

**FABRICIO BORGES RIBEIRO**

**PIRÓLISE DA CASCA DE CASTANHA-DO-BRASIL VISANDO A  
PRODUÇÃO DE CARVÃO PARA FINS INDUSTRIAIS**

**PALMAS**

**2021**

**FABRICIO BORGES RIBEIRO**

**PIRÓLISE DA CASCA DE CASTANHA-DO-BRASIL VISANDO A  
PRODUÇÃO DE CARVÃO PARA FINS INDUSTRIAIS**

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**

**2021**

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

---

- R484p Ribeiro, Fabrício Borges  
Pirólise da casca de Castanha-do-Brasil visando a produção de carvão para fins industriais / Fabrício Borges Ribeiro. – Palmas, TO, 2021.  
57 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, 2021.
- Orientador: Marcelo Mendes Pedroza
1. Pirólise. 2. Carvão ativado. 3. Caracterização tanto da biomassa quanto do 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

FABRICIO BORGES RIBEIRO

### PIRÓLISE DA CASCA DE CASTANHA-DO-BRASIL VISANDO A PRODUÇÃO DE CARVÃO PARA FINS INDUSTRIAIS

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: 03 de fevereiro de 2021

#### BANCA AVALIADORA



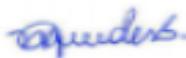
---

Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza  
Orientador - IFTO



---

Prof. Me. Antonelli Santos Silva  
Examinador - IFAC



---

Prof. Me. Michelle Ludmila Guedes dos Santos  
Examinadora – IFTO

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus por ser sempre minha força e minha fortaleza, e por todas bênçãos derramadas sobre mim.

Ao meu pai e irmãos pelo amor, incentivo e força em todos momentos e decisões da minha vida.

À minha família e amigos em geral, o carinho e a cooperação, pois foram essenciais para está conquista. Obrigado a todos!

Aos meus padrinhos, Vilmar e Maria Antônia, obrigado por todos incentivos e ensinamentos.

A Maria Clara Remde, por ser sempre compreensiva e paciente nos meus momentos de ocupação e pelo apoio incondicional.

Ao meu orientador, Marcelo Mendes Pedroza, pela orientação, pelo aprendizado durante toda graduação e por acreditar no nosso trabalho. Não poderia deixar de agradecer também pela amizade e pelos conselhos que levarei por toda minha vida. Obrigada pela oportunidade de trabalhar com você!

Ao Professor Mestre Antonelli Santos Silva, que disponibilizou o material para a realização desse trabalho.

Aos meus amigos Bruno Drumm, Gabriel Milhomem e Wattson Teixeira que caminharam comigo ao longo desses 5 anos de faculdade. Vai fazer muita falta nossas reuniões e em seguida tomarmos aquele Guaraná da Amazônia.

Ao Renan Rotondano, meu melhor amigo, que sempre incentiva e acredita no meu potencial.

Aos meus amigos de turma, obrigado pelos momentos vividos na faculdade, pelo apoio dado um ao outro, sempre encorajando para seguir firme e enfrentar as dificuldades em busca de nossos sonhos.

À Atlética Concreta, que foi uma das grandes responsáveis pela minha formação em pessoa, ao longo desses 4,5 anos que estive a frente da mesma.

Ao IFTO – Campus Palmas, pelas oportunidades oferecidas e pelas experiências vividas.

Muito obrigado!

## RESUMO

RIBEIRO, Fabricio Borges. **Pirólise da casca de Castanha-do-Brasil visando a produção de carvão para fins industriais**. 2021. 57 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2021.

No Brasil, majoritariamente, os resíduos gerados são destinados a aterros sanitários ou recebem algum tipo de disposição ambientalmente incorreta, sendo que os mesmos podem ser empregados na produção de carvão ativado, contribuindo, assim, para a minimização da poluição ambiental. Este projeto propôs o desenvolvimento de uma pesquisa experimental de fabricação de carvão ativado a partir da biomassa da casca da Castanha-do-Brasil, a *Bertholletia excelsa*. Desta maneira, a biomassa foi caracterizada através das análises imediatas: densidade aparente (0,600 g/mL), umidade (5,06%), material volátil (69,21%), cinzas (1,5%) e carbono fixo (24,21%), e análise termogravimétrica. O carvão pirolisado foi obtido e ativado em uma mufla, de 100 cm de comprimento e diâmetro externo de 10 cm, linha 05/50, resultando em um rendimento de 54,58% para 300°C e 37,65% para 500°C da massa inicial da casca da Castanha-do-Brasil. A caracterização do carvão foi realizada através da análise imediata da densidade aparente (0,463 g/mL) e teste de adsorção de azul de metileno com coluna de filtração de carvão e areia, em que foi adotada a concentração do corante (4,56 mg/L) a uma vazão de 10 mL/min, para verificar a eficiência adsortiva do material. Notou-se que a coluna de filtração operou com 100% de eficiência na remoção do corante com a concentração por um período de aproximadamente 14 horas.

**Palavras-chave:** Carvão Ativado. Casca. Castanha-do-Brasil. Pirólise.

## ABSTRACT

RIBEIRO, Fabricio Borges. **Pyrolysis of Brazil nut shell for the production of charcoal for industrial purposes**. 2021. 57 p. Course Conclusion Paper - Bachelor of Civil Engineering - Federal Institute of Education, Science and Technology of Tocantins. Palmas, 2021.

In Brazil, most of the waste generated is sent to sanitary landfills or receives some type of environmentally incorrect disposition, and they can be used in the production of activated carbon, thus contributing to the minimization of environmental pollution. This project proposed the development of an experimental research for the manufacture of activated carbon from the biomass of the Brazil nut shell, *Bertholletia excelsa*. In this way, biomass was characterized through immediate analysis: bulk density (0.600 g / mL), humidity (5.06%), volatile material (69.21%), ash (1.5%) and fixed carbon (24,21%), and thermogravimetric analysis. Pyrolysed coal was in mufla, 100 cm long and 10 cm outside diameter, line 05/50, resulting in a yield of 54.58% for 300°C and 37.65 % to 500°C of the initial mass of the Brazil nut shell. The charcoal characterization was carried out through the immediate analysis of the apparent density (0.463 g / mL) and methylene blue adsorption test with a coal and sand filtration column, in which the dye concentration (4.56 mg / L) at a flow rate of 10 mL / min, to verify the adsorptive efficiency of the material. It was noted that the filtration column operated with 100% efficiency in removing the dye with the concentration for a period of approximately 14 hours.

**Keywords:** Activated charcoal. Bark. Chestnut of Brazil. Pyrolysis.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Produção percentual de castanha-do-brasil por estado.....	16
<b>Figura 2:</b> Castanheira (Árvore da Castanha-do-Pará ou Castanha-do-Brasil	25
<b>Figura 3:</b> Fruto da castanheira: picídeo imperfeito (ouriço) .....	25
<b>Figura 4:</b> Diagrama esquemático das etapas do trabalho experimental	26
<b>Figura 5:</b> Casca da Castanha-do-Brasil.....	27
<b>Figura 6:</b> Casca da Castanha-do-Brasil triturada .....	27
<b>Figura 7:</b> Ensaios de densidade aparente da biomassa.....	28
<b>Figura 8:</b> Proveta com amostras para determinação da densidade ...	29
<b>Figura 9:</b> Dessecador com amostras para a determinação da umidade	29
<b>Figura 10:</b> Secagem da amostra .....	30
<b>Figura 11:</b> Determinação do material volátil .....	31
<b>Figura 12:</b> Mufla, marca Coel, Modelo Hm.....	33
<b>Figura 13:</b> Pirólise de Castanha-do-Brasil em mufla.....	33
<b>Figura 14:</b> Sistema empregado no ensaio de adsorção.....	35
<b>Figura 15:</b> Areia e tubo utilizados no sistema de filtração de efluentes..	35
<b>Figura 16:</b> Espectrofotômetro de duplo feixe.....	36
<b>Figura 17:</b> Curva de calibração .....	36
<b>Figura 18:</b> Relação entre massa e volume da biomassa.....	38
<b>Figura 19:</b> Tendência dos valores de densidade aparente da biomassa	38
<b>Figura 20:</b> Curva DTG da biomassa.....	42
<b>Figura 21:</b> Perda de massa em função do aumento da temperatura ....	45
<b>Figura 22:</b> Relação entre massa e volume do carvão ativado.....	46
<b>Figura 23:</b> Tendência dos valores densidade aparente do carvão ativado.....	46
<b>Figura 24:</b> Curva de relação entre concentração final e inicial e eficiência para a concentração de 4,56 mg/L de corante.....	47
<b>Figura 25:</b> Vazão do corante na coluna ao longo do período.....	48

## LISTA DE TABELA

<b>Tabela 1:</b> Métodos de pirólise e suas variantes: rendimentos dos produtos típicos obtidos por meio de diferentes formas de pirólise de biomassa (base seca).....	18
<b>Tabela 2:</b> Diferenças entre adsorção física e adsorção química .....	22
<b>Tabela 3:</b> Resultados de densidade aparente de biomassa.....	39
<b>Tabela 4:</b> Resultado de análise imediata de biomassa .....	40
<b>Tabela 5:</b> Casca da Castanha-do-Brasil triturada.....	43
<b>Tabela 6:</b> Análise estatística através do Teste-t simulando variâncias equivalentes para a produção de carvão em ensaios de pirólise .....	43
<b>Tabela 7:</b> Resultados comparativos do rendimento do Carvão .....	44
<b>Tabela 8:</b> Resultados de densidade aparente de carvão .....	46
<b>Tabela 9:</b> Resultados do teste de Adsorção de Azul de Metileno .....	49

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
°C	Graus Celsius
CF	Carbono Fixo
cm	Centímetros
CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
DTG	Termogravimetria Derivada
g	Gramma
IFTO	Instituto Federal do Tocantins
Kg	Quilo Grama
LARSEN	Laboratório e Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética
m	Metro
M <sup>2</sup> /g	Metro quadrado por grama
mg/L	Miligramma por litro
ml/min	Mililitro por minuto
Min	Minuto
MB	Methylene Blue – Metileno Azul
NBR	Norma Brasileira
pH	Potencial Hidrogeniônico
%	Porcentagem
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduo Sólido Urbano
s	Segundo
T	Temperatura
TG	Termogravimétrica
TO	Tocantins

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	13
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA.....	23
1.2 JUSTIFICATIVA .....	24
1.3 OBJETIVOS.....	16
1.3.1 Objetivo Geral.....	16
1.3.2 Objetivos Específicos.....	16
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1 PIROLISE DE BIOMASSA .....	26
2.2 PRODUÇÃO DO CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE BIOMASSA.....	28
2.3 ADSORÇÃO .....	20
2.4 CORANTES.....	22
2.5 TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	23
2.6 POLÍTICA NACIONAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS (PNRS) .....	23
2.7 CASTANHA-DO-BRASIL: BIOMASSA RESIDUAL COMO MATERIA PRIMA PARA PRODUÇÃO DO CARVÃO ATIVADO .....	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	34
3.1 TIPO DE PESQUISA.....	25
3.2 COLETA E PREPARO DA AMOSTRA.....	26
3.2 PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS EMPREGADOS NA CARACTERIZAÇÃO DE BIOMASSA DA CASCA DA CASTANHA-DO-BRASIL .....	26
3.2.1 Análise Imediata da Biomassa.....	28
3.2.1.1 Densidade Aparente .....	28
3.2.1.2 Umidade .....	29
3.2.1.3 Material Volátil .....	29
3.2.1.4 Teor de Cinzas .....	31
3.2.1.5 Teor de Carbono Fixo – CF .....	31
3.2.2 Análise Termogravimétrica – TG.....	32
3.3 PIROLISE DE BIOMASSA .....	32
3.4 PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS EMPREGADOS NA CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO .....	34
3.4.1 Análise Imediata do Carvão Ativado .....	43
3.4.1.1 Densidade Aparente do Carvão .....	34
3.4.1.2 Análise imediata do Carvão .....	34
3.4.2 Teste de Adsorção de Azul de Metileno em Filtro de Carvão e Areia.....	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	37

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA .....	37
4.1.1 Análise Imediata da Biomassa.....	37
4.1.2 Análise Termogravimétrica .....	41
4.2 PIRÓLISE DE BIOMASSA E ATIVAÇÃO DE CARVÃO.....	42
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO.....	45
4.3.1 Densidade Aparente do Carvão .....	45
4.3.2 Teste de Adsorção de Azul de Metileno em Filtro de Carvão e Areia.....	47
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	50
REFERÊNCIAS .....	51

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente as fontes não renováveis ainda são as grandes responsáveis por produzir energia mundialmente, onde estas fontes são: gás natural, petróleo, carvão mineral e nuclear. O impacto ambiental e o esgotamento destas fontes induzem a uma busca por alternativas energéticas renováveis que sejam provenientes de fontes renováveis e que tenha participação na matriz energética global. Uma alternativa para diversificar a matriz energética é o reaproveitamento de resíduos de biomassa. O Brasil é um país que possui uma situação privilegiada em relação a utilização de fontes renováveis de energia, pois possui um dos maiores potenciais de distribuição dessas fontes (MOREIRA, 2015).

O uso das fontes renováveis está ligado à necessidade de redução do uso dependente de diferentes resíduos que acabam gerando um grande impacto ambiental. Dentre esses resíduos, destaca-se a biomassa residual, provenientes de frutos Amazônicos, como é o caso do açaí, cupuaçu e Castanhas. Estes frutos são bastante consumidos pela população e suas cascas e caroços são acumulados em locais inadequados, como sarjeta e calçadas, e os produtos são comercializados sem nenhum tipo de aproveitamento, e são considerados como lixo pela população (CRUZ JUNIOR, 2010).

Atualmente todo o mundo esforça-se para implantar sistemas alternativos que transformam a energia da biomassa em fontes energéticas que diminua o impacto ambiental e possa tornar processos de produção autossustentáveis, sem grandes, e até mesmo, nenhuma poluição. Assim, uma alternativa é a produção de carvão ativado a partir de produtos residuais conferindo a estes um valor agregado (CORDEIRO; FIUZA JUNIOR, 2019).

O conhecimento de novas tecnologias que utilizem materiais residuais para aproveitamento das propriedades agregadas aos mesmos, como é o caso do carvão ativado proveniente da Castanha-do-Brasil, pode trazer grandes benefícios econômicos e ambientais. Os carvões ativados são utilizados como adsorventes de efluentes contaminados, mas nos dias atuais também são utilizados como suporte para metais na produção de catalisadores heterogêneos (DUARTE, 2017).

O carvão ativado é adquirido através de um processo conhecido como pirólise, sendo esta uma alternativa que apresenta a possibilidade de geração

de um produto sólido, líquido e gasoso que podem ser destinados a outras áreas de aplicação. O controle de alguns parâmetros do processo, também possibilita a direcioná-lo para o produto de maior interesse (MOREIRA, 2015).

Para Mota et al., (2015) a pirólise tem sido utilizada a milhares de anos na produção de carvão mas somente nos últimos 30 anos, através da utilização de equipamentos mais sofisticados pôde-se trabalhar com temperaturas moderadas e tempos de reações muito mais curtos.

Assim, este trabalho consiste em avaliar a aplicabilidade da casca Castanha-do-Brasil na produção de carvão ativado através do processo de pirólise em mufla, visando o uso industrial, caracterizando os resíduos e efetuando o teste de adsorção de corantes em coluna.

## 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Os resíduos gerados pelas indústrias e pela população geralmente são descartados no meio ambiente de maneira irregular, sem nenhuma forma de tratamento ou preocupação com aquilo que está sendo descartado. Na grande maioria das vezes, não há uma preocupação em preservar o meio ambiente, em como fazer algo que consiga diminuir os problemas gerados por um descarte realizado de maneira inadequada e/ou errada.

Geralmente os resíduos sólidos produzidos na sociedade são descartados nos mais variados locais, como calçadas, lixões, áreas impróprias, terrenos baldios. Esses descartes acabam provocando a criação altos níveis de descarte, gerando um desconforto estético, além de provocar uma poluição ambiental, provocando impactos negativos na qualidade do ar, água e meio ambiente (SILVA et al., 2020).

Dentro dos resíduos sólidos encontra-se a biomassa da Castanha-do-Pará (Castanha-do-Brasil), que é um fruto original da Amazônia, e é bastante consumido pela população Brasileira, além da fruta ser utilizada em indústrias. Geralmente suas cascas são depositadas em locais inadequados, e os produtos comercializados sem nenhum tipo de aproveitamento.

Diante dessa problemática, qual a possibilidade do uso do resíduo da casca da Castanha-do-Brasil através do processo de pirólise para produção de carvão ativado?

## 1.2 JUSTIFICATIVA

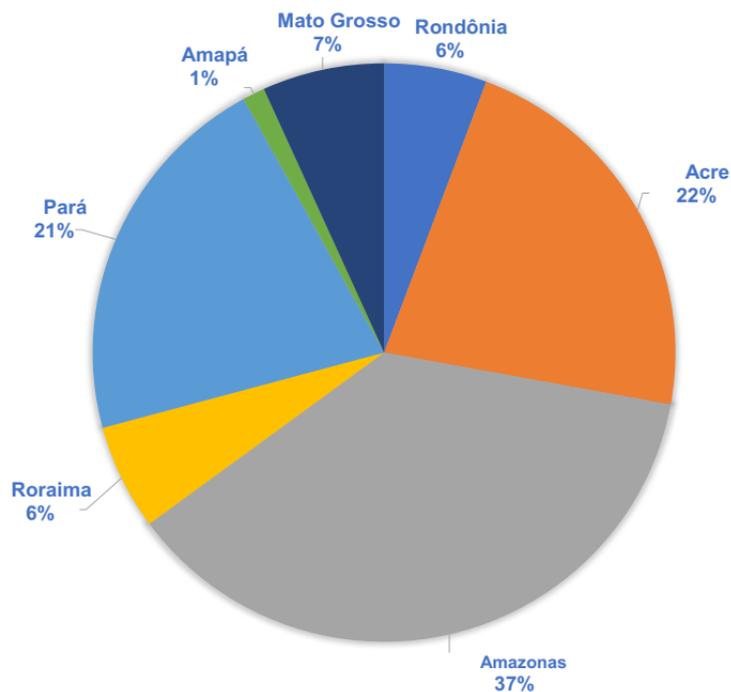
O setor industrial é um dos grandes agentes do impacto ambiental e isso

se explica devido à grande carga de resíduos e cargas poluidoras geradas a partir da transformação da matéria-prima em produtos acabados. No entanto, esse cenário vem se transformando, devido a grande pressão que a globalização vem fazendo no mercado que é cada vez mais exigente e competitivo no que diz respeito a preservação ambiental. Assim, é importante que a produção, transformação e destinação dos resíduos sejam conhecidos de maneira integrada para que soluções adequadas sejam propostas (LIMA et al., 2015).

No caso do processamento industrial das amêndoas de Castanha-do-Brasil, a geração de resíduos é ainda maior, e isso se explica devido o fruto situar-se no interior de um ouriço e do descarte das cascas amadeiradas da própria amêndoa e sua respectiva película. Além de tudo isso, ainda existem as amêndoas que se quebram e são descartadas devido as mesmas não se encaixarem no padrão tipo exportação. Quando o teor em óleo é extraído, os resíduos podem, ainda, ser bem maiores, gerando um resíduo denominado de torta desengordurada ou parcialmente desengordurada (SANTOS, 2008b).

A produção de castanha-do-brasil é realizada pelo IBGE (2020), que em seu último estudo, divulgado através da pesquisa sobre a Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura de 2019 (PEVS), apresentou uma produção de 32905 toneladas, distribuída entre os estados do Amazonas que contribuiu com a maior parcela da produção, um total de 12182 toneladas, seguido pelo Acre com 7297 t, Pará (6977 t), Mato Grosso (2226 t), Roraima (1940 t), Rondônia (1878 t) e Amapá 405 t. A figura 1 demonstra a distribuição da produção nacional por estado.

**Figura 1** - Produção percentual de castanha-do-brasil por estado.



Fonte: IBGE (2020).

Assim, uma das formas de tentar diminuir esse impacto é por meio da utilização das tecnologias de conversão de biomassa. Segundo Pedroza *et al.* (2011), das tecnologias de conversão de biomassa empregadas atualmente, a pirólise é a que mais se destaca se comparada as demais. Essa alternativa é caracterizada como um processo termoquímico que tem como objetivo principal obter produtos, a partir de um resíduo orgânico, com densidade energética mais alta e com propriedades superiores àquelas da biomassa inicial. Os produtos obtidos nesse processo, que são o bio-óleo (líquido), a fração gasosa e o carvão (sólido), podem ser empregados no abastecimento energético do próprio processo ou podem ser comercializados como produtos químicos ou combustíveis. Em razão dessas características, esses produtos possuem enorme potencial para diversas áreas de atuação.

Como futuro profissional da área de engenharia e conhecedor de todas as consequências provocadas pelo descarte inadequado da casca da Castanha-do-Brasil, optou-se por desenvolver uma pesquisa que buscasse minimizar esses problema e ao mesmo tempo trouxesse uma alternativa para a produção de fontes renováveis, como é o caso do carvão ativado.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

- Produzir carvão ativado da casca pelo processo de pirólise de casca de Castanha-do-Brasil na produção de carvão ativado visando aplicação industrial.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar quimicamente os resíduos; caracterizar a biomassa e o carvão.
- Produzir carvão ativado por meio de pirólise de casca de Castanha-do-Brasil em mufla;
- Efetuar teste de adsorção de corantes em coluna empregando o carvão ativado obtido no processo.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 PIROLISE DE BIOMASSA

Atualmente, a utilização da biomassa florestal vem despertando diversos interesses no país devido e isso se explica devido a mesma servir de insumo energético com diferentes formas de aproveitamento e devido o seu potencial renovável, além de surgir como geração de oportunidade de trabalho no processo de produção energética e criação de novos mercados para resíduos florestais (SANTIAGO; REZENDE, 2019).

O Brasil é considerado um dos maiores produtores agrícolas, a sua grande extensão de áreas de cultivo, a biodiversidade e o clima tropical favorecem na implantação de diferentes culturas. No entanto, uma grande quantidade de resíduos com alto potencial na utilização para os mais diversos fins é descartada diariamente.

O processo de conversão da biomassa em energia pode ser realizado a partir de processos termoquímicos, biológicos, mecânicos e físicos. Dentro dos processos termoquímicos têm-se a combustão, a gaseificação e a pirólise (CARMONA *et al.*, 2017).

Santos (2011) conceitua a pirólise como o processo em que a degradação de um material sólido ocorre através do calor, formando três produtos: carvão,

óleo e gás pirolítico. Dependendo das condições operacionais do reator utilizado no processo de pirólise, um destes produtos pode ser maximizado. Ressalta-se que o objetivo da pirólise é obter produtos que possuam densidade energética superior à biomassa. Félix *et al.*, (2017) ressalta que a pirólise é definida como o processo de decomposição térmica da biomassa na presença controlada de oxigênio e que tem como produtos compostos na fase gasosa, líquida e sólida. O CO, CO<sub>2</sub>, o hidrogênio e os hidrocarbonetos de baixa massa molar são compostos da fração gasosa do processo. O líquido obtido é oriundo da condensação de gases, denominada líquido pirolenhoso, e o sólido é denominado de bio-carvão.

Essa termoconversão incide na ruptura da ligação carbono-carbono e na formação das ligações carbono-oxigênio, além de ser um processo de oxidação-redução onde uma parte da biomassa é reduzida a carbono, enquanto a outra é oxidada e hidrolisada dando origem a fenóis, carboidratos, álcoois, aldeídos, cetonas e ácidos carboxílicos, entre outros. Esses produtos primários se combinam entre si para formação de moléculas mais complexas, tais como ésteres, produtos poliméricos, entre outros (BEN, 2015).

A Tabela 1 apresenta informações sobre as condições operacionais do processo de conversões térmicas mais empregadas na produção de combustíveis, sejam eles sólidos, líquidos ou gasosos, bem como sua relação com os produtos formados.

**Tabela 1** - Métodos de pirólise e suas variantes: rendimentos dos produtos típicos obtidos por meio de diferentes formas de pirólise de biomassa (base seca)

Tecnologia de pirólise	Tempo de residência	Taxa de aquecimento	T(°C)	Produtos	Bio-óleo	Carvão	Gás
Carbonização	Dias	Muito baixa	400	Carvão	30%	35%	35%
Convencional	5-30min	Baixa	600	Bio-óleo; Gás; finos de carvão	-	-	-
Pirólise rápida	0,5-5s	Muito alta	650	Bio-óleo	75%	12%	13%
Flash líquido	<1s	Alta	<650	Bio-óleo			
Gasificação	~ 1s	Muito alta	600-900	Químicos e Gás	5%	10%	85%
Ultra-gaseificação	<0,5s	Muito Alta	1000	Químicos e Gás	-	-	-
Pirólise a vácuo	2-30s	Média	400	Bio-óleo	-	-	-
Hidro-pirólise	<10s	Alta	<500	Bio-óleo	-	-	-
Metano-pirólise	<10s	Alta	>700	Químicos	-	-	-

Fonte: Santos (2011).

A combustão e a pirólise são consideradas processos de obtenção de energia renovável, visto que a biomassa libera sua energia em forma de calor, e o carbono é reoxidado, ou seja, transformado em CO<sub>2</sub>. Assim, o processo só restitui à atmosfera o CO<sub>2</sub> absorvido pela planta durante o seu crescimento, não contribuindo efetivamente para o efeito estufa, uma vez que o ciclo de crescimento e combustão é autossustentável.

## 2.2 PRODUÇÃO DO CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE BIOMASSA

Carvão Ativado, segundo Freitas (2019), é toda forma de carbono de elevada porosidade, que possui uma elevada capacidade de armazenar gases, líquidos ou impurezas nos seus poros. O carvão ativado é um material carbonáceo poroso que possui uma forma microcristalina, não grafítica, que passa por um processo para aumentar a sua porosidade interna. Quando ativado, o carvão apresenta uma porosidade interna comparável à de uma rede de túneis que se bifurcam em canais menores e assim sucessivamente. Ao se considerar seus vários domínios de emprego, os carvões são adsorventes versáteis, pois podem ser utilizados inclusive no armazenamento de gases, bem como catalisadores e suportes catalíticos.

O poder adsorvente do carvão é originário de sua elevada área superficial específica (na faixa de 500 - 2000 m<sup>2</sup> /g), da presença de uma variedade de grupos funcionais em sua superfície e de sua estrutura microporosa. É um material que pode ser produzido a partir de duas formas: carvão mineral fóssil ou através da biomassa. Quando produzido a partir da biomassa, o carvão ativado pode ser proveniente da biomassa rica em carbono, como por exemplo: madeira, casca de frutas, turfa, casca de nozes e de Castanha-do-Brasil, talos de milho, casca do arroz, caroço de frutas tropicais (cajá, umbu, tamarino, seriguela, acerola), dentre outros (CORDEIRO; FIUZA JUNIOR, 2019).

Os carvões ativos derivados de biomassa podem ser produzidos por pirólise seca ou pirólise hidrotérmica, por ativação física ou química entre outros. Além disso, carvões ativados podem ser gerados por métodos de aquecimento em micro-ondas, bioregeneração, com superfície modificada, usando materiais ricos em lignina geralmente derivados de biomassa entre outros (FELIX et al., 2017). Quando a produção do carvão ativado ocorre a partir da biomassa de rejeito, o processo inicia-se pela queima controlada do precursor, que a princípio é a casca da Castanha-do-Brasil, onde a temperatura que será utilizada dependerá da quantidade de lignina da castanha, onde, quanto maior a quantidade mais elevada será a temperatura, tomando sempre cuidado para evitar que ocorra a queima total do material, fazendo evaporar todo o carbono existente (CARMONA et al., 2017).

Tem-se percebido que, nos últimos anos, o interesse pela utilização de produtos e subprodutos renováveis vem crescendo e isso se explica devido os mesmos serem seguros, baratos e disponíveis em grandes quantidades, como é o caso dos resíduos agroindustriais. Existem relatos de diversas pesquisas sobre

o carvão ativado a partir do resíduo de biomassa. A aplicabilidade de materiais carbonosos ativados nos mais variados setores se dá pela característica específica do material, que por sua vez está relacionada com os parâmetros do processo de produção (método de preparação, tipo de agente ativante, razão agente/matéria prima, tempo de ativação, taxa de aquecimento, temperatura de carbonização), assim como da matéria-prima utilizada (SCHULTZ, 2016).

### 2.3 ADSORÇÃO

A adsorção nada mais é do que um processo de superfície que se caracteriza pelo aumento da concentração de um determinado constituinte em uma interface formada por duas fases imiscíveis. Os líquidos ou gases podem ser adsorvidos sobre uma fase sólida e este sólido é denominado de adsorvente e o gás ou o líquido é chamado de adsorbato (CRUZ JUNIOR, 2010).

Nascimento et al., (2014) conceituam a adsorção como uma operação de transferência de massa, a qual estuda a habilidade de certos sólidos em concentrar na sua superfície determinadas substâncias existentes em fluidos líquidos ou gasosos, possibilitando a separação dos componentes desses fluidos. Quando os componentes adsorvidos se concentram na superfície externa e maior for essa superfície por unidade de massa sólida, mais favorável será a adsorção. Por este motivo, geralmente, os adsorventes são sólidos com partículas porosas. Assim, o componente acumulado na interface do material é denominado de adsorbato, a superfície sólida que o adsorbato se acumula é denominado de adsorvente.

Os processos de adsorção vêm ganhando destaque tanto para purificação de efluentes contaminados por diferentes contaminantes, quanto por corantes, metais pesados, dentre outros, e para a remoção de compostos orgânicos voláteis, dentre outros gases poluentes da atmosfera, como o dióxido de carbono. O baixo custo da adsorção tem transformado a mesma em uma técnica bastante promissora, além da possibilidade da mesma ser aplicada em poluentes aquáticos e atmosféricos (CORDEIRO; FIUZA JUNIOR, 2019).

A adsorção é um processo que pode acontecer tanto por mecanismos físicos como químicos. A adsorção física é aquela que acontece quando as forças intermoleculares de atração entre as moléculas do fluido e a superfície do sólido são maiores do que as forças de atração entre as próprias moléculas do fluido. As moléculas do fluido aderem-se à superfície do sólido e o equilíbrio é estabelecido entre o fluido adsorvido e o restante que permaneceu na fase líquida. O calor de adsorção é pequeno e da mesma ordem de grandeza dos

calores de condensação. Na adsorção química, ou quimissorção, há o envolvimento de interações químicas entre o fluido adsorvido e o sólido adsorvente, devido à transferência de elétrons, equivalente à formação de ligações químicas entre o adsorbato e a superfície do sólido. Neste caso, o calor de adsorção é da mesma ordem de grandeza dos calores de reação. Além disso, na adsorção física podem formar-se camadas moleculares sobrepostas, enquanto que na adsorção química se forma uma única camada molecular adsorvida (monocamada) (CRUZ JUNIOR, 2010).

Para melhor compreensão da diferença entre a adsorção química e a adsorção física, Duarte (2017) consolidou essas diferenças conforme demonstrado na Tabela 2.

**Tabela 2 - Diferenças entre adsorção física e adsorção química**

<b>Adsorção Física</b>	<b>Adsorção Química</b>
Causadas por forças de <i>van der Waals</i>	Causada por forças eletrostáticas e ligações covalentes
Não há transferência de elétrons	Há transferência de elétrons
Fenômeno geral para qualquer espécie	Fenômeno específico e seletivo
A camada adsorvida pode ser removida por aplicação de vácuo à temperatura de adsorção	A camada adsorvida só é removida por aplicação de vácuo e aquecimento a temperatura acima da de adsorção
Formação de multicamadas abaixo da temperatura crítica	Somente há formação de monocamadas
Acontece somente abaixo da temperatura crítica	Acontece também a altas temperaturas
Lenta ou rápida	Instantânea
Adsorvente quase não é afetado	Adsorvente modificado na superfície

Fonte: Duarte (2017).

Ambos os fenômenos consistem em remover diferentes compostos de soluções, usualmente líquidas e gasosas. Em relação aos adsorventes, atualmente o carvão ativado é o mais utilizado. Uma vez ativado, o carvão apresenta uma porosidade interna comparável a uma rede de túneis que se bifurcam em canais menores e assim sucessivamente. Estas porosidades são classificadas conforme o tamanho em macro, meso e microporosidades. O carvão ativado é o adsorvente mais popular na remoção de poluentes em todo o mundo e sua característica de adsorção origina-se por cada matéria prima e as mudanças físico-químicas que ocorrem após a decomposição da matéria (DEL PIERO, 2018).

## 2.4 CORANTES

Corantes oriundos de processos industriais, tal como fabricação de papel, indústria têxtil, galvanoplastia, fábrica de celulose, produção de alimentos e cosméticos são as principais fontes de poluição da água. As complexas estruturas aromáticas e as propriedades xenobióticas dos corantes os faz com que eles sejam dificilmente degradados (PARIDA et al., 2010).

O azul de metileno (MB) é um corante catiônico, e dispõe de uma pluralidade de aplicações, sendo empregado no tingimento de algodão, lã e papel, tinturas para cabelos, etc. Devido à sua forte adsorção em suportes sólidos, o azul de metileno, muitas vezes, é aplicado como um composto modelo para a remoção de corantes e de contaminantes orgânicos a partir de soluções aquosas (KHOPADE et al., 2012).

## 2.5 TRATAMENTO DE EFLUENTES

O carvão ativado tem sido muito usado como adsorvente para tratamento de efluentes devido à extensa faixa de aplicabilidade (FORTUNY; FONT; FABREGAT, 1998). A viabilidade econômica do processo de adsorção é diretamente relacionada com a possibilidade de reuso do carvão ativado. A regeneração do leito de carvão ativado saturado é relevante porque o reuso do carvão determina a viabilidade do processo de purificação (CAMPORRO *et al.*, 1994).

## 2.6 POLÍTICA NACIONAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS (PNRS)

Os Resíduos Sólidos Urbanos, de acordo com a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) – Lei 12.305/10 – podem ser classificados tanto como resíduos domiciliares, aqueles que possuem sua origem em atividades domésticas nas residências urbanas, quanto resíduos de limpeza urbana, sendo estes os oriundos de limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana” (BRASIL, 2010).

A PNRS também delinea outros processos de destinação ambientalmente adequada de Resíduo Sólido Urbano - RSU, sendo um deles a recuperação e o aproveitamento energético dos RSU. Deste modo, para tais atividades, podem ser usados processos através de vias bioquímicas ou termoquímicas (BRASIL, 2010).

A pirólise é um procedimento de conversão térmica que provoca a ruptura de ligações carbono-carbono e na formação de ligações carbono-oxigênio. A

pirólise é um processo de oxidação-redução onde uma parte da biomassa é reduzida a carbono, entretanto, a outra parte, é oxidada e hidrolisada dando origem a fenóis, carboidratos, álcoois, aldeídos, cetonas e ácidos carboxílicos. Esses produtos primários combinam-se entre si para dar moléculas mais complexas tais como ésteres, produtos poliméricos, etc (ROCHA et al., 2004).

Por caracterizar-se pela degradação térmica em uma atmosfera com carência de oxigênio, a pirólise diminui as emissões de poluentes produzidos em atmosfera oxidante, tais como as dioxinas e os furanos, estabelecendo uma grande vantagem em relação aos incineradores (FILHO et al., 2014).

## 2.7 CASTANHA-DO-BRASIL: BIOMASSA RESIDUAL COMO MATERIA PRIMA PARA PRODUÇÃO DO CARVÃO ATIVADO

A Castanha-do-Pará (*Bertholletia excelsa*), conhecida também como Castanha-do-Brasil, dentro da biodiversidade existente na floresta Amazônica, possui um grande destaque devido a mesma ser uma espécie importantíssima no extrativismo do seu fruto. A castanheira (Figura 2) é uma árvore que pode atingir até 50m de altura, encontrada nas áreas mais altas de terra firme não inundável. Seu tronco possui uma base que pode alcançar mais de 4m de diâmetro, de coloração cinza amarronzada com fissuras longitudinais (DUARTE, 2017).

**Figura 2** - Castanheira (Árvore da Castanha-do-pará ou Castanha-do-Brasil)



Fonte: Pinto (2010).

O fruto da castanheira (Figura 3) é o picídeo imperfeito, conhecido como ouriço (Figura 2) que contém sementes, ou seja, amêndoas (embrião) que industrialmente extraí-se dela cerca de 70% de óleo claro, inodoro, insípido, comestível quando fresco.

**Figura 3** - Fruto da castanheira: picídeo imperfeito (ouriço)



Fonte: Almeida (2015).

O ouriço possui um formato de cápsula globosa, praticamente esférica, do tipo pixídio, que mede entre 8 e 16cm de diâmetro. O ouriço é envolvido por duas camadas esféricas de substância lenhosa, sendo a externa mais fina. O peso do ouriço pode variar de 1 a 5 quilos. Dentro do mesmo é que se encontram as sementes ou castanhas propriamente ditas, cujo número se situa entre 10 a 25 unidades. As castanhas estão dispostas dentro do ouriço de maneira semelhante aos gomos de uma laranja, ligadas entre si por um material fibroso e desidratado. Uma castanheira pode produzir entre 63 a 216 frutos por estação, embora a quantidade pode variar muito de uma área para outra (ALMEIDA, 2015).

Estima-se que a produção de resíduos de ouriço de castanha seja elevada, pois considerado que cada ouriço contenha em média 2,4kg, sendo destes aproximadamente 1,0kg de castanha limpa, e 1,4kg de resíduos (biomassa residual), incluindo a casca da castanha bruta (CRUZ JUNIOR, 2010). Tanto o ouriço quanto a casca da castanha limpa já vem sendo utilizada como fonte calorífica, bem como para produção de carvão vegetal, logo seu aproveitamento para produção de carvão ativado é uma alternativa plausível. O uso de carvão ativado possui destaque por ser um adsorvente eficaz na remoção de uma variedade de contaminantes, seja industrial, agrícolas ou de origem urbana (DEL PIERO, 2018).

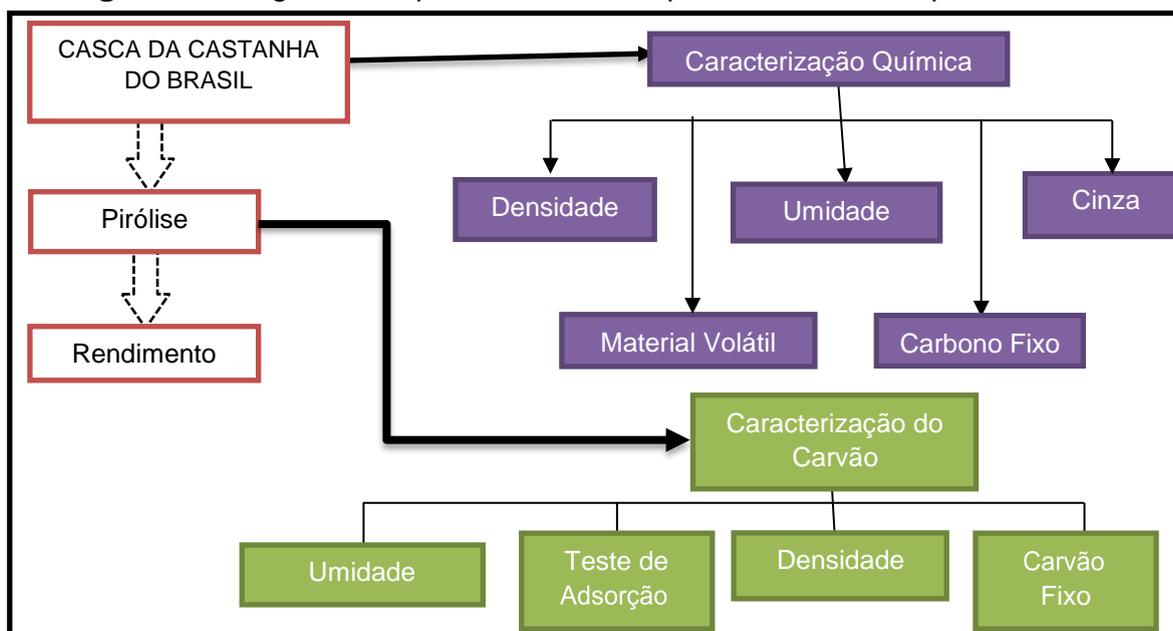
### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 TIPO DE PESQUISA**

Foi realizada uma pesquisa do tipo experimental. Esse tipo de pesquisa é caracterizado por manipular diretamente variáveis relacionadas com o objeto de

estudo e tem como finalidade testar hipóteses que dizem respeito à convicção de quem está pesquisando (TUMELERO, 2019). A pesquisa seguiu as etapas conforme está demonstrado na Figura 4.

**Figura 4** - Diagrama esquemático das etapas do trabalho experimental



Fonte: Próprio autor (2021).

### 3.2 COLETA E PREPARO DA AMOSTRA

A biomassa estudada foi obtida em uma indústria de beneficiamento de castanha-do-brasil do município de Rio Branco – Acre. As coletas das amostras de casca de castanha-do-brasil foram realizadas em outubro de 2019 em uma indústria localizada no município de Rio Branco- Acre, oriundas do processo de beneficiamento da castanha. Os resíduos foram coletados utilizando uma embalagem temporária para levá-las para o laboratório (Figura 5). Aproximadamente 5 kg foram coletados e transportado para o Laboratório no Instituto Federal do Acre (IFAC) - Campus da Baixada. No laboratório foi retirada amostras para a realização da avaliação da umidade. A biomassa foi posta em béqueres para passarem por secagem na temperatura de 105°C em uma estufa da tecnal te-394/1 foram realizadas pesagens a cada duas horas até atingirem a estabilidade. Após a biomassa estar desidratada, foi triturada em moinho de facas Lucadema. Após a trituração as amostras foram classificadas utilizando peneira de mesh 28, com abertura de 0,6 mm, depois dessa etapa foram acondicionadas em embalagens à vácuo em

pacotes com aproximadamente 2 kg (Figura 6) com intuito de preservar as características da biomassa.

**Figura 5** - Casca da Castanha-do-Brasil no Acre e amostra da mesma enviada para o Tocantins.



Fonte: Próprio autor (2021).

As Castanhas-do-Brasil foram fragmentadas em pó para se ter uma amostra mais homogênea. A escolha por trabalhar com a granulometria do pó da casca da Castanha-do-Brasil de 28 mesh, deu-se devido a mesma facilitar o preparo da amostra, conforme demonstra a Figura 5.

**Figura 6** - Casca da Castanha-do-Brasil triturada



Fonte: Próprio autor (2021).

## 3.2 PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS EMPREGADOS NA CARACTERIZAÇÃO DE BIOMASSA DA CASCA DA CASTANHA-DO-BRASIL.

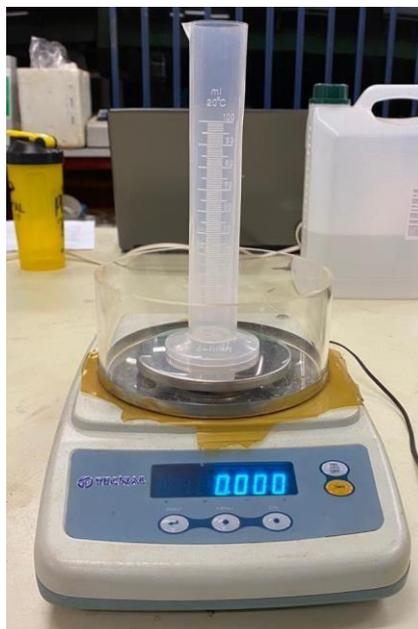
### 3.2.1 Análise Imediata da Biomassa

As análises do resíduo da casca da Castanha-do-Brasil foram realizadas no Laboratório e Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) do Instituto Federal do Tocantins (IFTO), Campus de Palmas. As amostras que chegaram em Palmas-TO apresentaram umidade média de aproximadamente 14,73%.

#### 3.2.1.1 Densidade Aparente

A densidade aparente foi realizada conforme a metodologia de Rodrigues (2019), com a utilização de proveta de 100 mL e balança analítica (Figura 7).

**Figura 7** - Ensaio de densidade aparente da biomassa



Fonte: Próprio autor (2021).

Para a realização do teste, a balança foi zerada e logo depois foi adicionado a casca da Castanha-do-Brasil para obtenção das massas em gramas nas sucessivas adições nos respectivos volumes de 10, 20, 30, 40 e 50 mL, a cada 10 mL até alcançar os 100 mL, conforme demonstra a Figura 8.

**Figura 8** – Proveta com amostras para determinação da densidade



Fonte: Próprio autor (2021)

Com a realização deste processo, foi determinada a densidade, a média e o desvio padrão, partindo do princípio de que a densidade é a relação de massa e o volume da amostra.

### 3.2.1.2 Umidade

O teor de umidade é determinado através da norma ASTM D 3173-85. A amostra foi pesada em uma balança analítica com amostra aproximada de 5 g em triplicata em um cadinho com peso constante, pré-determinado em uma estufa a 105° e realizadas sucessivas pesagens até a massa da amostra estabilizar, conforme Figura 9.

**Figura 9** – Dessecador com amostras para a determinação da umidade



Fonte: Próprio autor (2021).

Logo após, a amostra foi aquecida em uma estufa à temperatura de 105°C por um período de 60 minutos, conforme demonstra a Figura 10.

**Figura 10 - Secagem da amostra**



Fonte: Próprio autor (2021).

Logo após esse procedimento, o cadinho foi colocado em um dessecador por um período de 10 minutos e logo após foi medido a sua massa. Este procedimento foi realizado em duplicata, sendo que o teor de umidade foi determinado por meio da Equação 1.

Equação 1:

$$\% \text{Umidade} = ((A-B) / C) \times 100$$

Onde:

A= peso do cadinho + amostra, g;

B= peso do cadinho + amostra após o aquecimento, g;

C= peso da amostra, g.

### 3.2.1.3 Material Volátil

Para a determinação do teor do material volátil foi utilizada a metodologia de Nogueira e Rendeiro (2008), onde os autores seguiram o que está preconizado na ABNT NBR 8112/86 (Carvão vegetal - Análise imediata - Método de ensaio). O teor de material volátil determina os materiais que evaporam com mais facilidade da biomassa do resíduo da casca da Castanha-do-Brasil.

Nessa etapa, os cadinhos a serem empregados no teste de umidade foram submetidos ao aquecimento em mufla a temperatura de 500 °C e 300 °C durante 30 minutos sem presença de oxigênio, com a utilização de tampa para vedação, conforme Figura 11.

**Figura 11 - Determinação do material volátil**



Fonte: Próprio autor (2021).

O teor de material volátil foi determinado através da Equação 2, conforme descrito abaixo.

Equação 2:

$$\% \text{Material Volátil} = \frac{((P+P_0)-P_3)}{P_0} \times 100$$

Onde:

P= peso do cadinho vazio, g;

P<sub>0</sub>= peso da amostra inicial, g;

P<sub>3</sub>= peso do cadinho + amostra final, g.

#### 3.2.1.4 Teor de Cinzas

O ensaio do teor de cinza foi realizado conforme a metodologia aplicada por Nogueira e Rendeiro (2008) que se baseou na ABNT NBR 8112/86 (Carvão vegetal - Análise imediata - Método de ensaio).

Para determinação de cinzas de acordo com o exposto por Nogueira e Rendeiro (2008) e regido pela NBR 8112 (1986), os cadinhos do teste de umidade e material volátil foram colocados na mufla a temperatura de 710 °C por 1 hora em atmosfera oxidante, sem a tampa de vedação. Logo após os cadinhos foram colocados em um dessecador por um período de 60 minutos. Posteriormente foi anotado a sua massa. O ensaio foi realizado em duplicata. O resultado do teor das cinzas foi determinado pela Equação 3, conforme descrito abaixo.

Equação 3:

$$\%Cinzas = (A / B) \times 100$$

Onde:

A= peso do cadinho + amostra após o aquecimento, g;

B= peso do cadinho + amostra antes do aquecimento, g.

### 3.2.1.5 Teor de Carbono Fixo – CF

Para o levantamento do teor de carbono fixo (CF) foi utilizada a metodologia aplicada por Pedroza (2011), onde o autor calculou o CF por meio da porcentagem de material resultante que não evaporou após os ensaios dos teores de umidade, material volátil e cinzas. O valor do teor de CF foi determinado por meio da Equação 4, conforme descrito abaixo.

Equação 4:

$$\%Carbono\ Fixo = 100 - (\%Umidade + \%Material\ Volátil + \%Cinzas)$$

### **3.2.2 Análise Termogravimétrica – TG**

A análise termogravimétrica (TG) tem como objetivo levantar informações a respeito do processo da perda de massa da biomassa em função da temperatura, para se conhecer o rendimento gravimétrico da biomassa. Essa análise foi realizada no LARSEN – IFTO Campus Palmas.

O equipamento utilizado na análise termogravimétrica foi o DTG-60, marca Shimadzu, com rampa de aquecimento de 10oC/min, sob atmosfera de nitrogênio a uma vazão de 50 mL/min.

### **3.3 PIRÓLISE DE BIOMASSA**

Os experimentos de pirólise da biomassa da Castanha-do-Brasil foram realizados em mufla (marca Coel modelo Hm), em duas temperaturas diferentes (300 e 500 °C) durante 30 minutos de degradação térmica, conforme Figura 12.

**Figura 12** - Mufla, marca Coel, Modelo Hm

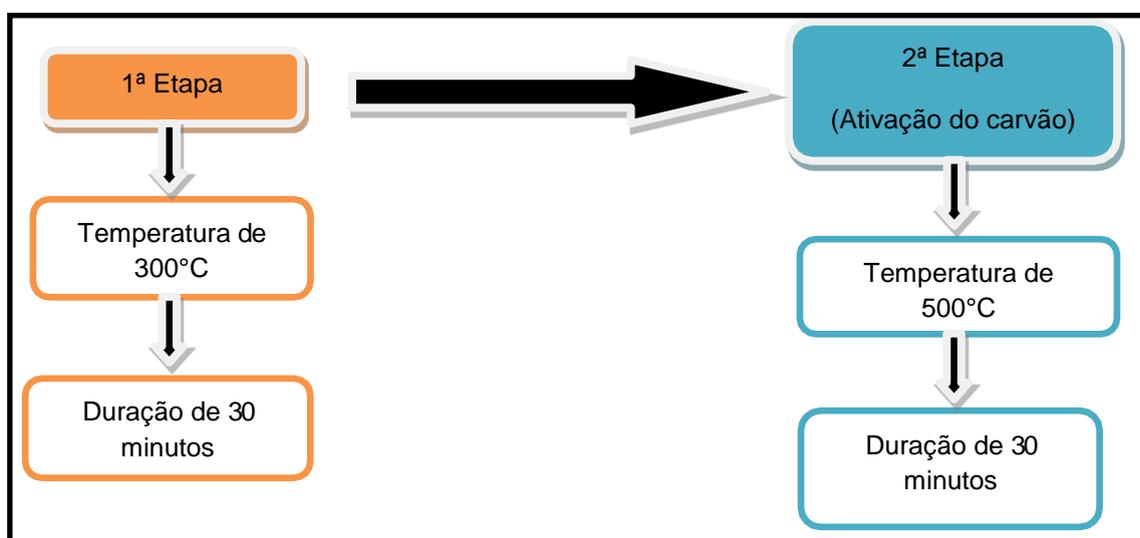


Fonte: Próprio autor (2021).

A biomassa inicialmente passou por processo de secagem em estufa por tempo suficiente para que boa parte da água seja evaporada, sendo em seguida pirolisada.

A Figura 13 mostra as condições de pirólise da biomassa que foram empregadas nessa pesquisa.

**Figura 13** - Pirólise de Castanha-do-Brasil em mufla



Fonte: Próprio autor (2021)

Os ensaios de pirólise foram realizados nas dependências do Laboratório LARSEN – IFTO, Campus Palmas. Após a reação e o resfriamento do material, o carvão foi coletado, pesado e armazenado. O rendimento do material foi determinado por meio da relação entre a massa final, após a pirólise e a massa inicial da biomassa empregada antes da pirólise.

### 3.4 PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS EMPREGADOS NA CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO

#### 3.4.1 Análise Imediata do Carvão Ativado

A análise imediata do carvão da casca da Castanha-do-Brasil foi realizada no LARSEN – IFTO, Campus Palmas.

##### 3.4.1.1 Densidade Aparente do Carvão

A densidade aparente do carvão da casca da Castanha-do-Brasil foi determinada por meio da relação entre massa e volume de carvão em uma proveta de acordo com o procedimento descrito no item 3.2.1.1.

##### 3.4.1.2 Análise imediata do Carvão

Foram determinados os teores de umidade, material volátil, cinzas e carbono fixo no carvão obtido no processo de pirólise da casca de Castanha-do-Brasil através dos métodos descritos nos itens 3.2.1.2, 3.2.1.3, 3.2.1.4 e 3.2.1.5, respectivamente.

#### 3.4.2 Teste de Adsorção de Azul de Metileno em Filtro de Carvão e Areia

O teste de adsorção de azul de metileno em filtro de carvão e areia foi realizado conforme a metodologia de Rodrigues (2019), ou seja, foi utilizado um filtro descendente contendo carvão da pirólise da Castanha-do-Brasil como meio filtrante. O teste foi realizado no LARSEN – IFTO, Campus Palmas.

Foi realizado o experimento de fluxo contínuo, onde foi utilizada a solução do corante na concentração de 4,56 mg/L, com pH ajustado a 7,0. Foi empregado um sistema de filtração constituído por um reservatório inferior de 50 litros, um reservatório de 20 litros com sistema de drenos e uma coluna de filtração (filtro) de carvão e areia, conforme demonstrado na Figura 14.

**Figura 14** - Sistema empregado no ensaio de adsorção



Fonte: Próprio autor (2021).

Foi instalada uma bomba submersa no reservatório inferior para o recalque do corante no reservatório superior. O sistema de drenos no reservatório superior teve como objetivo manter o volume do líquido constante e evitar elevadas variações de vazão do líquido durante a etapa de filtração. É um reservatório que contou com três tubulações para transporte dos líquidos, sendo estes: alimentação do reservatório inferior, dreno para o reservatório inferior e alimentação do filtro (Figura 13). A alimentação do filtro foi feita por gravidade.

Os filtros tiveram uma altura total de 20 cm de tabulação, com altura do carvão em 12,5 cm, tendo 3,75 cm de areia, tanto na parte inferior quanto na parte superior, com tubulação de diâmetro de 20 mm. A areia e a tubulação que foram utilizadas no ensaio estão demonstrados na Figura 15.

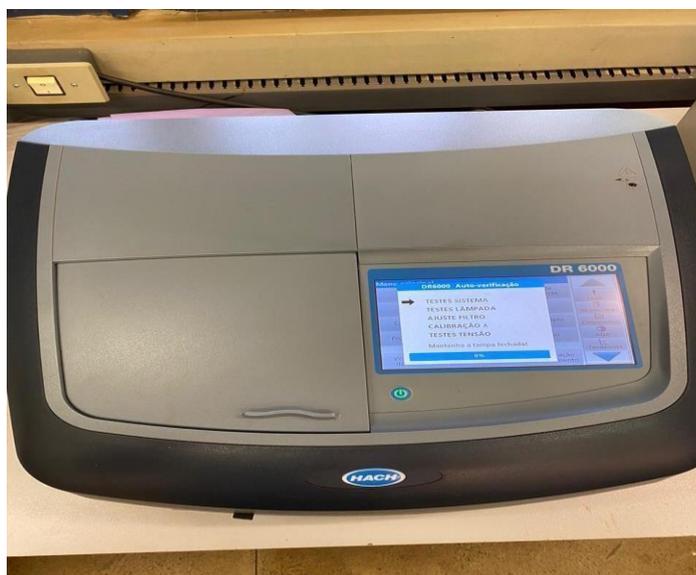
**Figura 15** – Areia e tubo utilizados no sistema de filtração de efluentes



Fonte: Próprio autor (2021).

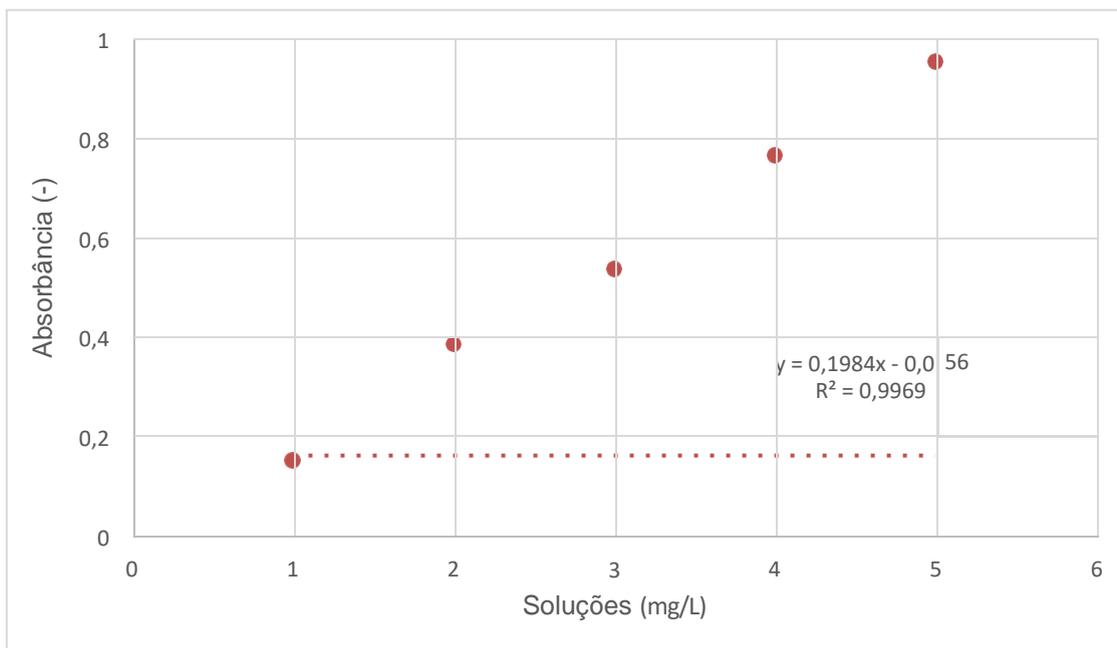
Para montagem do sistema foi utilizado aproximadamente 7 gramas de massa do carvão ativado para cada experimento. A alimentação foi realizada por gravidade, mantida a uma vazão média de 10 mL/min. A adsorção da solução do corante foi medida em espectrofotômetro de duplo feixe em 650 nm (Figura 16) e com auxílio de uma curva de calibração externa.

**Figura 16** - Espectrofotômetro de duplo feixe



Fonte: Próprio autor (2021).

A adsorção da solução do corante foi medida em espectrofotômetro de duplo feixe (PERKIN ELMER, LAMBDA 750) em 650 nm, com o auxílio de uma curva de calibração (Figura 17) foi constituída pela análise de soluções de concentração conhecida iguais a 1, 2, 3, 4 e 5mg/L do corante azul de metileno.

**Figura 17 - Curva de calibração**

Fonte: Próprio autor (2021).

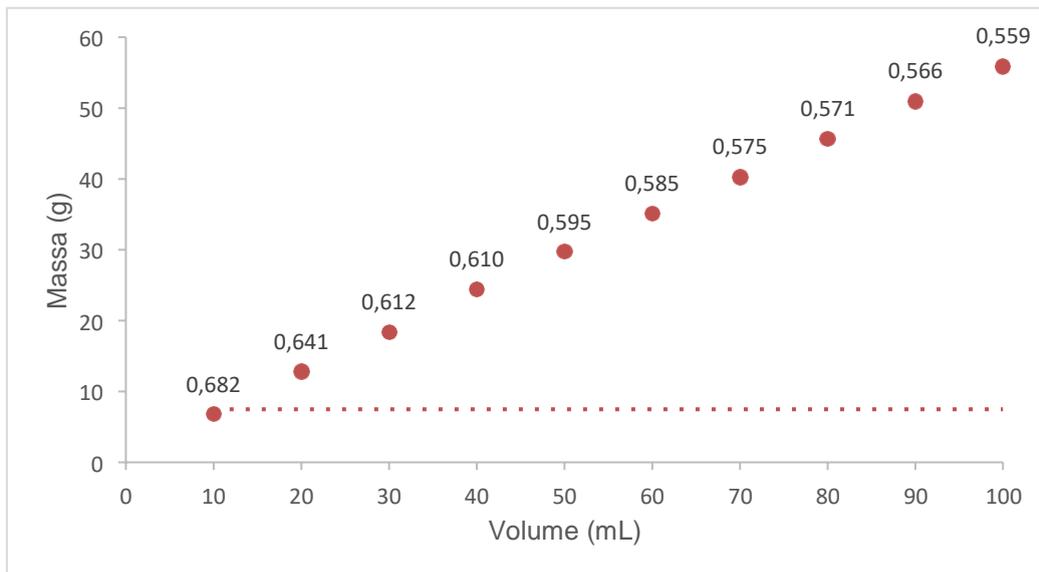
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo expõe todos os resultados obtidos nos ensaios realizados para a caracterização da biomassa e do carvão ativado, conforme a metodologia descrita no capítulo anterior. Os ensaios de caracterização da biomassa incluem os ensaios de análise imediata e análise termogravimétrica (TG). Os ensaios de análise imediata são os ensaios de densidade aparente, teor de umidade, teor de material volátil, teor de cinzas e teor de carbono fixo. Por sua vez, a caracterização do carvão ativado foi realizada através do ensaio de densidade aparente e do teste de adsorção na concentração de 4,56 mg/L, do corante azul de metileno em coluna de leito fixo.

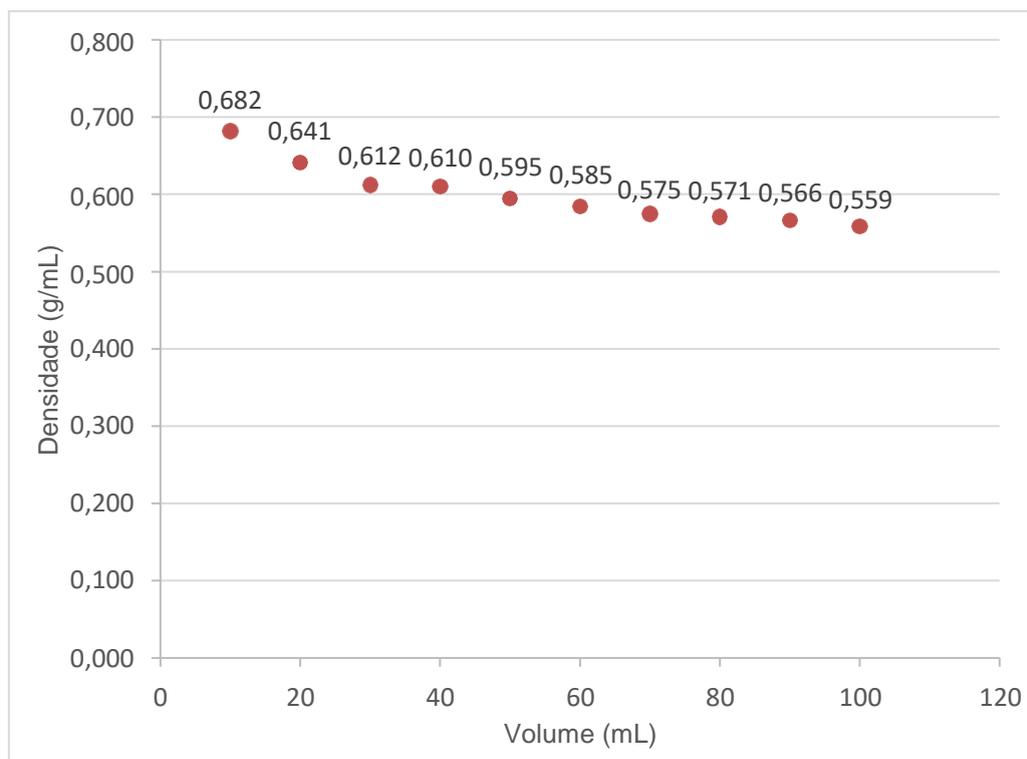
### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

#### 4.1.1 Análise Imediata da Biomassa

Através da Figura 18 e Figura 19 pode-se realizar a análise dos dados obtidos pelo ensaio da densidade aparente da biomassa.

**Figura 18 - Relação entre massa e volume da biomassa**

Fonte: Próprio autor (2021).

**Figura 19 - Tendência dos valores de densidade aparente da biomassa**

Fonte: Próprio autor (2021).

A densidade média aparente dos dados apresentados nas Figuras 18 e 19 foi igual à 0,600 g/mL, possuindo um desvio padrão de 0,038. A partir da Tabela 3 é possível comparar esse valor com os de outros trabalhos.

**Tabela 3** - Resultados de densidade aparente de biomassa

Variável	Resultados		Resultados Comparativos			
	Média (Próprio autor)	Desvio Padrão (Próprio autor)	Silva, E. (2018)	Valcarenghi e Ribeiro (2013)	Paes <i>et al.</i> (2012)	Soares, F.K.S (2020)
			Angelim Pedra	MDF	Angico Vermelho	RIM
Densidade (g/mL)	0,600	0,038	0,297	0,226	0,520	0,318

Fonte: Próprio autor (2021).

Comparando os resultados da Tabela 3, nota-se que o valor citado por Paes *et al.* (2012), aproxima-se do valor de densidade de biomassa deste trabalho. A diferença entre valores observada, principalmente em relação à Silva (2018) e Valcarenghi e Ribeiro (2013), pode ser em função do tipo de madeira empregada no resíduo, que possuem composição e características distintas.

No Brasil, as principais espécies utilizadas para produção de carvão vegetal são do gênero *Eucalyptus*, que possui densidade básica da madeira variando de 0,42 a 0,54 g cm<sup>-3</sup> (Silva *et al.*, 2015; Soares *et al.*, 2015; Trugilho *et al.*, 2015; Boschetti *et al.*, 2017).

Através da Tabela 4, é possível verificar os resultados obtidos dos ensaios de caracterização do resíduo da casca da Castanha-do-Brasil, como o teor de umidade, teor de material volátil, teor de cinzas e teor de carbono fixo, além de resultados comparativos de outros trabalhos e pesquisas.

**Tabela 4** - Resultado de análise imediata de biomassa

Ensaio	Resultados (%)	Resultados Comparativos (%)		
		Teixeira <i>et al.</i> (2016)	Silva, E. M. (2018)	Amorim <i>et al.</i> (2015)
		<i>Eucalyptus</i> sp.	<i>Hymenolobiu</i> m sp.	<i>Pinus</i> sp.
<b>Umidade</b>	5,06	12,70	4,52	8,70
<b>Material Volátil</b>	69,21	79,35	90,39	85,27
<b>Cinzas</b>	1,5	1,35	0,19	3,20
<b>Carbono Fixo</b>	24,21	19,30	4,90	11,53

Fonte: Próprio autor (2021).

Observando a Tabela 4, nota-se que os resultados apresentam divergências em comparação com os valores apresentados em outros trabalhos. Em relação ao teor de umidade, o resultado obtido através do ensaio desta pesquisa foi 5,06%, o que segundo Dias *et al.* (2012), a biomassa seria considerada apta à combustão e a pirólise, e o teor de umidade está na faixa de valores caracterizada como ideal, que é entre 5 e 10%.

Segundo Silva (2018), a umidade é uma variável que influencia na combustão e a pirólise, pois o consumo de energia utilizada no processo de pirólise será proporcional ao teor de umidade. Em adição, o teor de umidade e o tamanho da partícula são variáveis que dependem das características do sólido e influenciam diretamente no processo de pirólise (GÓMEZ, 2002).

Ao comparar os valores do teor de material volátil, nota-se que o resultado apresentado nesta pesquisa (69,21%) se encontra abaixo dos demais trabalhos. Apesar disso, ainda é um valor considerável, e que de acordo com Silva, E. M. (2018), é um componente favorável ao processo de pirólise, pois acelera esse procedimento e mantém as suas chamas uniformes.

Em relação ao teor de cinzas obtido por esta pesquisa, o valor em questão (1,5%) se assemelha aos valores apresentados pelos demais trabalhos. Esse

valor pode estar associado a presença de areias e materiais inorgânicos que podem ser provenientes do solo onde a biomassa teve contato.

Segundo Lins *et al.* (2020), um alto teor de cinzas não é desejável quando o interesse é a produção de energia, pois a presença de cinzas nos resíduos diminui a eficiência do material combustível, que necessitaria de uma maior quantidade de oxigênio consumido para derreter as cinzas. Vale evidenciar que as cinzas se apresentam em maior quantidade, tanto na casca como no lenho, e podem danificar os equipamentos por meio de corrosão (PEREIRA *et al.*, 2016).

Observando os valores de carbono fixo contidos na Tabela 4, verifica-se que o resultado desse ensaio (24,21%) é mais semelhante ao valor obtido por Teixeira *et al.* (2016), que foi de 19,30% e consideravelmente superior aos outros dois trabalhos, Silva E. M. (2018) e Amorim *et al.* (2015). Segundo Silva (2018), quanto menor o teor de carbono fixo e maior o teor de material volátil, mais rápido ocorre a combustão, o que favorece o processo de pirólise (SILVA, E. M., 2018).

Vale ressaltar que Santos (2008) relatou que os teores de carbono fixo em níveis mais altos contribuem para o aumento da produtividade de altos-fornos para o mesmo consumo de carvão. Portanto, dentre as variáveis respostas analisadas o controle da composição química, principalmente do carbono fixo, é importante, porque seu efeito reflete na utilização do forno por unidade de volume.

#### **4.1.2 Análise Termogravimétrica**

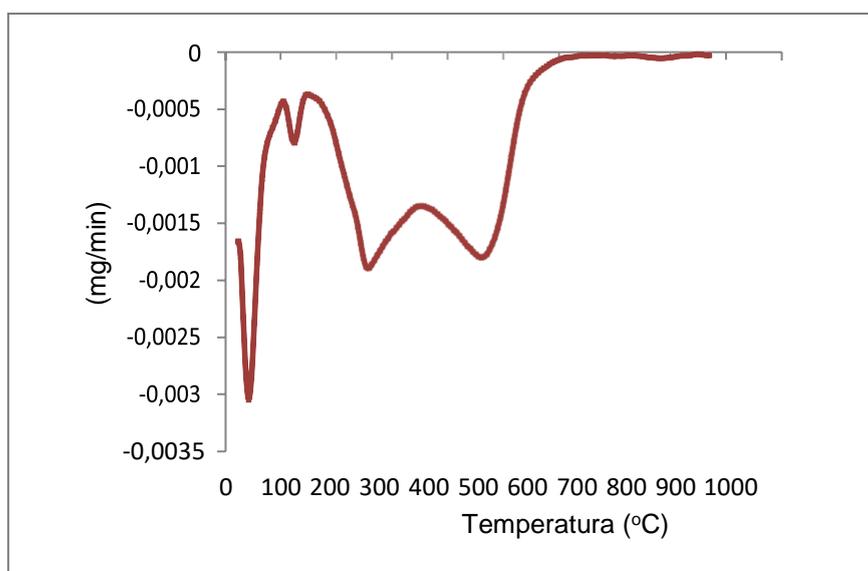
A análise termogravimétrica foi realizada a partir de uma amostra de resíduo da Castanha-do-Brasil e é ilustrada pela Figura 20; A curva DTG apresenta 4 eventos de perdas de massa da biomassa, sendo os dois primeiros relacionados com a perda de água do material e os dois últimos referentes a degradação térmica da matéria orgânica constituinte da biomassa, conforme Figura 19.

O primeiro evento foi percebido na temperatura de 40 °C e o segundo em torno de 138 °C. O percentual de perda de massa à temperatura de 138 °C

foi de 7,4 %, valor bem próximo do obtido para o teor de umidade dessa amostra na análise gravimétrica clássica (5,06 %).

Os dois eventos de degradação térmica do material orgânico foram observados nas temperaturas de 260°C e 454 °C, com perdas de massas acumuladas para essas temperaturas em torno de 35 e 75 %, respectivamente, e referem-se à da degradação de lignina, celulose e hemicelulose. Segundo PEDROZA (2011) a decomposição da lignina remanescente, inicia-se em temperaturas baixas, com uma contínua decomposição térmica até em torno de 900 °C.

**Figura 20 - Curva DTG da biomassa**



Fonte: Próprio autor (2021).

A partir de 600 °C observa-se uma diminuição na decomposição térmica da amostra. Os teores de cinzas detectados na temperatura de 700 °C foi de 1,2 %.

## 4.2 PIRÓLISE DE BIOMASSA E ATIVAÇÃO DE CARVÃO

### 4.2.1 Rendimento de carvão obtido durante a pirólise de biomassa (testes iniciais).

Os dados experimentais obtidos nos testes iniciais da pirólise biomassa são apresentados na Tabela 5 para a produção de carvão. Foi aplicado o Teste-t simulando variâncias equivalentes no tratamento estudado, com o objetivo de se verificar a existência ou não de diferença entre eles (Tabela 6).

**Tabela 5** – Dados de rendimento de carvão obtidos durante os ensaios de pirólise.

Experimentos	Temperaturas (°C)	
	300	500
1	54,58	37,37
2	53,66	37,76
3	53,08	37,45
4	55,02	38,02
<b>Média</b>	54,085	37,65
<b>Desvio Padrão</b>	1,76	3,39
<b>Graus de Liberdade</b>	6	6

Fonte: Autor (2021).

**Tabela 6** – Análise estatística através do Teste-t simulando variâncias equivalentes para a produção de carvão em ensaios de pirólise.

	300°C	500°C
<b>Média</b>	54,085	37,65
<b>Variância</b>	0,769966667	0,0891333333333341
<b>Observações</b>	4	4
<b>Variância agrupada</b>	0,42955	
<b>Hipótese da diferença de média</b>	0	
<b>GI</b>	6	
<b>Stat t</b>	35,46319373	
<b>P(T&lt;=t) uni-caudal</b>	1,67564E-08	
<b>t crítico uni-caudal</b>	1,943180281	
<b>P(T&lt;=t) bi-caudal</b>	3,35128E-08	
<b>t crítico bi-caudal</b>	2,446911851	

Fonte: Próprio autor (2021).

Os dados observados nas Tabelas 5 e 6 informam que existem diferenças de médias nos dois tratamentos empregados (temperaturas de 300 e 500°C), no nível de 95 % de confiança. Em termos de produção de carvão ativado, e não observando ainda as suas características químicas, recomenda-se a operação da mufla na temperatura de 300°C, pois a esta temperatura o gasto energético é bem inferior se comparado ao processo feito a 500°C.

De acordo com Pedroza et al., (2014), as reações que ocorrem durante o processo de pirólise estão totalmente correlacionadas com a temperatura que a biomassa é submetida. A temperatura é um parâmetro que influencia o rendimento em carvão, líquidos e gases não condensáveis, sendo que quanto

maior a temperatura, maior o grau de decomposição térmica da biomassa, com conseqüente aumento na quantidade de líquidos pirolenhosos e gases e, conseqüentemente menor rendimento em carvão.

A Tabela 7 evidencia os resultados obtidos na pirólise para a produção do carvão ativado em mufla, além de realizar a comparação com outros trabalhos. Ao observá-la, verifica-se que o rendimento do material em estudo foi de 37,65% a 54,08%, valor este está acima ou dentro do intervalo de rendimento dos outros trabalhos em comparação.

**Tabela 7** – Resultados comparativos do rendimento do Carvão

Resultados (Próprio autor)		Resultados Comparativos			
Rendimento do material (%)		Silva, E. M. (2018)	Borges, W. M. S. <i>et al.</i> (2016)	Rodrigues, C. R. (2019)	Soares, F.K.S.(2020)
300°C	500°C	Serragem de Angelim Pedra (%)	Resíduo de madeira de candeia (%)	Casca de arroz (%)	RIM
54,08	37,65	22,27 a 29,71	48,21 a 96,55	24,04 a 68,99	43,60

Fonte: Próprio autor (2021).

Silva, E. M. (2018), analisou a influência dos fatores como temperatura, vazão de alimentação do gás inerte, Tempo e taxa de Aquecimento, nos rendimentos percentuais das frações obtidas no processo de pirólise da serragem de angelim pedra. A autora informa que com o aumento da temperatura ocorre uma redução no rendimento do carvão, como esquematizado na Figura 21, e que quanto maior o tempo de pirólise, melhor é o rendimento do material.

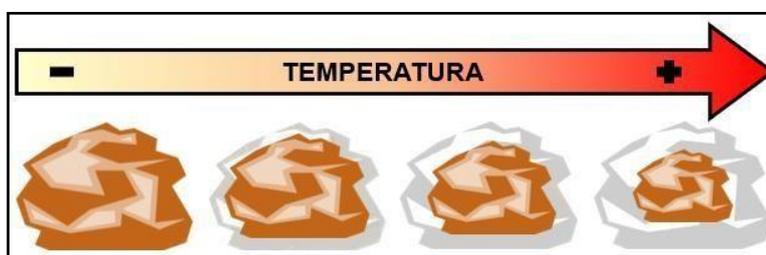
De acordo com Pedroza (2011), a devolatilização dos compostos orgânicos sólidos, que é resultado do somatório de componentes individuais como celulose, hemicelulose, lignina e extrativos, pode ser o fator que causa redução no rendimento da fração sólida com o aumento da temperatura, assim como a gaseificação parcial de resíduos carbonosos no carvão em altas temperaturas.

Conhecer o rendimento do material é um fator importante, pois se estivesse sendo comercializado, seria possível conhecer a quantidade

aproximada de biomassa *in natura* para produzir determinada quantidade de carvão. Por exemplo, para produzir 100 kg de carvão ativado, seriam necessários aproximadamente 185 kg de biomassa *in natura*, pois o rendimento é de 54,08%.

Utilizando-se os dados de Machado (2019), em que o custo do produto químico carvão ativado, é de R\$ 3,89/kg, adotando também a situação relatada no seu trabalho, de que a Empresa BRK Ambiental, no ano de 2018, empregou 10.575 kg de carvão ativado no tratamento de Água da ETA 006 em 4 meses, foi obtido que seriam gastos, no total dos 4 meses, R\$ 41.136,75. Esse valor poderia ser economizado simplesmente realizando a produção de carvão ativado a partir de aproximadamente 19 toneladas de casca da Castanha-do-Brasil, com o rendimento de 54,08%, que poderia ser adquirido através de uma parceria com as indústrias, cooperativas ou afins.

**Figura 21** - Perda de massa em função do aumento da temperatura



Fonte: Soares (2020).

## 4.3 CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO

### 4.3.1 Densidade Aparente do Carvão

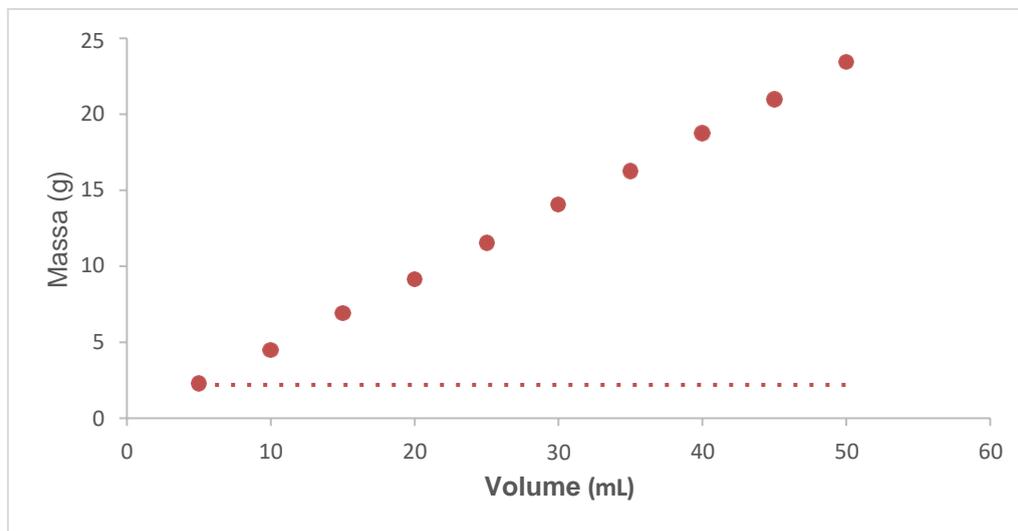
Os valores de densidade aparente do carvão apresentados nas Figuras 22 e 23 obtiverem uma média igual à 0,463 g/mL e um desvio padrão de 0,006. Com o auxílio da Tabela 8, pode-se comparar esse resultado com valores obtidos em outros trabalhos.

**Tabela 8** - Resultados de densidade aparente de carvão

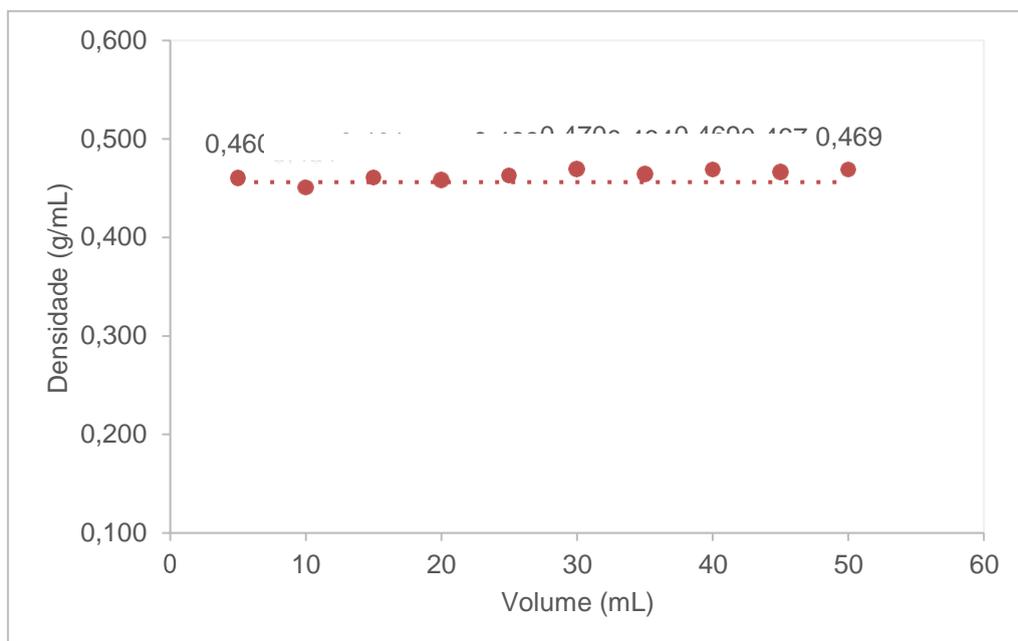
Variável	Resultados		Resultados Comparativos		
	Média	Desvio Padrão	1	2	3
<b>Densidade (g/mL)</b>	0,463	0,006	0,179	0,630	0,390

1 - Silva, E. M. (2018); 2 - Valcarenghi e Ribeiro (2013); 3 - Silva, L. L. H. *et al.* (2018).

Fonte: Próprio autor (2021).

**Figura 22** - Relação entre massa e volume do carvão ativado

Fonte: Próprio autor (2020).

**Figura 23** - Tendência dos valores densidade aparente do carvão ativado

Fonte: Próprio autor (2020).

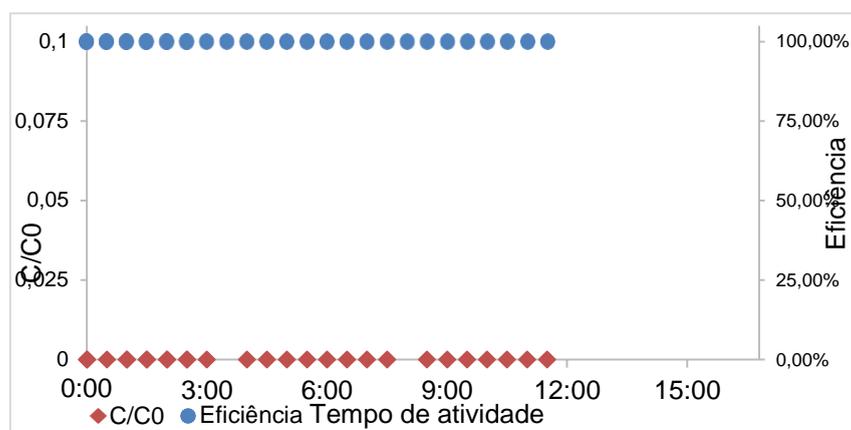
Comparando os resultados da Tabela 8, nota-se que existe uma diferença entre o valor obtido por esta pesquisa e os demais trabalhos, que pode ser explicada pelas distintas granulometrias dos carvões. Diante disso, Loureiro (2012) afirma que a densidade está relacionada à granulometria do material, e destaca que o carvão granular é menos compacto que o carvão moído (pulverizado), o que resulta em um material mais denso.

#### 4.3.2 Teste de Adsorção de Azul de Metileno em Filtro de Carvão e Areia

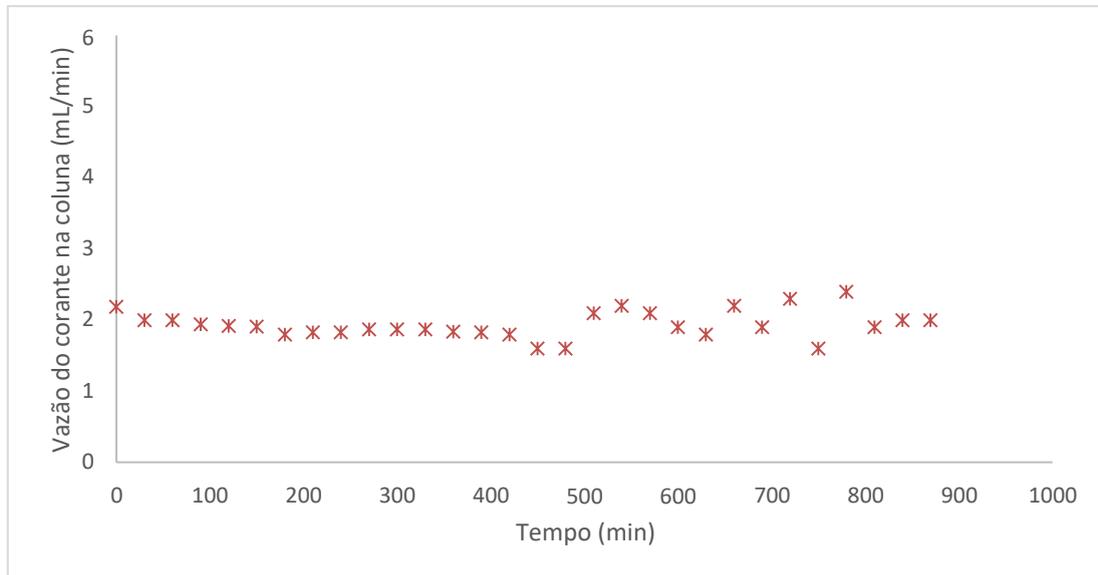
O teste de adsorção de azul de metileno busca aferir a capacidade adsortiva do carvão ativado a partir do resíduo da indústria madeireira (RIM). Segundo Silva, E. M. (2018), o processo de adsorção pode ser influenciado por diversas variáveis, como por exemplo, a temperatura, o pH e a pressão, além da composição e característica do adsorvente e do adsorvato.

De acordo com Couto (2009), o carvão possui a capacidade adsortiva relacionada à sua área superficial, ao teor de cinzas e à existência, tamanho e distribuição de poros. Ao realizar o teste de adsorção de azul de metileno com o filtro de carvão e areia, conseguiu-se observar a vazão do corante na coluna ao longo do período que pode ser verificado através da Figura 25. Por sua vez, a Figura 24 corresponde a curva de relação entre concentração final e inicial ( $C/C_0$ ) e eficiência na remoção do corante, na concentração de 4,56 mg/L.

**Figura 24** - Curva de relação entre concentração final e inicial e eficiência para a concentração de 4,56 mg/L de corante



Fonte: Próprio autor (2021).

**Figura 25** - Vazão do corante na coluna ao longo do período

Fonte: Próprio autor (2021).

O teste de adsorção realizado com o corante a uma concentração de 4,56 mg/L conforme mostra a Tabela 9, apresentou resultados com a taxa máxima de adsorção por um período de 14 horas e foram realizadas as leituras de absorvância a cada 30 minutos.

**Tabela 9 – Resultados do teste de Adsorção de Azul de Metileno**

HORÁRIO	VAZÃO MÉDIA DO LÍQUIDO (mL/min)	ABSORBÂNCIA	TAXA DE REMOÇÃO (%)	CONCENTRAÇÃO	C/CO
08:25	2,19	0	100	0	0
08:55	2,00	0	100	0	0
09:25	2,00	0	100	0	0
09:55	1,945525292	0	100	0	0
10:25	1,923076923	0	100	0	0
10:55	1,908396947	0	100	0	0
11:25	1,798561151	0	100	0	0
11:55	1,838235294	0	100	0	0
12:25	1,831501832	0	100	0	0
12:55	1,872659176	0	100	0	0
13:25	1,872659176	0	100	0	0
13:55	1,865671642	0	100	0	0
14:25	1,838235294	0	100	0	0
14:55	1,831501832	0	100	0	0
15:25	1,779359431	0	100	0	0
15:55	1,623376623	0	100	0	0
16:25	1,5625	0	100	0	0
16:55	2,145922747	0	100	0	0
17:25	2,222222222	0	100	0	0
17:55	2,145922747	0	100	0	0
18:25	1,937984496	0	100	0	0
18:55	1,773049645	0	100	0	0
19:25	2,222222222	0	100	0	0
19:55	1,923076923	0	100	0	0
08:15	2,325581395	0	100	0	0
08:45	1,577287066	0	100	0	0
09:15	2,403846154	0	100	0	0
09:45	1,901140684	0	100	0	0
10:15	2,024291498	0	100	0	0
10:45	1,976284585	0	100	0	0

Fonte: Próprio autor (2021).

Soares (2020) comparou seu teste de adsorção do azul de metileno com concentração de 10 mg/L com o de concentração de 2,0 mg/L, percebeu-se que ao usar a concentração de 10 mg/L, o teste apresentou 33,75% de eficiência de adsorção na última leitura. Diante disso, constatou-se que quanto maior a concentração do corante, mais rápido o filtro atinge a saturação, e, conseqüentemente, menor é a sua capacidade adsortiva.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Utilizando-se a casca da Castanha-do-Brasil no processo de pirólise para a produção de carvão ativado, foi observado que a biomassa em estudo possui características propícias para a confecção do carvão, além de atingir bons resultados durante a realização dos testes e ensaios.

Ao longo da efetivação dos objetivos específicos apontados nesta pesquisa, atingiu-se as seguintes conclusões:

A densidade aparente da casca da Castanha-do-Brasil (0,600 g/mL) apresentou resultado superior à outras pesquisas. Biomassas que apresentam alta densidade se tornam vantajosas para a queima direta e biorredução.

A biomassa protagonizou também um baixo teor de umidade, muito em função da amostra ter sido coletada já seca, e foi caracterizada como ideal para processos térmicos (combustão e pirólise).

O teor de material volátil resultou em um valor inferior em comparação com outras pesquisas, mas mesmo assim é considerado um valor elevado, o que aponta para o uso do resíduo em rota térmica para produção de carvão.

A casca da Castanha-do-Brasil possui um baixo teor de cinzas (1,5%), que pode ser explicado pela composição química da madeira, que por sua vez, sofre influência do solo e seus nutrientes.

Diante disso, constata-se que um elevado teor de cinzas não é desejável. O teor de carbono fixo do trabalho (24,21) pode ser considerado alto, fazendo com que a combustão seja lenta, favorecendo o processo de pirólise.

A análise termogravimétrica (TG) apontou a existência de 4 eventos durante a sua realização, sendo os dois primeiros eventos responsáveis pela perda de água, e os demais eventos em função da degradação dos componentes como hemiceluloses, celulosas e lignina.

No processo de pirólise da casca da Castanha-do-Brasil e ativação física de carvão em mufla, o material empregado resultou em um rendimento de

54,08% que comparado a outros trabalhos, se encontra na mesma faixa ou até superior aos resultados adquiridos.

A partir da porcentagem de rendimento obtido pela pirólise, é possível dimensionar a quantidade aproximada de biomassa necessária para a produção de uma determinada quantidade de carvão ativado.

No ensaio de adsorção de azul de metileno foram obtidos ótimos resultados, em que o carvão ativado da casca da Castanha-do-Brasil atuou removendo 100% do corante à uma concentração de 4,56 mg/L durante 14 horas.

Além dos ótimos resultados obtidos, o carvão ativado da casca da Castanha-do-Brasil pode promover economia, pois em função da biomassa ser facilmente descartada, seria possível adquirir esse material sem custo algum, e economizar o valor que seria gasto com a aquisição do carvão ativado comercial, tão utilizado no processo de filtração.

Diante disso, pode-se afirmar que a casca da Castanha-do-Brasil é uma alternativa de material viável a ser empregado no processo de pirólise para a produção de carvão ativado.

Recomenda-se para uma futura pesquisa, a adoção de uma metodologia de preparo de amostras de biomassa, contendo algum processo de remoção de contaminantes e afins de maneira minuciosa, para verificar se há divergência considerável na caracterização do material, principalmente, nos teores de material volátil, cinzas e carbono fixo. Além disso, sugere-se realizar a análise termogravimétrica do carvão ativado obtido.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. J. **Do extrativismo à domesticação**: as possibilidades da Castanha do Pará. Tese (Doutorado)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8137/tde-05082015-141612/pt-br.php#:~:text=Do%20extrativismo%20%C3%A0%20domestica%C3%A7%C3%A3o%3A%20as%20possibilidades%20da%20Castanha%2Ddo%2Dpar%C3%A1&text=Uma%20das%20mais%20importantes%20atividades,muitas%20popula%C3%A7%C3%B5es%20tradicionais%20daquela%20regi%C3%A3o..> Acesso em: 04 Set. 2020.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da União (DOU). Poder Legislativo, Brasília, DF. 03 de agosto de 2010. Seção 1, p. 3

BEN - Balanço Energético Nacional 2015 – **Ano base 2014: Relatório Síntese**. Brasil. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, EPE, pp. 62, 2015  
 CARMONA, Iara Nobre et al. Potencial energético da biomassa e carvão vegetal de resíduos de Castanha do Pará (*Bertholletia excelsa* Bonpl.).

BOSCHETTI, W. T. N. et al. **Propriedades do carvão vegetal produzido com madeira de reação proveniente de árvores inclinadas por ventos**. Revista *Árvore*, v. 41, n. 6, p. 1-7, 2017. DOI: 10.1590/1806 9088201700060 0001.

III CBCTEM – **Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira**. Florianópolis, 2017. Disponível em: <https://proceedings.science/cbctem/papers/potencial-energetico-da-biomassa-e-carvao-vegetal-de-residuos-de-Castanha-do-para--bertholletia-excelsa-bonpl-->. Acesso em: 01 Out. 2020.

CAMPORRO, A.; CAMPORRO, M. J.; COCA, J.; SASTRE, H. **Regeneration of an activated carbon bed exhausted by industrial phenolic wastewater**. *J. Hazard. Mat.*, 37, p. 207-214, 1994. Disponível em: <https://oatao.univ-toulouse.fr/6919/1/muranaka.pdf>. Acesso em: 30 Dez. 2020

COSTA, C. A. **Sorção de Íons Cobre, Níquel e Zinco com o Rejeito do Beneficiamento de Carvões e Outros Materiais Alternativo**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 64p. (dissertação de mestrado). 1998. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Kassia\\_Santos3/publication/339146204\\_remocao\\_do\\_corante\\_azul\\_de\\_metileno\\_no\\_tratamento\\_de\\_efluentes\\_por\\_adsorcao\\_em\\_carvao\\_de\\_coco\\_verde\\_e\\_carvao\\_ativado/links/5e415cee299bf1cdb91da0ff/remocao-do-corante-azul-de-metileno-no-tratamento-de-efluentes-por-adsorcao-em-carvao-de-coco-verde-e-carvao-ativado.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Kassia_Santos3/publication/339146204_remocao_do_corante_azul_de_metileno_no_tratamento_de_efluentes_por_adsorcao_em_carvao_de_coco_verde_e_carvao_ativado/links/5e415cee299bf1cdb91da0ff/remocao-do-corante-azul-de-metileno-no-tratamento-de-efluentes-por-adsorcao-em-carvao-de-coco-verde-e-carvao-ativado.pdf). Acesso em: 25 Dez. 2020.

CORDEIRO, J.L. C.; FIUZA JUNIOR, R. A. F.. **Produção de Carvões Ativado Derivados de Biomassa e sua Aplicação em Processos de Adsorção**. *Cadernos de Prospecção – Salvador*, v. 12, n. 5, p. 1584-1597, dezembro, 2019. Disponível em: <https://portalseer.ufba.br/index.php/nit/article/view/29050>. Acesso em: 25 Set. 2020.

CRUZ JUNIOR, O. F. **Produção de carvão ativado a partir de produtos residuais de espécies nativas da região Amazônica**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2010. Disponível em: <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp148880.pdf>. Acesso em: 25 Set. 2020.

COUTO, G. M. **Utilização da serragem de *Eucalyptus sp.* na preparação de carvões ativados**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, 2009.

DE ARAÚJO, Ana Clara Caxito et al. **Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável**. Pesquisa Florestal Brasileira, v. 38, 2018.

DEL PIERO, I. R. A. **Produção de carvão a partir do ouriço e casca da Castanha do Pará**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de Educação e Meio Ambiente, Ariquemes, 2018.

DUARTE, R. V. de L. **Preparação de compósitos de óxido de ferro e carvão ativado do ouriço (mesocarpo) da Castanha do Brasil para remoção de corante azul de metileno em meio aquoso**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Amazonas, 2017. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/7252>. Acesso em: 25 Set. 2020.

FÉLIX, C. R. de O. et al. **Pirólise rápida de biomassa de eucalipto na presença de catalisador Al-MCM-41**. Revista Matéria. Suplemento, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rmat/v22s1/1517-7076-rmat-22-suppl-e11915.pdf>. Acesso em: 01 Out. 2020.

FILHO, A; FERREIRA, A; MELO, G; LANGE, L. **Tratamento de resíduos de serviços de saúde pelo processo da pirólise**. Revista Engenharia Sanitária Ambiental. V.19, n. 2, p. 187-194, 2014.

FORTUNY, A.; FONT, J.; FABREGAT, A. **Wet air oxidation of phenol using active carbon as catalyst**. *Appl. Catal. B: Environ.*, 19, p. 165-173, 1998. Disponível em: <https://oatao.univ-toulouse.fr/6919/1/muranaka.pdf>. Acesso em: 30 Dez. 2020

IBGE, **Produção da extração vegetal e da silvicultura**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?=&t=resultados>>. Acesso em: 23 out. 2020.

KHOPADE, A.; REN, B.; LIU, X.; MAHADIK, K.; ZHANG, L.; KOKARE, C. **Production and characterization of biosurfactant from marine *Streptomyces* species B3**, *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 367, p. 311-318, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/ce/v59n350/21.pdf>. Acesso em: 30 Dez. 2020

LIMA, S. M. et al. **Análise do gerenciamento de resíduos sólidos na indústria de beneficiamento de Castanha de caju**. XXXV Encontro Nacional De Engenharia De Produção. Perspectivas Globais para a Engenharia de Produção Fortaleza, CE, Brasil, 13 a 16 de outubro de 2015. Disponível em: [http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN\\_STP\\_214\\_269\\_26793.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STP_214_269_26793.pdf). Acesso em: 25 Set. 2020.

LOUREIRO, L. F. **Avaliação da adsorção do herbicida 2,4-D em carvão ativado em pó e granular por meio de análises de isotermas de adsorção utilizando diferentes qualidades de água.** 2012. 129 f. Dissertação (Mestrado em Poluição do Ar, Recursos Hídricos, Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

MOREIRA, R. **Estudo da pirólise lenta da casca da Castanha de caju.** Dissertação (Mestrado) – IPEN, Autarquia associada à Universidade de São Paulo, 2015. Disponível em:  
[http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Renata%20Moreira\\_M.pdf](http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Renata%20Moreira_M.pdf). Acesso em: 25 Set. 2020

MOTA, F. de A. da S. et al. **Pirólise da biomassa Lignocelulósica: uma revisão.** Revista GEINTEC – ISSN: 2237-0722. São Cristóvão/SE – 2015. Vol. 5/n. 4/ p.2511-2525. Disponível em:<http://www.revistageintec.net/index.php/revista/article/view/574>. Acesso em: 25 Set. 2020.

NASCIMENTO, R. F. et al. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais.** Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. Disponível em:  
[http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/10267/1/2014\\_liv\\_rfdnascimento.pdf](http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/10267/1/2014_liv_rfdnascimento.pdf). Acesso em: 01 Out. 2020.

NOGUEIRA, M.; RENDEIRO, G. **Combustão e gasificação de biomassa sólida.** *In*: Caracterização energética da biomassa vegetal. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. p 53-63. Disponível em:  
[https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Solucoes\\_Energeticas\\_para\\_a\\_Amazonia\\_Biomassa.pdf](https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Solucoes_Energeticas_para_a_Amazonia_Biomassa.pdf). Acesso em: 26 Set. 2020.

PARIDA, K. M.; SAHU, S.; REDDY, K. H.; SAHOO, P. C. **A kinetic, thermodynamic, and mechanistic approach toward adsorption of methylene blue over water-washed manganese nodule leached residues.** Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 50, n. 2, p. 843-848, 2010. Disponível em:  
<https://www.scielo.br/pdf/ce/v59n350/21.pdf>. Acesso em: 30 Dez. 2020

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, Rio Grande do Norte, 2011. Disponível em:  
<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/15915>. Acesso em: 26 Set. 2020

PINTO, A., AMARAL, P., GAIA, C., & OLIVEIRA, W. (2010). **Boas Práticas para Manejo Florestal e Agroindustrial – Produtos Florestais Não Madeireiros** (p. 180). Belém: Imazon e SEBRAE-AM, 2010.

ROCHA, J; PEREZ, J; CORTEZ, L. **Aspectos teóricos e práticos da pirólise da biomassa. Núcleo interdisciplinar de planejamento energético,** Universidade Estadual de Campinas NIPE-UNICAMP, 2004.

RODRIGUES, C. R. **Degradação Térmica da Casca de Arroz e Utilização do Carvão Obtido no Processo para Polimento de Águas Cinzas.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2019. Disponível em:  
<http://repositorio.uft.edu.br/handle/11612/1449>. Acesso em: 26 Set. 2020.

SANTAGO, F. L. S.; REZENDE, M. A. **Aproveitamento de resíduos florestais de Eucalyptus spp na indústria de fabricação de celulose para geração de energia térmica e elétrica.** Energ. Agric., Botucatu, vol. 29, n.4, p.241-253, outubro-dezembro, 2014. Disponível em:

<http://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/948>. Acesso em: 01 Out. 2020.

SANTOS, K. G. **Aspectos fundamentais da pirólise de biomassa em leito de jorro: fluidodinâmica e cinética do processo.** Tese (Doutorado)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011. Disponível em:

<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/15058/1/TeseParte1.pdf>. Acesso em: 01 Out. 2020.

SANTOS, M. A. S. **“Quality parameters of charcoal for use in blast furnaces,”** in Proceedings of the National Forum on Charcoal, vol. 1, UFMG, Belo Horizonte, Brazil, 2008.

SANTOS, O. V. **Desenvolvimento de barras de alto teor protéico a partir da Castanha-do-Brasil.** Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Pará, 2008b. Disponível em:

<http://ppgcta.proesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/2008/Orqu%C3%ADdea%20dos%20Santos.pdf>. Acesso em: 25 Set. 2020

SCHULTZ, J. **Obtenção de carvão ativado a partir de biomassa residual para a adsorção de poluentes.** Tese (Doutorado)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em:

<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/48962/R%20-%20T%20-%20JULIANA%20SCHULTZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 01 Out. 2020

SILVA, D. A. et al. **Propriedades da madeira de Eucalyptus benthamii para produção de energia.** Pesquisa Florestal Brasileira, v. 35 n. 84 p. 481-485. 2015. DOI: 10.4336/2015.pfb.35.84.677.

SILVA, F. T. M. - **Valorização da madeira Eucalyptus sp. via pirólise [recurso eletrônico]: caracterização e rendimentos dos produtos.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 2019.

SILVA, G. et al. **Avaliação da área de disposição final de resíduos sólidos de um município de pequeno porte mediante os critérios técnicos e ambientais.** GC Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades. V. 08, n. 61, 2020. Disponível em: [https://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/gerenciamento\\_de\\_cidades/article/view/2414/2239](https://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/gerenciamento_de_cidades/article/view/2414/2239). Acesso em: 25 Set. 2020.

SOARES, F. K. S. **Uso do resíduo da indústria madeireira no processo de pirólise para produção de carvão ativado.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal do Tocantins, Campus Palmas. Palmas, 2020.

SOARES, V. C. et al. **Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades.** Cerne, v. 21, n. 2, p. 191-197, 2015. DOI: 10.1590/010477 60201521021294.

SOUZA, A. L. G. et al. **Aproveitamento dos resíduos de extração de óleo da Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) em produtos alimentícios ricos em proteínas, lipídios e fibras.** Rev Pan-Amaz Saude 2016; 7(4):21-30. Disponível em: <http://scielo.iec.gov.br/pdf/rpas/v7n4/2176-6223-rpas-7-04-00021.pdf>. Acesso em: 25 Set. 2020.

TUMELERO, N. **Pesquisa experimental: conceito, definições e como fazer em 5 passos.** Setembro de 2019. Disponível em: <https://blog.mettzer.com/pesquisa-experimental/>. Acesso em: 26 Set. 2020.

TRUGILHO, P. F. et al. **Características de crescimento, composição química, física e estimativa de massa seca de madeira em clones e espécies de *Eucalyptus jovens*.** Ciência Rural, v. 45, n. 4, p. 661- 666, 2015. DOI: 10.1590/0103-8478cr20130625.