedimento de pirólise.

**Tabela 6: Balanço de massa e rendimento do carvão ativado.**

| Temperatura de pirólise (°C) | Barca vazia M2 (g) | Massa inicial do conjunto (g) | Massa final do conjunto M1 (g) | Massa do carvão M (g) | Rendimento do carvão (%) |
|------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| 500                          | 60,560             | 96,770                        | 70,370                         | 9,810                 | <b>27,092</b>            |
| 600                          | 61,335             | 97,009                        | 67,790                         | 6,455                 | <b>18,094</b>            |

Fonte: Autora (2023).

Pode-se perceber que o rendimento do carvão ativado, após a realização da degradação térmica da casca de laranja nas temperaturas de 500 °C e 600 °C, é de aproximadamente 27% e 18%, respectivamente. Com isso, é evidente que o rendimento do carvão ativado é inversamente proporcional à temperatura empregada no ensaio de pirólise.

## 7.3 Umidade

Na Tabela 7 abaixo, estão registrados tanto os dados utilizados para o cálculo do teor de umidade quanto os respectivos resultados obtidos.

**Tabela 7:** Teor médio de umidade da biomassa e carvão.

| Amostra em triplicata |   | A (g)  | B (g)  | C (g) | Umidade (%) | Média (%)    |
|-----------------------|---|--------|--------|-------|-------------|--------------|
| Biomassa seca         | 1 | 36,178 | 36,163 | 1,049 | 1,43%       | <b>0,88%</b> |
|                       | 2 | 34,104 | 34,097 | 1,022 | 0,68%       |              |
|                       | 3 | 35,904 | 35,898 | 1,126 | 0,53%       |              |
| Carvão 500 °C         | 1 | 34,368 | 34,309 | 1,068 | 5,52%       | <b>5,41%</b> |
|                       | 2 | 33,259 | 33,198 | 1,110 | 5,50%       |              |
|                       | 3 | 35,017 | 34,957 | 1,151 | 5,21%       |              |

|               |   |        |        |       |       |              |
|---------------|---|--------|--------|-------|-------|--------------|
|               | 1 | 34,740 | 34,662 | 1,104 | 7,07% |              |
| Carvão 600 °C | 2 | 34,682 | 34,607 | 1,118 | 6,71% | <b>6,69%</b> |
|               | 3 | 34,205 | 34,136 | 1,099 | 6,28% |              |

Fonte: Autora (2023).

De acordo com Almeida (2008), teores de umidade inferiores a 10% na biomassa são considerados adequados para serem submetidos a processos termoquímicos. Assim, ao alcançar um teor médio de umidade de 0,88% no estudo, pode-se concluir que, após a secagem, a casca de laranja demonstra ser uma biomassa de excelente qualidade para a execução da pirólise.

De acordo com Silva (2009), a eficiência dos carvões na adsorção é afetada pela presença de umidade, uma vez que uma parte dos poros que poderiam estar disponíveis para o processo de adsorção fica ocupada por moléculas de água. Além disso, quanto maior o teor de umidade menor o poder calorífico do carvão ativado (Basso, 2017). Segundo Marton (2002), o teor de umidade máximo de carvões ativados comerciais é de 10%, assim, os valores médios de teor de umidade dos carvões obtidos (5,41% e 6,69%) são considerados satisfatórios.

#### 7.4 Teor de cinzas

A Tabela 8 a seguir, apresenta os resultados obtidos através do ensaio do teor de cinzas.

**Tabela 8:** Teor médio de cinzas da biomassa e carvão.

| Amostra em triplicata | A (g) | B (g)  | C (g)  | Teor de Cinzas (%) | Média (%) |
|-----------------------|-------|--------|--------|--------------------|-----------|
| Biomassa seca         | 1     | 35,166 | 35,129 | 1,049              | 3,53%     |
|                       | 2     | 33,083 | 33,082 | 1,022              | 0,10%     |
|                       | 3     | 34,783 | 34,778 | 1,126              | 0,44%     |
| Carvão 500 °C         | 1     | 33,399 | 33,300 | 1,068              | 9,27%     |
|                       | 2     | 32,233 | 32,149 | 1,110              | 7,57%     |
|                       | 3     | 33,979 | 33,866 | 1,151              | 9,82%     |
| Carvão 600 °C         | 1     | 33,763 | 33,636 | 1,104              | 11,50%    |
|                       | 2     | 33,691 | 33,564 | 1,118              | 11,36%    |
|                       | 3     | 33,226 | 33,106 | 1,099              | 10,92%    |

Fonte: Autora (2023).

De acordo com Heylmann *et al.* (2021), existe uma relação direta entre o teor de cinzas e a quantidade de matéria inorgânica presente no material, de modo que teores mais elevados de cinzas estão associados a valores maiores de matéria

inorgânica. Por isso, é indispensável manter o teor de cinzas em níveis reduzidos, pois a matéria inorgânica contida no carvão pode atuar como interferente ao competir na adsorção (Silva, 2009). Além disso, segundo Rodrigues (2019), o teor de cinzas é inversamente proporcional ao poder calorífico.

Benevides (2015), Circhia (2022) e Naves (2022), também efetuaram a caracterização da biomassa da laranja, resultando nos valores correspondentes de 4,00%, 4,170% e 2,589%, respectivamente. Com isso, comparando-se tais resultados com o teor médio de cinzas do presente estudo (1,36%), pode-se concluir que a amostra condiz com a literatura.

Lopes *et al.* (2013), realizou a caracterização do carvão ativado comercial quanto ao teor de cinzas e como resultado obteve 15,20%. Como os valores médios dos carvões foram inferiores a 15%, pode-se afirmar que o carvão ativado da casca de laranja se mostra eficiente e apresenta baixa quantidade de material inorgânico.

## 7.5 Teor de material volátil

Os dados utilizados para a obtenção de material volátil, bem como seus resultados, estão apresentados na Tabela 9 abaixo.

**Tabela 9:** Teor médio de material volátil da biomassa e carvão.

| Amostra em triplicata |   | A (g)  | B (g)  | C (g) | Material Volátil (%) | Média (%)     |
|-----------------------|---|--------|--------|-------|----------------------|---------------|
| Biomassa seca         | 1 | 36,178 | 35,308 | 1,049 | 82,94%               | <b>85,37%</b> |
|                       | 2 | 34,104 | 33,220 | 1,022 | 86,50%               |               |
|                       | 3 | 35,904 | 34,928 | 1,126 | 86,68%               |               |
| Carvão 500 °C         | 1 | 34,368 | 33,930 | 1,068 | 41,01%               | <b>41,09%</b> |
|                       | 2 | 33,259 | 32,804 | 1,110 | 40,99%               |               |
|                       | 3 | 35,017 | 34,542 | 1,151 | 41,27%               |               |
| Carvão 600 °C         | 1 | 34,740 | 34,289 | 1,104 | 40,85%               | <b>40,92%</b> |
|                       | 2 | 34,682 | 34,216 | 1,118 | 41,68%               |               |
|                       | 3 | 34,205 | 33,763 | 1,099 | 40,22%               |               |

Fonte: Autora (2023).

Segundo Silva (2018), a combustão ocorre de forma mais rápida quando o teor de material volátil da biomassa é elevado, o que beneficia o processo de pirólise. Com isso, o valor médio encontrado para biomassa da casca de laranja (85,37%) se mostra satisfatório. Além disso, tal valor se aproxima do encontrado por Benevides (2015), cerca de 82% e Naves (2022), cerca de 75%, para bagaço de laranja, e por Circhia (2022), cerca de 84%, para a casca da laranja.

De acordo com Yusop *et al.* (2021), espera-se que o teor de material volátil do carvão ativado seja menor em comparação com o material precursor, uma vez que durante a carbonização ocorre a eliminação de parte dos compostos voláteis. Com base nisso, pode-se confirmar a veracidade dessa afirmação, uma vez que a biomassa da casca de laranja apresentou um teor médio de material volátil de cerca de 86%, enquanto os carvões obtidos após o processo de pirólise apresentaram valores inferiores a 42%

## 7.6 Teor de carbono fixo

Para o cálculo do teor de carbono fixo, foi utilizado os resultados anteriores, conforme Tabela 10.

**Tabela 10:** Teor médio de carbono fixo da biomassa e carvão.

| Amostra em triplicata | Umidade média (%) | Teor médio de cinzas (%) | Material volátil médio (%) | Teor médio de carbono fixo (%) |
|-----------------------|-------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Biomassa seca         | 1                 | 0,88                     | 1,36                       | 85,37                          |
|                       | 2                 |                          |                            |                                |
|                       | 3                 |                          |                            |                                |
| Carvão 500 °C         | 1                 | 5,41                     | 8,89                       | 41,09                          |
|                       | 2                 |                          |                            |                                |
|                       | 3                 |                          |                            |                                |
| Carvão 600 °C         | 1                 | 6,69                     | 11,26                      | 40,92                          |
|                       | 2                 |                          |                            |                                |
|                       | 3                 |                          |                            |                                |

Fonte: Autora (2023).

Com esse resultado, percebe-se que durante a pirólise, há a liberação de compostos que possuem uma fácil degradação térmica, enquanto os materiais mais resistentes termicamente tendem a se acumular.

Ao comparar o teor médio de carbono fixo da biomassa seca (cerca de 13%) com o valor obtido por Circhia (2022) para o bagaço da laranja, verificamos valores semelhantes. Em seus ensaios, Circhia obteve um teor médio de carbono fixo de aproximadamente 12%.

## 7.7 Densidade

A densidade da biomassa e do carvão foi obtida utilizando-se a proveta de 25

mL, com adições sucessivas de massa a cada 5 mL. O resultado encontrado está disposto na Tabela 11 abaixo.

**Tabela 11:** Densidade média da biomassa e carvão.

| Proveta (mL)                  | Biomassa seca        | Carvão 500 °C        | Carvão 600 °C        |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                               | Massa adicionada (g) | Massa adicionada (g) | Massa adicionada (g) |
| 5                             | 1,95                 | 0,87                 | 1,07                 |
| 10                            | 4,39                 | 1,85                 | 2,31                 |
| 15                            | 6,90                 | 2,91                 | 3,63                 |
| 20                            | 9,30                 | 3,93                 | 0                    |
| 25                            | 11,04                | 4,88                 | 0                    |
| <b>Densidade média (g/mL)</b> | <b>0,44</b>          | <b>0,19</b>          | <b>0,23</b>          |

Fonte: Autora (2023).

A densidade é a relação da massa por um volume, com isso, quanto menor o volume ocupado por determinada massa, maior a densidade. Sendo assim, o valor da densidade está altamente ligado à granulometria do material, apresentando um valor mais elevado a medida que se aumenta a compactação e reduz o índice de vazios.

Conforme mencionado por Silva (2018), densidades reduzidas são vantajosas para o carvão ativado, pois indicam uma maior presença de espaços vazios e uma área superficial mais ampla, o que contribui positivamente para o processo de adsorção. De acordo com Marton (2002), carvões ativados comerciais, em geral, possuem densidade de  $0,4 \pm 0,05$ .

No presente estudo, a densidade média da biomassa seca foi de 0,44 g/mL e a do carvão ativado foi de 0,23 g/mL (600°C), valores próximos aos obtidos por Naves (2022), que obteve 0,414 g/mL para o bagaço de laranja e 0,221 g/mL para o carvão ativado a 600°C. Com isso, esses resultados estão em uma faixa considerada satisfatória.

## 7.8 Adsorção

Para o ensaio de adsorção com o carvão ativado proveniente da pirólise da casca de laranja (600°C), foi obtido como resultado os parâmetros de concentração residual de azul de metileno ( $Y_1$ , (-)) e capacidade de adsorção ( $Q$ , mg/g), conforme Tabela 12 a seguir.

**Tabela 12:** Resultado do ensaio de adsorção.

| Ensaio | Variáveis                      |                                   | Absorbância Y1 | Capacidade de adsorção- Q (mg/g) |
|--------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------|----------------------------------|
|        | Massa de carvão ativado X1 (g) | Concentração do corante X2 (mg/L) |                |                                  |
| 1      | 0,10                           | 20                                | 1,63           | 3,00                             |
| 2      | 0,50                           | 20                                | 0,11           | 1,15                             |
| 3      | 0,10                           | 100                               | 3,38           | 23,83                            |
| 4      | 0,50                           | 100                               | 3,30           | 4,79                             |
| 5      | 0,10                           | 60                                | 3,33           | 11,92                            |
| 6      | 0,50                           | 60                                | 2,83           | 2,56                             |
| 7      | 0,30                           | 20                                | 0,62           | 1,62                             |
| 8      | 0,30                           | 100                               | 3,29           | 8,00                             |
| 9      | 0,30                           | 60                                | 3,29           | 3,99                             |
| 10     | 0,30                           | 60                                | 3,30           | 3,99                             |
| 11     | 0,30                           | 60                                | 3,27           | 4,01                             |

Fonte: Autora (2023).

### 7.8.1 Primeira resposta do planejamento experimental: absorbância

A seguir, na Tabela 13, são apresentados os coeficientes de regressão para as variáveis do ensaio de adsorção em relação à absorbância.

**Tabela 13:** Coeficientes de regressão para definição da absorbância.

| Fatores         | Coeficiente de regressão | Erro padrão | t calculado | p-valor |
|-----------------|--------------------------|-------------|-------------|---------|
| Média           | 3,21                     | 0,08        | 39,45       | 0,0000  |
| X1              | -0,35                    | 0,06        | -5,40       | 0,0029  |
| X1 <sup>2</sup> | -0,02                    | 0,10        | -0,18       | 0,8608  |
| X2              | 1,27                     | 0,06        | 19,58       | 0,0000  |
| X2 <sup>2</sup> | -1,15                    | 0,10        | -11,49      | 0,0001  |
| X1.X2           | 0,36                     | 0,08        | 4,56        | 0,0061  |

Fonte: Autora (2023).

Com isso, foi obtida a Equação 7:

$$\text{Absorbância (Y1)} = 3,21 - 0,35 X1 - 0,02 X1^2 + 1,27 X2 - 1,15 X2^2 + 0,36 X1 X2$$

**(Equação 7)**

Onde:

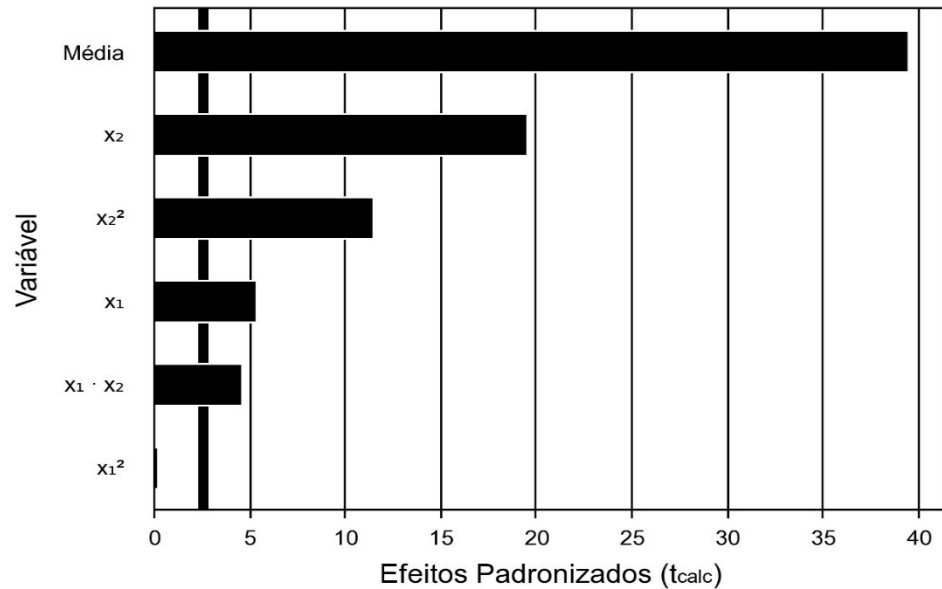
X1 = massa de carvão, em gramas;

X2 = concentração do corante azul de metileno (mg/L).

O Diagrama de Pareto, representado no Gráfico 2, destaca as variáveis que têm os efeitos mais significativos na absorbância do carvão ativado derivado da degradação térmica da casca de laranja. Com isso, percebe-se que a variável X2,

concentração do corante azul de metileno (mg/L), apresenta grande influência no resultado.

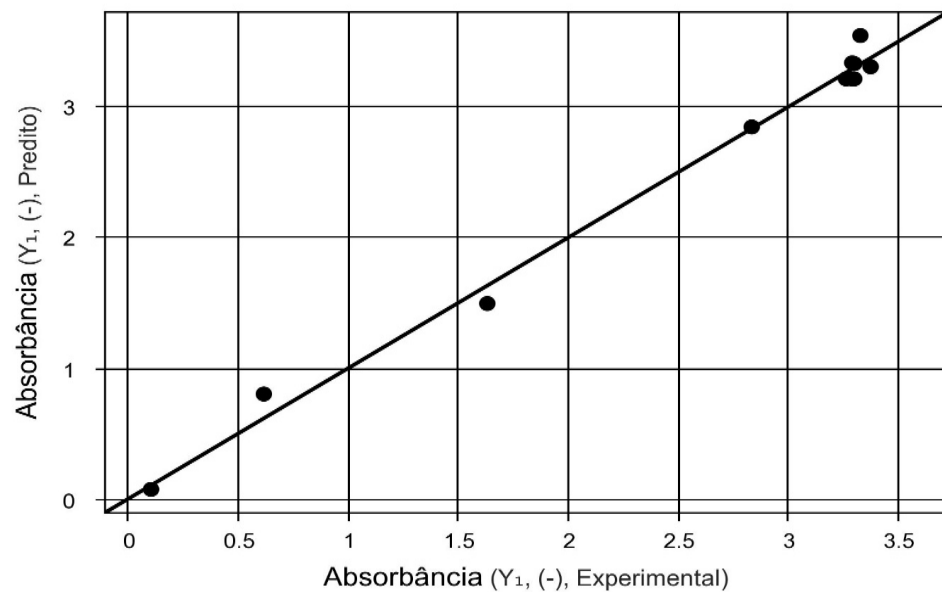
**Gráfico 2:** Diagrama de Pareto da absorbância do carvão da casca de laranja.



Fonte: Autora (2023).

Já o Gráfico 3, confirma que houve uma discrepância mínima entre os valores observados e os valores previstos pelo modelo, como evidenciado pela proximidade dos pontos agrupados em torno da linha representativa.

**Gráfico 3:** Valores experimentais X valores preditos quanto à absorbância do carvão.



Fonte: Autora (2023).

A Tabela 14 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) para a absorbância das amostras de carvão ativado na adsorção de azul de metileno.

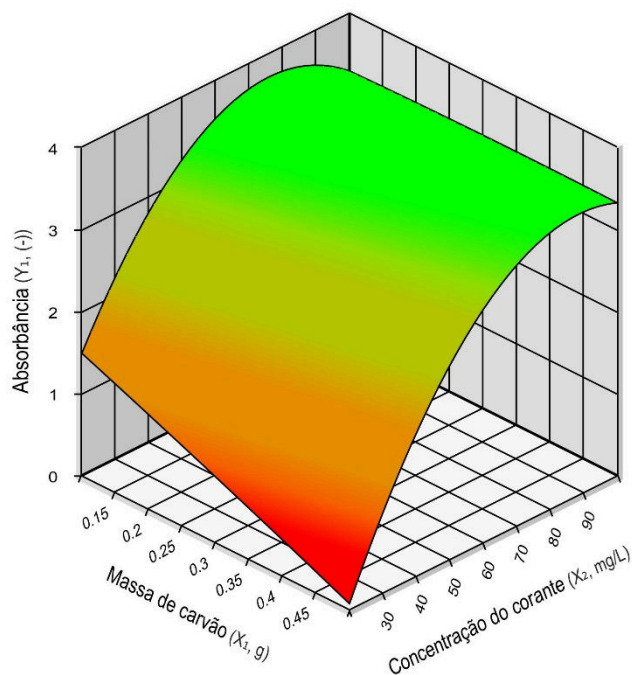
**Tabela 14:** ANOVA para a absorbância das amostras de carvão ativado.

| Fonte de variação | Soma dos Quadrados | Graus de liberdade | Quadrado médio | Fcalc | p-valor |
|-------------------|--------------------|--------------------|----------------|-------|---------|
| Regressão         | 14,5               | 5                  | 2,9            | 115,4 | 0,00004 |
| Resíduos          | 0,1                | 5                  | 0,0            | -     | -       |
| Falta de ajuste   | 0,1                | 3                  | 0,0            | 144,3 | 0,00689 |
| Erro puro         | 0,0                | 2                  | 0,0            | -     | -       |
| Total             | 14,6               | 10                 | -              | -     | -       |
| R <sup>2</sup>    | 99,14%             | -                  | -              | -     | -       |

Fonte: Autora (2023).

O valor R<sup>2</sup> de 99,14%, é uma indicação de que o modelo apresenta um ajuste de alta qualidade aos dados. No Gráfico 4, é apresentada a superfície gerada por meio do planejamento experimental. Observa-se que a capacidade de absorbância foi alcançada em condições de baixa quantidade de massa de carvão e alta concentração de corante, como evidenciado pelas regiões destacadas em verde.

**Gráfico 4:** Superfície para absorbância em relação à massa de carvão e concentração de corante.



Fonte: Autora (2023).

### 7.8.2 Segunda resposta do planejamento experimental: razão de adsorção (Q)

Para a razão de adsorção (Q), que é a capacidade máxima de adsorção do carvão ativado (600°C), foi obtido um modelo de regressão linear, permitindo a análise das relações entre as variáveis. Na Tabela 15, estão apresentados os coeficientes de regressão do modelo para a razão de adsorção (Q).

**Tabela 15:** Coeficientes de regressão para definição da capacidade máxima de adsorção.

| Fatores         | Coeficiente de regressão | Erro padrão | t calculado | p-valor |
|-----------------|--------------------------|-------------|-------------|---------|
| Média           | 3,97                     | 0,79        | 5,03        | 0,0040  |
| X1              | -5,04                    | 0,63        | -8,02       | 0,0005  |
| X1 <sup>2</sup> | 3,32                     | 0,97        | 3,43        | 0,0186  |
| X2              | 5,14                     | 0,63        | 8,19        | 0,0004  |
| X2 <sup>2</sup> | 0,89                     | 0,97        | 0,92        | 0,4017  |
| X1.X2           | -4,30                    | 0,77        | -5,59       | 0,0025  |

Fonte: Autora (2023).

Com isso, foi obtida a Equação 8:

$$\text{Capacidade de adsorção (Q)} = 3,97 - 5,04 X1 + 3,32 X1^2 + 5,14 X2 + 0,89 X2^2 - 4,30 X1.X2$$

**(Equação 8)**

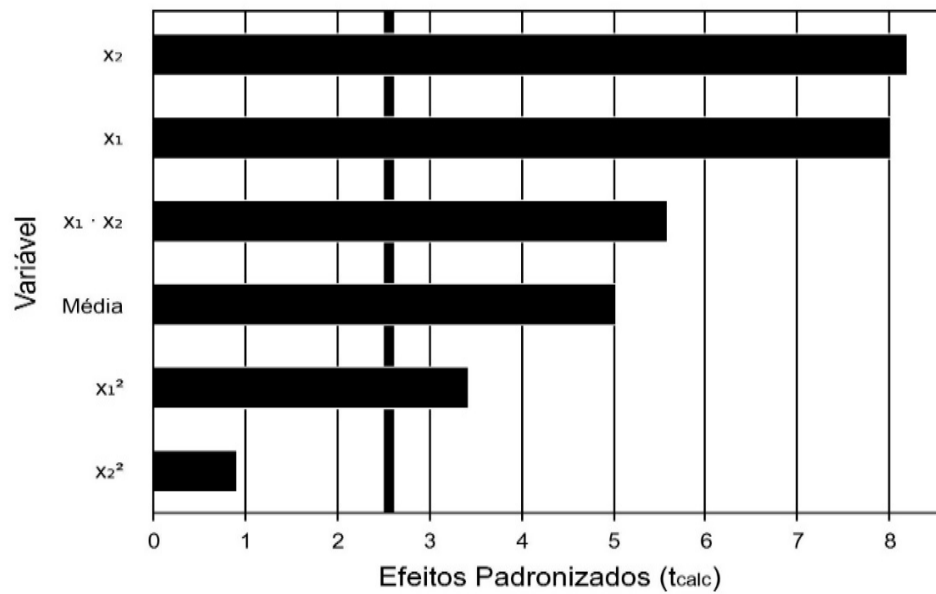
Onde:

X1 = massa de carvão, em gramas;

X2 = concentração do corante azul de metileno (mg/L).

O Diagrama de Pareto, representado no Gráfico 5, destaca as variáveis que têm os efeitos mais significativos na capacidade máxima de adsorção do carvão ativado derivado da degradação térmica da casca de laranja. Com isso, percebe-se que as variáveis X1 e X2, massa do carvão (g) e concentração do corante azul de metileno (mg/L), respectivamente, apresentam grande influência no resultado.

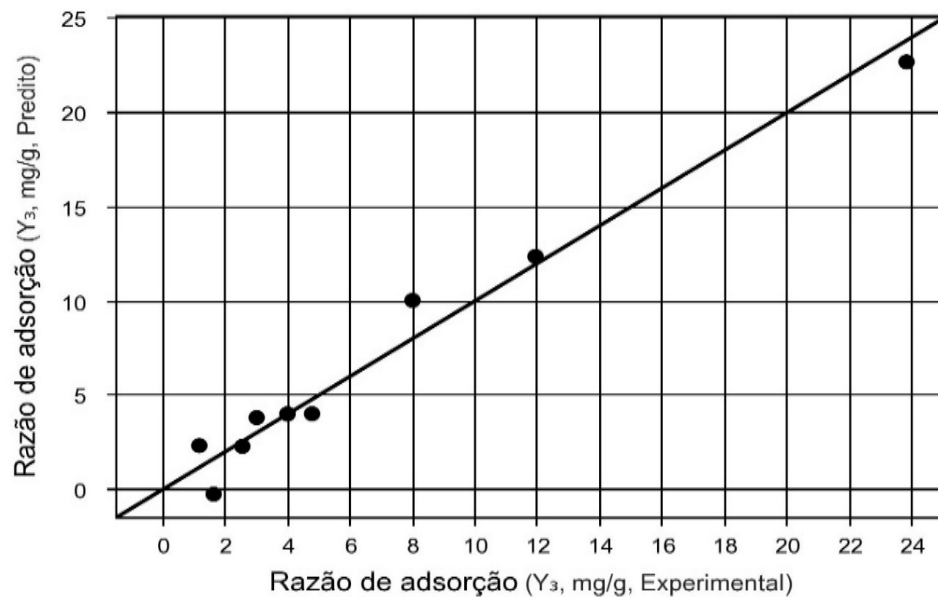
**Gráfico 5:** Diagrama de Pareto da capacidade máxima de adsorção do carvão da casca de laranja.



Fonte: Autora (2023).

Já no Gráfico 6, são apresentados os valores obtidos em comparação com os valores preditos para o teste de adsorção do índice de azul de metileno.

**Gráfico 6:** Valores experimentais X valores preditos quanto à capacidade máxima de adsorção do carvão ativado.



Fonte: Autora (2023).

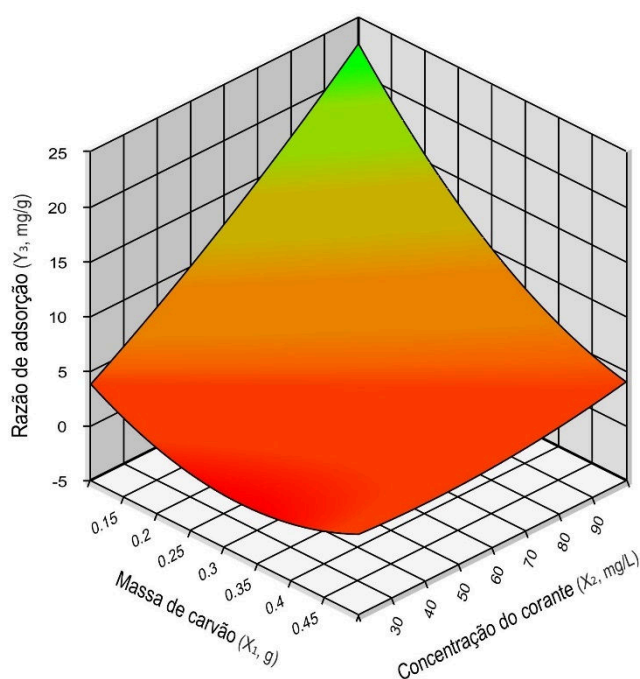
A Tabela 16 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) para a capacidade máxima de adsorção das amostras de carvão ativado da casca de laranja na adsorção de azul de metileno.

**Tabela 16:** ANOVA para a capacidade máxima de adsorção das amostras de carvão ativado.

| Fonte de variação | Soma dos Quadrados | Graus de liberdade | Quadrado médio | Fcalc   | p-valor |
|-------------------|--------------------|--------------------|----------------|---------|---------|
| Regressão         | 421,3              | 5                  | 84,3           | 35,6    | 0,00065 |
| Resíduos          | 11,8               | 5                  | 2,4            | -       | -       |
| Falta de ajuste   | 11,8               | 3                  | 3,9            | 37125,6 | 0,00003 |
| Erro puro         | 0,0                | 2                  | 0,0            | -       | -       |
| Total             | 433,1              | 10                 | -              | -       | -       |
| R <sup>2</sup>    | 97,27%             | -                  | -              | -       | -       |

Fonte: Autora (2023).

Através da análise do p-valor da regressão e  $R^2$ , conclui-se que o modelo é significativo, pois se ajusta à amostra. No Gráfico 7, é apresentada a superfície gerada por meio do planejamento experimental. Observa-se que a capacidade máxima de adsorção foi alcançada em condições de baixa quantidade de massa de carvão e alta concentração de corante, como evidenciado pelas regiões destacadas em verde.

**Gráfico 7:** Superfície para capacidade máxima de adsorção em relação à massa de carvão e concentração de corante.

Fonte: Autora (2023).

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analizando os resultados obtidos da caracterização da biomassa seca da casca da laranja, quanto a umidade, teor de cinzas, teor de material volátil, teor de carbono fixo e densidade, percebe-se que os valores obtidos estão conforme a literatura.

Vale ressaltar, que para o aproveitamento de 400 kg, aproximadamente, de biomassa seca para produção de carvão ativado, será necessária a coleta de cerca de 1000 kg de casca de laranja. Procedendo assim, será obtido em torno de 108 kg de carvão ativado a 500 °C e 72 kg de carvão ativado a 600°C, aproximadamente. Dessa forma, fica evidente que a relação entre a temperatura de pirólise e o rendimento do carvão ativado obtido é inversamente proporcional, tendo uma queda de rendimento de quase 10% com o aumento de 100 ° C na pirólise da casca de laranja.

Além disso, o carvão ativado do presente estudo apresentou teor de umidade e teor de carbono fixo abaixo de 10% e 15%, respectivamente. Seu material volátil é menor que o teor do material precursor e, por conta da liberação de compostos que possuem fácil degradação, houve uma queda de 3,48% do teor de carbono fixo com o aumento de 100 °C da temperatura de pirólise.

Ademais, de acordo com os resultados obtidos no teste de adsorção do corante azul de metileno usando o carvão ativado derivado da pirólise da casca de laranja, o experimento revelou que a capacidade de adsorção desse carvão se torna mais eficiente com uma baixa quantidade de massa e uma alta concentração de corante azul de metileno. Com isso, os resultados adquiridos no estudo corroboram com a bibliografia e mostram a eficiência da utilização da casca de laranja para a geração de carvão ativado, com capacidade adsorvente, por meio da degradação térmica.

Além dos resultados positivos alcançados, vale destacar que a biomassa da casca de laranja é amplamente disponível no Brasil, já que o país é o maior produtor mundial da fruta, e geralmente descartada sem reaproveitamento, tornando-se viável a aquisição sem custos desse material para o aproveitamento. Com a utilização desse resíduo e o descarte adequado, os impactos ambientais associados a essa biomassa são mitigados.

## 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 gás-óleo em craqueamento catalítico**. Dissertação (Mestrado em Ciências em tecnologia de processos químicos e bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 167, 2008.
- ASTM D 2415. **Standard Test Method for Ash in Coal Tar and Pitch**. American Society of Testing Materials International. West Conshohocken, 2020.
- ASTM D 3173. **Standard Method for Determination of Moisture Content in Biomass**. American Society of Testing Materials International. West Conshohocken, 1987.
- BASSO, S. **Análise do Carvão Vegetal para Uso Doméstico**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, p. 42, 2017.
- BENEVIDES, L. C. **Pirólise do Bagaço de laranja: análise cinética dos estágios de secagem e devolatização**. Tese (Mestrado em Energia, na área de concentração Engenharia, Tecnologia e Gestão) – Universidade Federal do Espírito Santo. São Mateus, p. 175, 2015.
- BEZERRA, V. S. **Pós-colheita de Frutos**. Macapá: Embrapa Amapá, p. 26, 2003. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/905530>>. Acesso em: 21 mar. 2023.
- BORGES, A. C. G.; COSTA, V. M. H. de. M. A Evolução do Agronegócio Citrícola Paulista e o Perfil da Intervenção do Estado. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, v. 9, n. 2, p. 101-124, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.25061/2527-2675/ReBraM/2006.v9i2.270>>. Acesso em: 21 mar. 2023.
- BUENO, P. H. T. **Panorama geral das perdas e desperdício de alimentos e soluções para o acesso à alimentação**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Uberlândia. Patos de Minas, p. 51, 2019.
- CANCHE-ESCAMILLA, G. *et al.* Obtención de Celulosa a Partir de los Desechos Agrícolas del Banano. **Inf. tecnol.**, v. 16, n. 1, p. 83-88, 2005. Disponível em: <[https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S071807642005000100012](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S071807642005000100012)>. Acesso em: 25 de março de 2023.
- CIRCHIA, M. V. **Estudo cinético da pirólise da biomassa casca de laranja**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Alimentos) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, p. 49, 2022.
- CLAUDINO, A. **Preparação de carvão ativado a partir de turfa e sua utilização na remoção de poluentes**. Tese de Mestrado (programa de Pós-graduação em

Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 101, 2003.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Citros**: o produtor pergunta, a Embrapa responde. 1ª ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, p. 217, 2005.

FERNANDES, B. C. **Desenvolvimento histórico da citricultura**. Trabalho de conclusão de curso (Ciências Econômicas) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Araraquara, p. 49, 2010.

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

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. 2023. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematico-da-producao-agricola.html>>. Acesso em: 21 de março de 2023.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção de laranja**. 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/laranja/br>>. Acesso em: 16 de março de 2023.

LOPES, C. W. *et al.* Síntese e caracterização de carvões ativados derivados do sabugo de milho. **Perspectiva**, v.37, n.139, p.27-35, 2013. Disponível em: <[https://www.uricer.edu.br/site/pdfs/perspectiva/139\\_360.pdf](https://www.uricer.edu.br/site/pdfs/perspectiva/139_360.pdf)>. Acesso em: 29 mai. 2023.

MACÊDO, L. P. M. P de. **Viabilidade da produção de carvão ativado a partir de resíduos alternativos**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais) – Universidade Católica de Pernambuco. Recife, p. 92, 2012.

MAIA, T. A. C. *et al.* Produção de carvão ativado a partir da casca de laranja. In: **MOCCIF19-4ª Edição da Mostra Científica e Cultural do IFSP Suzano**. 2019.

MARTINELLI JÚNIOR, O. **O complexo agroindustrial no Brasil: Um estudo sobre a agroindústria citrícola do Estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Economia) – FEA/USP, São Paulo, 1987.

MARTON, J. M. **Avaliação de diferentes carvões ativos e das condições de adsorção no tratamento do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana para obtenção biotecnológica de xilitol**. Tese de Mestrado (Departamento de Biotecnologia - Pós-graduação em Biotecnologia Industrial) – FEQL. Lorena, p. 143, 2002.

BAPTISTA, J. L. M.; RODOLPHO, D. Gestão dos resíduos na indústria alimentícia.

**Revista Interface Tecnológica**, v. 18, n. 1, p. 567–579, 2021. Disponível em: <<https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/1139>>. Acesso em: 15 de março de 2023.

NAVES, P. J. S. **Degradação térmica de bagaço de laranja visando produção de carvão ativado e sua aplicação como adsorvente de corante químico**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – IFTO. Palmas, p.40, 2022.

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

PEDROZA, M. M. *et al.* Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos em Processo de Pirólise. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, n. 2, p. 1-24, 2017. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/46577/pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2023.

PEÑA H, K. J. *et al.* Preparación de carbón activado a partir de cáscara de naranja por activación química. Caracterización física y química. **Revista Colombiana de Química**, v. 41, n. 2, p. 311-323, 2012. Disponível em: <<https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/39377/0>>. Acesso em: 22 de março de 2023.

RODRIGUES, C. R. **Degradação térmica da casca de arroz e utilização do carvão obtido no processo para polimento de águas cinzas**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Tocantins. Palmas, p. 97, 2019.

RODRIGUES, L. R.; OLIVEIRA, E. A. A. Q. A trajetória das exportações de laranja do Brasil. **VIII ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA-UNIVAP**, 2006.

SÁNCHEZ, M. E. *et al.* Effect of pyrolysis temperature on the composition of the oils obtained from sewage sludge. **biomass and bioenergy**, v. 33, n. 6-7, p. 933-940, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.02.002>>. Acesso em: 15 mar. 2023.

SANTANA, M. F. S de. **Caracterização físico-química de fibra alimentar de laranja e maracujá**. Tese de Doutorado (Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, p. 188, 2005.

SANTOS, C. M. **Uso de cascas de laranja como adsorvente de contaminantes no tratamento de água**. Tese de Mestrado (Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Sorocaba, p. 144, 2015.

SENAR – Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. A importância da citricultura nacional, 10 de junho de 2019. Disponível em: <<https://www.cnabrazil.org.br/noticias/a-importancia-da-citricultura-nacional>>. Acesso em: 21 de março de 2023.

SENAR – Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. COM mais da metade da produção mundial de suco de laranja, frutas cítricas no Brasil potencializam o PIB nacional, 8 de junho de 2016. Disponível em: <<https://www.cnabrazil.org.br/noticias/com-mais-da-metade-da-produção-mundial-de-suco-de-laranja-frutas-cítricas-no-brasil-potencializam-o-pib-nacional>>. Acesso em: 16 de março de 2023.

SILVA, E. M. da. **Obtenção, caracterização e utilização do carvão de serragem como adsorvente para purificação de água**. Tese de Mestrado (Programa de Pós-graduação mestrado profissional em Engenharia Ambiental) – UFT. Palmas, p. 82, 2018.

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 (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) – UFRS. Porto Alegre, p. 204, 2009.

USDA. United States Department of Agriculture, 2023. **Citrus: World Markets and Trade**. Disponível em: <<https://www.fas.usda.gov/data/citrus-world-markets-and-trade>>. Acesso em: 24 de março de 2023.

VIDAL, M. F. Produção de laranja na área de atuação do BNB. **Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil**, ano 6, n.198, p. 1-14, dez., 2021. Disponível em: <<https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/handle/123456789/1041?mode=full>>. Acesso em: 15 mar. 2023.

YUSOP, *et al.* Adsorption of cationic methylene blue dye using microwave-assisted activated carbon derived from acacia wood: Optimization and batch studies. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 14, Issue 6, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103122>>. Acesso em: 29 mai. 2023.

ZANATTA, E. R. *et al.* Kinetic studies of thermal decomposition of sugarcane bagasse and cassava bagasse. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, p. 437-445, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10973-016-5378-x>>. Acesso em: 27 de março de 2023.