



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

FELIPE KELSEN SENA SOARES

**USO DO RESÍDUO DA INDÚSTRIA MADEIREIRA NO PROCESSO DE PIRÓLISE
PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO**

**PALMAS
2020**

FELIPE KELSEN SENA SOARES

**USO DO RESÍDUO DA INDÚSTRIA MADEIREIRA NO PROCESSO DE PIRÓLISE
PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO**

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

2020

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

S676u Soares, Felipe Kelsen Sena
 USO DO RESÍDUO DA INDÚSTRIA MADEIREIRA NO
 PROCESSO DE PIRÓLISE PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO
 ATIVADO / Felipe Kelsen Sena Soares. – Palmas, TO, 2020.
 76 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2020.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Resíduo da indústria madeireira. 2. Carvão ativado. 3. Pirólise.
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

FELIPE KELSEN SENA SOARES

USO DO RESÍDUO DA INDÚSTRIA MADEIREIRA NO PROCESSO DE PIRÓLISE PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO

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
Engenheiro Civil.

Aprovado em: 27 / 08 / 2020

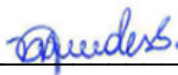
BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador – IFTO



Prof.^a Me. Elaine da Cunha Silva Paz
Examinadora – IFTO



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

*Dedico este trabalho aos meus familiares
e amigos, que de alguma maneira, seja
da mais singela possível, contribuíram
com a minha caminhada e me apoiaram
na realização deste sonho.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, primeiramente, que me guiou e me deu força e saúde para encarar cada obstáculo que surgiu durante essa jornada.

À Nossa Senhora, que me protegeu e cuidou de mim durante cada etapa e desafio deste curso.

Aos meus pais, Fernando Antonio Sena Soares e Zilma Cardoso Barros Soares, e minha irmã, Leticia Cristina Sena Soares, que depositaram em mim todo o carinho, atenção, confiança e amor para que eu pudesse chegar até onde cheguei. Sem vocês eu não conseguiria vencer muitos dos meus desafios.

À minha namorada, Natália Milhomem Barbosa Gonçalves, amiga e parceira em todos os momentos. Sempre me auxiliando em cada tomada de decisão e me motivando a não desanimar durante o trajeto. Sou grato por toda a compreensão, confiança e reciprocidade vindos de você.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza, pelo sim, em me aceitar como seu orientando, por se colocar à disposição sempre que necessário, por todas as orientações, dicas e oportunidades que me foram apresentadas, e principalmente, pelo bom humor e discernimento com que me guiou até aqui.

Agradeço também aos meus tios, Eduardo Ményks Duarte Marinho e Fernanda Sena Ribeiro, por terem cuidado de mim assim que cheguei a essa cidade, por compartilharem comigo o desafio de começar uma nova fase da vida em um novo local, e por terem me dado todo o suporte necessário para vencer alguns de meus obstáculos.

Ao Instituto Federal do Tocantins, campus Palmas, pela oportunidade que me foi concedida durante esses últimos 5 anos, fornecendo o conhecimento necessário para eu desempenhar minha profissão com segurança e qualidade, bem como toda a estrutura disponibilizada e corpo docente qualificado para realizar a formação de tantos outros profissionais.

Aos meus colegas de turma, que aceitaram o desafio e iniciaram a caminhada neste curso juntamente comigo. Foram muitos momentos enriquecedores ao lado de vocês e foi através da união que conseguimos superar várias dificuldades em cada um dos períodos do nosso curso.

Agradeço aos meus amigos Victor Baduy Batista Mesiara Costa e Ana Claudia dos Reis Silva, pelas aventuras vivenciadas que vão desde viagens

inesquecíveis a várias noites sem dormir fazendo trabalhos. Aprendi muito com vocês e sou grato pela amizade e consideração que vocês têm por mim.

À Atlética Concreta, que me acolheu e me incentivou a participar dos eventos esportivos, promovendo momentos de saúde e lazer, que são tão importantes quanto a busca pelo conhecimento, pois é necessário que exista equilíbrio entre a mente e o corpo.

Enfim, a todas as pessoas que dirigiram suas orações e pensamentos positivos a mim, e que contribuíram para a realização desse trabalho e desse sonho. Muito obrigado!

*“Em todas as coisas da natureza existe
algo de maravilhoso”.*
(Aristóteles)

RESUMO

SOARES, Felipe Kelsen Sena. **Uso do resíduo da indústria madeireira no processo de pirólise para produção de carvão ativado**. 2020. 76 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2020.

A busca por materiais alternativos que possam ser utilizados na produção de carvão ativado e que apresentem bons resultados é um dos desafios a serem vencidos na atualidade. A confecção desse carvão a partir de um material alternativo pode gerar benefícios sociais, econômicos e, principalmente, ambientais. Desse modo, este trabalho objetivou utilizar o resíduo da indústria madeireira no processo de pirólise para a produção de carvão ativado. A biomassa foi caracterizada através das análises imediatas: densidade aparente (0,318 g/mL), umidade (6,89%), material volátil (61,38%), cinzas (25,35%) e carbono fixo (6,38%), e análise termogravimétrica. O carvão pirolisado foi obtido e ativado em um reator da marca FLYEVER do modelo FE50RPN de leito fixo bipartido de aço inox, de 100 cm de comprimento e diâmetro externo de 10 cm, linha 05/50, resultando em um rendimento de 43,60% da massa inicial do resíduo da indústria madeireira. A caracterização do carvão foi realizada através da análise imediata da densidade aparente (0,278 g/mL) e teste de adsorção de azul de metileno com coluna de filtração de carvão e areia, em que foram adotadas duas concentrações do corante (2 mg/L e 10 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 menor concentração por um período de aproximadamente 26 horas e meia. Com a maior concentração de corante, a coluna de filtração atuou por um período de 8 horas, sendo que nas 5 horas iniciais o filtro desempenhou eficiência superior à 97% na adsorção do corante.

Palavras-chave: Resíduo da indústria madeireira. Carvão ativado. Pirólise. Adsorção.

ABSTRACT

SOARES, Felipe Kelsen Sena. **Use of wood industry residue in the pyrolysis process in the production of activated charcoal.** 2020. 76 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2020.

The search for alternative materials that can be used in the production of activated charcoal and that present good results is one of the challenges to be overcome today. Making this charcoal from an alternative material can generate social, economic and, above all, environmental benefits. Thus, this work aimed to use the wood industry residue in the pyrolysis process for the production of activated charcoal. Biomass was characterized through immediate analysis: bulk density (0,318 g/mL), humidity (6,89%), volatile material (61,38%), ash (25,35%) and fixed carbon (6,38%), and thermogravimetric analysis. The pyrolysed charcoal was obtained and activated in a reactor of the brand FLYEVER of the model FE50RPN with a fixed bipartite stainless steel bed, 100 cm long and 10 cm outside diameter, line 05/50, resulting in a yield of 43,60% of the initial mass of the wood industry residue. The charcoal characterization was performed through the immediate analysis of the apparent density (0,278 g/mL) and methylene blue adsorption test with a coal and sand filtration column, in which two concentrations of the dye were adopted (2 mg/L and 10 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 lowest concentration for a period of approximately 26 and a half hours. With the highest concentration of dye, the filtration column operated for a period of 8 hours, and in the initial 5 hours the filter performed more than 97% efficiency in the adsorption of the dye.

Keywords: Wood industry residue. Activated charcoal. Pyrolysis. Adsorption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama dos problemas socioambientais com suas causas e consequências.....	21
Figura 2 - Volume de madeira no mundo em 2005 (em bilhões de m ³)	23
Figura 3 - Amazônia Legal e bioma amazônia.....	24
Figura 4 - Fronteiras e polos madeireiros na Amazônia Legal em 2009	25
Figura 5 - Principais usos do resíduos de madeira em indústrias madeireiras da Amazônia Legal em 2009	27
Figura 6 - Volume total por tipo de resíduo das empresas avaliadas em Gurupi – TO no ano de 2012.....	29
Figura 7 - Percentual e categorias de resíduos de madeira	29
Figura 8 - Processo de conversão de biomassa e seus produtos.....	32
Figura 9 - Distribuição das frações sólidas, líquidas e gasosas em função da taxa de aquecimento, tempo de residência e temperatura de processamento	38
Figura 10 - Diagrama dos procedimentos metodológicos abordados neste trabalho	40
Figura 11 - Aparas e maravalhas de madeira	41
Figura 12 - Compartimento e pilha de pó médio (serragem)	41
Figura 13 - Coleta de serragem (pó médio)	41
Figura 14 - Disposição do pó de serra (pó fino)	42
Figura 15 - Coleta de pó de serra (pó fino)	42
Figura 16 - Peneira para remoção de sujeiras superficiais	43
Figura 17 - Pó de serra peneirado	43

Figura 18 - Balança analítica e proveta de 100 mL.....	44
Figura 19 - Biomassa com água destilada em descanso.....	46
Figura 20 - Fabricação de briquete de biomassa de RIM	47
Figura 21 - Secagem de briquetes em estufa	47
Figura 22 - Reator de pirólise em leito fixo.....	48
Figura 23 - Autoclave vertical e conjunto de autoclave e reator de pirólise	48
Figura 24 - Plano de ação da pirólise e ativação física do carvão	49
Figura 25 - Amostra de biomassa fora e dentro do reator de pirólise	49
Figura 26 - Azul de metileno com concentração de 100 mg/L	50
Figura 27 - Sistema empregado no ensaio de adsorção	51
Figura 28 - Areia passante da peneira 2 μ m	51
Figura 29 - Filtro utilizado no ensaio	52
Figura 30 - Curva de calibração.....	52
Figura 31 - Soluções com concentrações de 1, 2, 3, 4 e 5 mg/L de azul de metileno	53
Figura 32 - Relação entre massa e volume da biomassa	54
Figura 33 - Tendência dos valores de densidade aparente da biomassa.....	55
Figura 34 - Cadinhos em dessecador durante ensaio de teor de material volátil....	57
Figura 35 - Cadinhos em dessecador durante ensaio de teor de cinzas	57
Figura 36 - Análise termogravimétrica	59
Figura 37 - Perda de massa durante os eventos	60

Figura 38 - Perda de massa em função do aumento da temperatura.....	63
Figura 39 - Relação entre massa e volume do carvão ativado	64
Figura 40 - Tendência dos valores densidade aparente do carvão ativado	64
Figura 41 - Curva de relação entre concentração final e inicial e eficiência para a concentração de 2 mg/L de corante	65
Figura 42 - Curva de relação entre concentração final e inicial e eficiência para a concentração de 10 mg/L de corante	66
Figura 43 - Filtro de carvão e areia após ensaio de adsorção	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fronteiras madeireiras na Amazônia Legal em 2009.....	25
Tabela 2 - Produção de madeira processada da Amazônia Legal em 2009.....	26
Tabela 3 - Relação entre categoria e quantidade de resíduo e porte das empresas	28
Tabela 4 - Processos internos da pirólise de acordo com a temperatura	36
Tabela 5 - Parâmetros operacionais dos processos de pirólise e principais produtos	37
Tabela 6 - Resultados de densidade aparente de biomassa	55
Tabela 7 - Resultado de análise imediata de biomassa.....	56
Tabela 8 - Perda de massa relativa e acumulada dos eventos da TG.....	60
Tabela 9 - Faixas de temperatura de decomposição de grupos e compostos orgânicos.....	61
Tabela 10 - Comparação de resultados de TG	61
Tabela 11 - Rendimento do carvão	62
Tabela 12 - Resultados de densidade aparente de carvão.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS, ACRÔNIMOS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Acre
ASTM	American Society for Testing and Materials
CA	Carvão ativado
CF	Teor de carbono fixo
CO	Monóxido de carbono
CO₂	Dióxido de carbono
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
H₂	Gás hidrogênio
IFTO	Instituto Federal do Tocantins
Imazon	Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia
Inox	Aço inoxidável
LARSEN	Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética
MDF	Medium Density Fiberboard
MT	Mato Grosso
PA	Pará
PVC	Policloreto de vinila
RCAN	Resíduo da casca de acácia negra
RIM	Resíduo da indústria madeireira
RO	Rondônia

SFB	Serviço Florestal Brasileiro
TG	Análise termogravimétrica
USP	Universidade de São Paulo
%	Porcentagem
°C	Grau Celsius
C/C0	Concentração final sobre concentração inicial
cm	Centímetro
g	Grama
kg	Quilograma
m³	Metro cúbico
mg/L	Miligrama por litro
mL	Mililitro
mm	Milímetro
nm	Nanômetro
µm	Micrômetro
pH	Potencial hidrogeniônico
R\$	Reais
R²	Coeficiente de determinação
s	Segundo
V	Volume

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	19
1.2 JUSTIFICATIVA.....	19
1.3 OBJETIVOS.....	22
1.3.1 Objetivo Geral.....	22
1.3.2 Objetivos Específicos	22
2 REVISÃO DE LITERATURA	23
2.1 A MADEIRA NA HISTÓRIA.....	23
2.2 O BIOMA AMAZÔNIA E A AMAZÔNIA LEGAL	24
2.3 RESÍDUOS DA INDÚSTRIA MADEIREIRA	26
2.3.1 Geração De Resíduos Na Amazônia Legal.....	27
2.3.2 Geração De Resíduos Da Indústria Madeireira No Tocantins	27
2.4 UTILIDADES PARA O RIM	30
2.4.1 Biomassa De Madeira	31
2.4.2 Conversão Energética.....	31
2.4.2.1 Fermentação	32
2.4.2.2 Liquefação.....	33
2.4.2.3 Combustão Direta	33
2.4.2.4 Processamento Mecânico	33
2.4.2.5 Densificação.....	33
2.4.2.6 Gaseificação.....	33
2.4.3 Pirólise	34
2.4.3.1 Pirólise Lenta.....	35
2.4.3.2 Pirólise Rápida	36
2.5 PESQUISAS COM CARVÃO ATIVADO A PARTIR DO RIM.....	38
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	40

3.1 COLETA E PREPARO DA AMOSTRA	40
3.2 PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS EMPREGADOS NA CARACTERIZAÇÃO DE BIOMASSA DE RIM	43
3.2.1 Análise Imediata da Biomassa	43
3.2.1.1 Umidade	44
3.2.1.2 Material Volátil	45
3.2.1.3 Teor de Cinzas	45
3.2.1.4 Teor de Carbono Fixo – CF	46
3.2.1.5 Densidade Aparente	44
3.2.2 Análise Termogravimétrica – TG	46
3.3 CONFECÇÃO DE BRIQUETES DA BIOMASSA DE RIM.....	46
3.4 PIRÓLISE E ATIVAÇÃO DE CARVÃO EM REATOR DE LEITO FIXO	47
3.5 PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS EMPREGADOS NA CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO.....	49
3.5.1 Análise Imediata do Carvão Ativado.....	49
3.5.1.1 Densidade Aparente do Carvão	50
3.5.2 Teste de Adsorção de Azul de Metileno em Filtro de Carvão e Areia.....	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA	54
4.1.1 Análise Imediata da Biomassa	54
4.1.2 Análise Termogravimétrica	58
4.2 PIRÓLISE DE BIOMASSA E ATIVAÇÃO DE CARVÃO	62
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO.....	63
4.3.1 Densidade Aparente do Carvão	63
4.3.2 Teste de Adsorção de Azul de Metileno em Filtro de Carvão e Areia.....	65
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

No Brasil cerca de 64% de sua extensão territorial é provida de algum tipo de cobertura florestal, além de ser o país com a maior quantidade de floresta tropical do planeta e o maior produtor e líder mundial em consumo de madeira tropical (PEREIRA, 2003).

Segundo Castro e Silva (2007), a Amazônia brasileira é responsável por mais de 90% da produção florestal de áreas naturais do Brasil, obtendo, aproximadamente, 14 milhões de metros cúbicos de madeira em tora extraídos de seu território.

Caracterizado como um dos setores mais importantes no cenário mundial, a indústria madeireira se destaca por ser um setor da economia brasileira de grande representatividade, nos quesitos geração de renda, tributos, divisas e empregos (NUNES; MELO; TEIXEIRA, 2012).

A madeira é um insumo que possui uma vasta área de utilização, podendo ser empregada na criação de móveis, artesanatos e inclusive na construção civil, como por exemplo, janelas, portas, pisos e estruturas de cobertura. Para que seja possível utilizar a madeira, é necessário realizar processos que a preparem e possibilitem seu uso em determinada função.

Devido aos mais variados procedimentos aplicados na preparação e aperfeiçoamento da madeira nas indústrias madeireiras, alguns resíduos acabam sendo gerados. Segundo Silva, E. M. *et al.* (2017), parte desse material residual é resultado da manipulação da madeira através da usinagem com serras. Em uma serraria que trabalha exclusivamente com eucalipto, aproximadamente 78 toneladas de serragem são geradas mensalmente, onde grande parte desse material é simplesmente descartado (COUTO, 2009).

Os resíduos madeireiros gerados e descartados de maneira ambientalmente incorreta, acarretam em sérios riscos socioambientais, como a contaminação do ar, dos mananciais de água e dos solos, colocando em riscos à saúde das pessoas, além de desperdiçar matéria-prima e energia (RIUL; RIBEIRO, 2012).

De acordo com Lima e Silva (2005), os resíduos de madeira gerados por seu processamento podem se apresentar como matéria-prima alternativa para a

confeção de diversos outros produtos, gerando lucro para as empresas que os produzem e evitando ser um risco ao meio ambiente devido aos seus incorretos descartes na natureza.

Por essa razão, quando se possui um correto sistema de gerenciamento, os resíduos madeireiros podem trazer benefícios para toda a sociedade, tanto econômicos quanto ambientais (RAMOS *et al.*, 2017). A reutilização ou reciclagem são práticas de gerenciamento que podem e deveriam ser conduzidas por todas as empresas que acabam gerando esse material (LEEUWESTEIN; MONTEIRO, 2000). As principais e recomendadas alternativas para o emprego da reciclagem ou a reutilização dos resíduos de madeira são: compostagem, geração de energia, produção de painéis, fabricação de pequenos artefatos de madeira e utilização como condicionantes do solo (GOMES; SAMPAIO, 2004; RUIVO *et al.*, 2007; ZENID, 2009; MONTEIRO *et al.*, 2010; SZABÓ JUNIOR, 2010).

Nos últimos anos, segundo Rodrigues, C. R. (2019), muitos pesquisadores têm estudado a utilização de biomassa, empregando métodos sustentáveis, com o intuito de solucionar problemas, como a produção de energia limpa e a correta e segura destinação de resíduos sólidos.

A biomassa pode ser definida como toda matéria orgânica, seja de origem animal, vegetal ou microrganismos, suscetível a ser transformada em energia (bioenergia). Sua composição inclui diferentes tipos de células, cuja estrutura e composição variam com o material e a espécie (VIEIRA *et al.*, 2014).

Conforme Martins *et al.* (2007), a biomassa poder ser convertida termoquimicamente em atmosfera não oxidante por meio de pirólise, que constitui uma atraente alternativa para aproveitamento de resíduos agroflorestais, contribuindo para a minimização do impacto ambiental e, também, para a geração adicional de insumos químicos e energéticos de apreciável valor econômico.

Um dos produtos obtidos pelo processo de pirólise é o carvão, que possui uma estrutura carbonácea e porosa, além de apresentar pequena quantidade de heteroátomos, principalmente oxigênio, ligados aos átomos de carbono. É um material que contém área superficial específica e porosidade elevada, o que lhe agrega a capacidade de adsorver moléculas presentes tanto em fase líquida como gasosa (GORGULHO *et al.*, 2008). Devida a essa alta capacidade de adsorção, Schetino

Júnior *et al.* (2007) afirmam que seja possível a utilização do carvão na recuperação de produtos químicos, na remoção de compostos orgânicos e metais, na remoção de contaminantes presentes em meio aquoso, em processo de purificação, e até na desodorização do ar e tratamento de água.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Em muitos casos, em razão da falta de melhores formas de manuseio, os resíduos gerados por indústrias madeireiras, como serrarias e movelarias, é geralmente descartado no ambiente sem nenhuma forma de tratamento ou preocupação. Os principais métodos de descarte incluem o amontoamento em pilhas nas laterais dos moinhos, que geram desconforto estético, combustão ao ar livre, que ocasionam a poluição do ar, e a simples disposição do resíduo ao longo de estradas e corpos d'água, que causam impactos negativos tanto na qualidade do ar quanto na água pois esse material pode passar a ser ingerido pela população, oferecendo riscos à saúde pública, que podem desenvolver, por exemplo, problemas respiratórios (OHIMAIN, 2012). Diante dessa problemática, qual a possibilidade do uso do resíduo da indústria madeireira através do processo de pirólise para produção de carvão ativado?

1.2 JUSTIFICATIVA

A indústria madeireira é um dos pilares mais importantes da economia mundial. É um dos principais insumos de inúmeros segmentos econômicos, como a construção civil e a fabricação de móveis (VIDOR *et al.*, 2010). Além disso, desde a colonização pelos portugueses até a atualidade, a indústria madeireira possui uma grande representatividade na economia brasileira (NUNES; MELO; TEIXEIRA, 2012).

Por sua vez, essa indústria agrega um rendimento operacional baixo, ou seja, tem uma alta taxa de geração de resíduos, que se não forem dispostos ou aproveitados da melhor maneira possível, ocasionam problemas socioambientais sérios, como a contaminação de rios, solos e ar, além do desenvolvimento de problemas respiratórios e a proliferação de vetores de doenças que podem afetar a população ao redor dessas indústrias (RAMOS *et al.*, 2017).

Segundo Borges, Ciniglio e Brito (1993), 52,8% dos resíduos gerados no país, incluindo os resíduos industriais (madeireiras etc.) neste dado, não são gerenciados da forma adequada, pois muitas empresas não possuem um sistema otimizado de aproveitamento de resíduos, alegando que a relação custo/benefício não é justificada. Devido à inadequada destinação dos resíduos, várias consequências negativas são geradas além do desconforto. No âmbito social os resíduos se apresentam prejudiciais à saúde, já na esfera ambiental seu acúmulo pode impactar no bem estar do ecossistema, se enquadrando na constituição como fonte poluidora. (DUTRA; NASCIMENTO; NUMAZAWA, 2005).

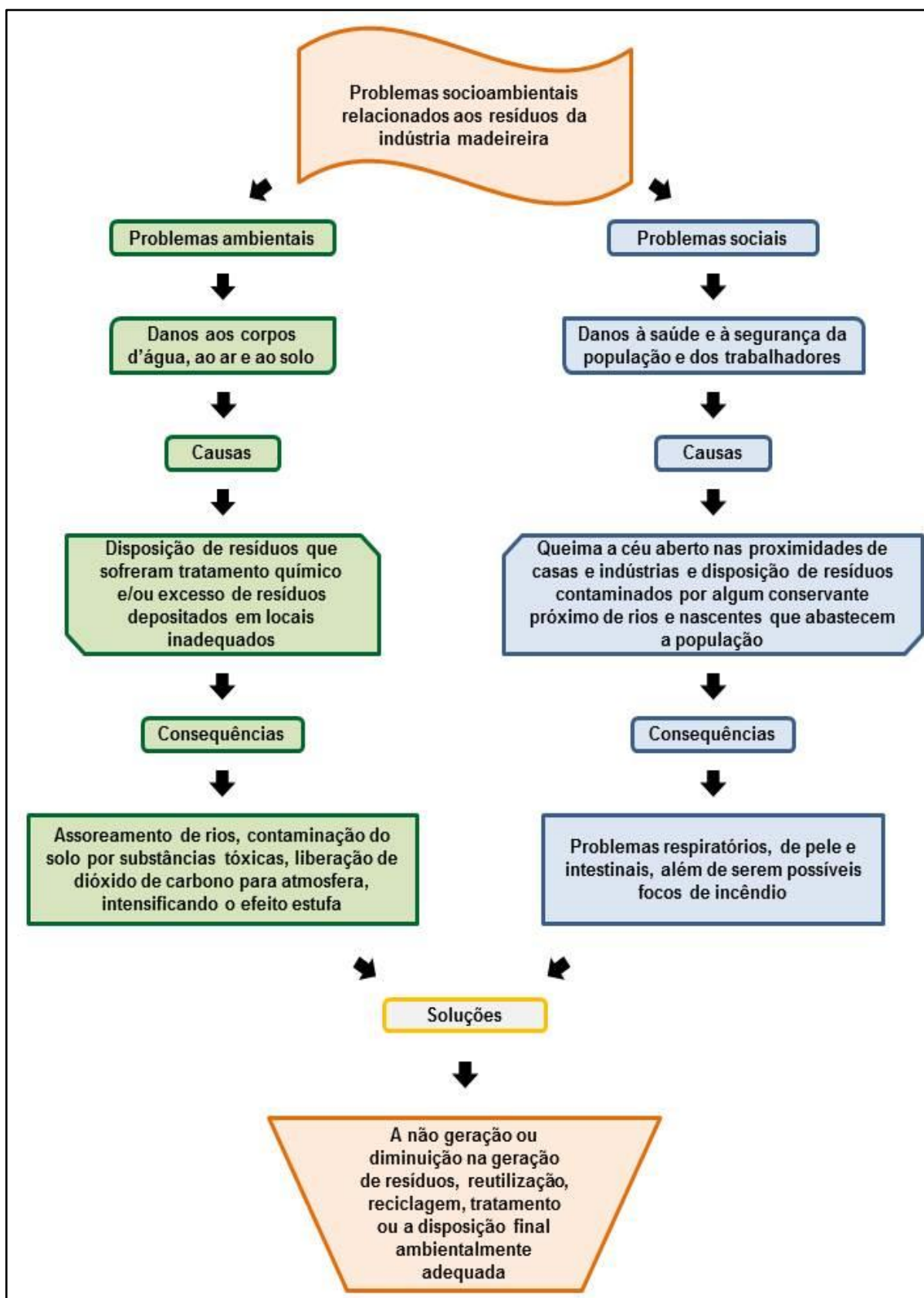
Uma das formas de diminuir a quantidade de resíduos de madeira é por meio da queima a céu aberto. Essa prática, por sua vez, ocasiona a emissão de CO₂ na atmosfera, o que contribui com a mudança climática do planeta por meio do aumento do efeito estufa, e desenvolve problemas de saúde de cunho respiratório, que afetam tanto trabalhadores como a comunidade nas proximidades dos focos de queima (FONTES, 1994; TUOTO, 2009).

Através do investimento em equipamentos mais eficientes, em mão de obra qualificada e no aproveitamento desses resíduos, diminuem-se os problemas causados à população e ao meio ambiente, além de proporcionar maior credibilidade ao setor madeireiro (RAMOS *et al.*, 2017).

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.

Conforme a Figura 1, é possível visualizar os problemas sociais e ambientais, seguidos das suas consequências, causados pela má destinação dos resíduos da indústria madeireira (RIM).

Figura 1 - Diagrama dos problemas socioambientais com suas causas e consequências



Fonte: Adaptado de Ramos *et al.* (2017).

Em razão de todas as consequências ocasionadas pelo não aproveitamento desse resíduo e pelo seu descarte inadequado, é que se buscou utilizar o resíduo da indústria madeireira para produção de carvão ativado através do processo de pirólise em reator de leito fixo.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Utilizar o resíduo da indústria madeireira para produção de carvão ativado através do processo de pirólise em reator de leito fixo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a biomassa a ser empregada nesta pesquisa;
- Pirolisar o resíduo da indústria madeireira (RIM) para obtenção de carvão;
- Realizar o processo de ativação física do carvão obtido pela pirólise;
- Caracterizar o carvão ativado resultante do processo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

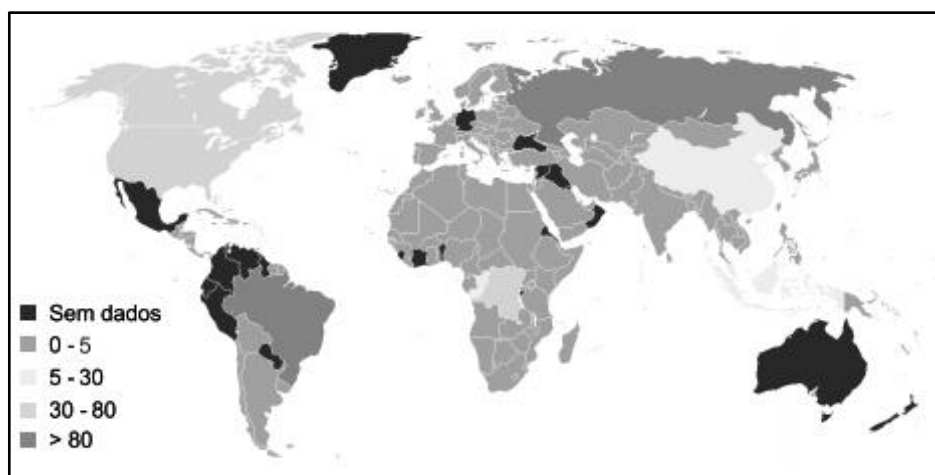
2.1 A MADEIRA NA HISTÓRIA

Desde os homens das cavernas a madeira é uma matéria prima bastante presente na história da humanidade. Segundo Lourenço e Branco (2012), para se proteger do clima e dos animais o homem buscou se abrigar primeiramente em cavernas e grutas, mas com o passar do tempo, buscou construir novas formas de habitação. Essas formas de habitação agregavam influências do ambiente ao seu redor, através da apropriação dos recursos naturais mais abundantes presentes nele, como por exemplo, a madeira.

No Brasil, no início de sua colonização pelos portugueses no século XVI, uma das principais atividades econômicas da época foi a extração da madeira popularmente conhecida como Pau Brasil. Os colonizadores passaram a extrair a madeira com o objetivo de fabricar móveis e realizar a pigmentação de tecidos, através da resina de cor avermelhada, bem característica do Pau Brasil, que poderia ser utilizada como corante (ROCHA; CAVALHEIRO; CONTI, 2004).

A arte e a técnica de trabalhar a madeira para produção dos mais variados objetos com as mais diversas finalidades começou assim que o homem surgiu, como um processo artesanal e primitivo, e que aos poucos evoluiu até chegar nos dias atuais, com enormes e sofisticadas indústrias de manipulação madeireira (LOURENÇO; BRANCO, 2012).

Figura 2 - Volume de madeira no mundo em 2005 (em bilhões de m³)



Fonte: Vidal e Hora (2011). Adaptado de FAO (2008).

A Figura 2 ilustra o volume de madeira no mundo em 2005, onde a Rússia e o Brasil são os únicos a terem mais de 80 bilhões de metros cúbicos de madeira.

2.2 O BIOMA AMAZÔNIA E A AMAZÔNIA LEGAL

Segundo o site do Ministério do Meio Ambiente, o maior bioma do Brasil é a Amazônia. Esse bioma é caracterizado por aproximadamente 4 milhões de metros quadrados de cobertura florestal só no Brasil, representando cerca de 49% do território brasileiro. A Amazônia Legal, além de incluir todo o Bioma Amazônia, engloba áreas de cerrado e campos naturais, como também se expande em 5 milhões de quilômetros quadrados, chegando à uma estimativa de 59% do território brasileiro (PEREIRA *et al.*, 2010).

A Figura 3, mostra os limites da Amazônia Legal incluindo os estados que pertencem à ela, além do bioma amazônia e sua participação nos países que fazem divisa com o Brasil.

Figura 3 - Amazônia Legal e bioma amazônia



Fonte: Pereira *et al.* (2010).

Segundo Veríssimo, Lima e Lentini (2002) as fronteiras de exploração madeireira podem ser classificadas em razão das tipologias florestais, idade da fronteira, estágio da ocupação, tipo de transporte e as condições de acesso.

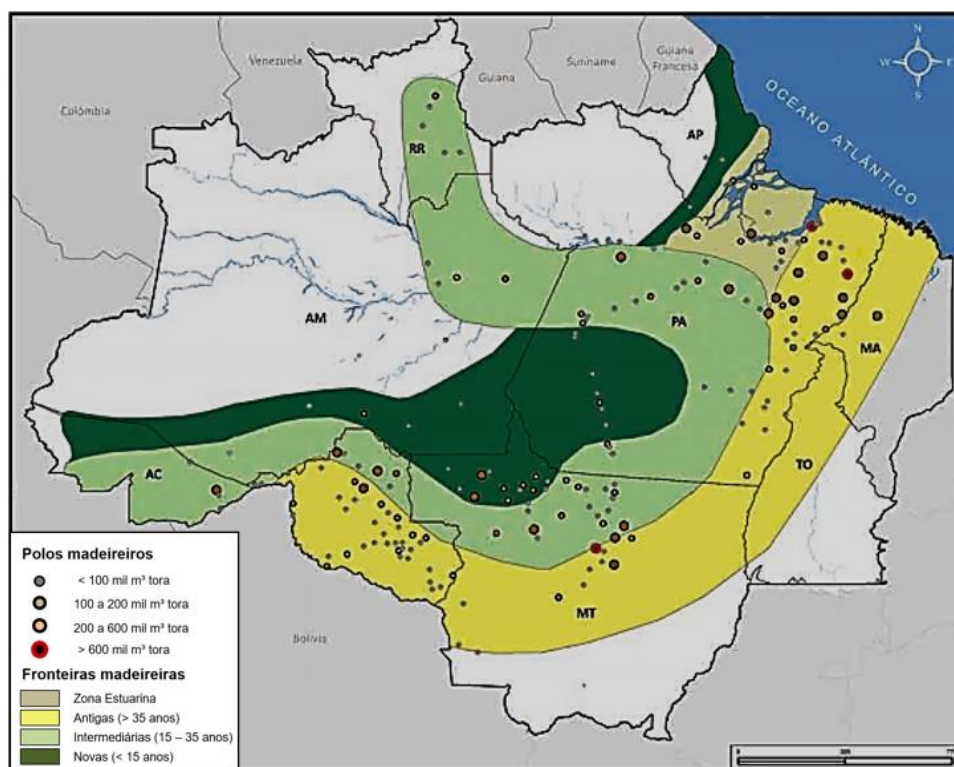
Existem 4 tipos de fronteiras na região, a Antiga, que são as que possuem mais de 30 anos e ficam localizadas ao sul e a leste da Amazônia, a Intermediária, que possui entre 10 e 30 anos, a Nova, que conta com menos de 10 anos e a Estuarina, onde a exploração madeireira ocorre de forma seletiva e esporádica desde o século XVII (PEREIRA *et al.*, 2010). Essas fronteiras podem ser listadas e visualizadas de acordo com o Tabela 1 e a Figura 4.

Tabela 1 - Fronteiras madeireiras na Amazônia Legal em 2009

Fronteiras madeireiras	Idade da fronteira	Tipo de floresta	Principais polos
Antiga	Acima de 30 anos	Aberta, de transição (sul) e densa (norte)	Sinop e Feliz Natal (MT), Paragominas e Tailândia (PA)
Intermediária	Entre 10 e 30 anos	Aberta (sul) e densa (norte)	Cláudia e Marcelândia (MT), Cujubim e Machadinho do Oeste (RO), Rio Branco (AC)
Nova	Menos de 10 anos	Densa	Castelo de Sonho (PA), Aripuanã e Colniza (MT)
Estuarina	Acima de 300 anos	Floresta de várzea	Belém, Breves e Portel (PA)

Fonte: Adaptado de Pereira *et al.* (2010).

Figura 4 - Fronteiras e polos madeireiros na Amazônia Legal em 2009



Fonte: Pereira *et al.* (2010).

Segundo Pereira *et al.* (2010), no ano de 2009 foram extraídos 14,2 milhões de metros cúbicos de madeira em tora na totalidade dos 71 polos processadores de madeira da Amazônia Legal. Com um rendimento de aproximadamente 41%, a quantidade de madeira extraída acarretou em uma produção de 5,8 milhões de metros cúbicos de madeira processada, do tipo madeira serrada, laminados, compensados e madeira beneficiada (na forma de portas, janelas, pisos, forros etc.).

Na Tabela 2 é possível observar a porcentagem de participação correspondente à cada uma das tipologias de madeira processada no ano de 2009.

Tabela 2 - Produção de madeira processada da Amazônia Legal em 2009

Estado	Produção processada total (milhares de m ³)	Produção Processada (%)			Rendimento do processamento (%)
		Madeira serrada	Produtos beneficiados	Laminados e compensados	
Acre	193	23	22	55	45,7
Amapá	41	88	12	-	43,6
Amazonas	144	86	14	-	39,2
Maranhão	90	85	-	15	35,4
Mato Grosso	1.795	67	21	12	44,8
Pará	2.550	80	8	12	38,6
Rondônia	925	64	23	13	41,7
Roraima	70	68	20	12	37,2
Amazônia Legal	5.808	72	15	13	41,1

Fonte: Adaptado de Pereira *et al.* (2010)

2.3 RESÍDUOS DA INDÚSTRIA MADEIREIRA

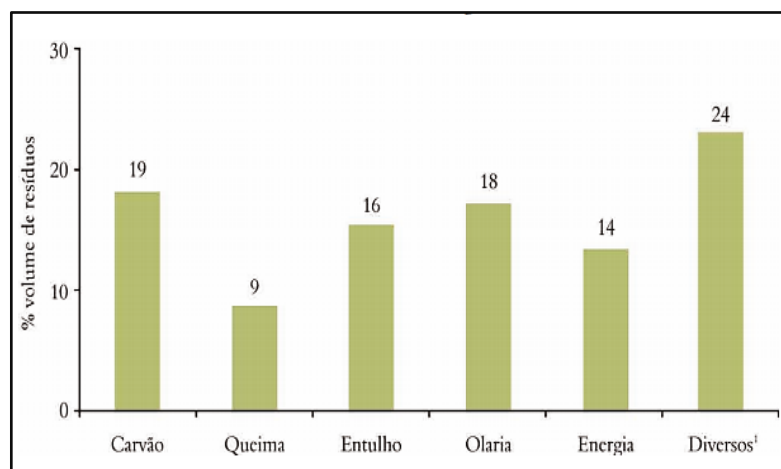
De acordo com Silva, C. P. *et al.* (2017), a industrialização da madeira resulta na geração de resíduos, que por sua vez, carecem de tratamento específico para que não sejam descartados de forma incorreta e não proporcione prejuízos ambientais significativos, como por exemplo, a emissão de gás carbônico na atmosfera como consequência de queima a céu aberto.

2.3.1 Geração De Resíduos Na Amazônia Legal

Na Amazônia Legal, no ano de 2009, 8,3 milhões de metros cúbicos de madeira em tora não foram aproveitados diretamente pela indústria madeireira. Desse total, uma parte foi utilizada na conversão em carvão vegetal, outra parte foi utilizada na fabricação de tijolos e telhas de barro em olarias, outra na cogeração de energia (no processamento de madeira ou para uso em estufas de secagem) e outra parte foi aproveitada de diversas formas em aterros (como adubo, lenha, entre outros), e os resíduos que não foram aproveitados acabaram sendo queimados ou abandonados como entulho (PEREIRA *et al.*, 2010).

Na Figura 5, é possível visualizar a porcentagem do volume de resíduo que não foi aproveitado diretamente pela indústria madeireira e seus principais usos na Amazônia Legal em 2009.

Figura 5 - Principais usos do resíduos de madeira em indústrias madeireiras da Amazônia Legal em 2009



Fonte: Pereira *et al.* (2010). Adaptado de SFB e Imazon (2010).

Como visto na Figura 5 acima, apesar de uma parte desse resíduo ser aproveitado de algumas formas, uma quantidade considerável ainda é desperdiçada e abandonada como entulho.

2.3.2 Geração De Resíduos Da Indústria Madeireira No Tocantins

O estado do Tocantins é um dos estados que estão inseridos na Amazônia Legal e que faz divisa com estados em que a extração de madeiras contribui com a economia regional, como é o caso da região do Pará, que por ter uma quantidade

significativa de serrarias, produz resíduos que muitas vezes tem pouca utilização ou simplesmente são descarregados no meio ambiente. (SILVA, E. M. *et al.*, 2017).

A comercialização de madeira como matéria prima e de móveis também é comum em diversas cidades do estado, como por exemplo, Gurupi, onde Silva, C. P. *et al.* (2017) realizou um levantamento a cerca dos resíduos gerados por indústrias madeireiras da região.

A pesquisa realizada por Silva, C. P. *et al.* (2017) consistiu em selecionar empresas do setor moveleiro de porte distintos e coletar dados semanalmente dos resíduos produzidos durante os meses de julho a outubro de 2012. As empresas selecionadas foram uma empresa de grande porte, caracterizada por possuir mais de 10 funcionários, uma de médio, que possuía o número de funcionários entre 3 e 10, e uma de pequeno porte, com menos de 3 funcionários, além de uma fábrica de esquadrias, que poderia ser considerada como de grande porte mas foi classificada separadamente.

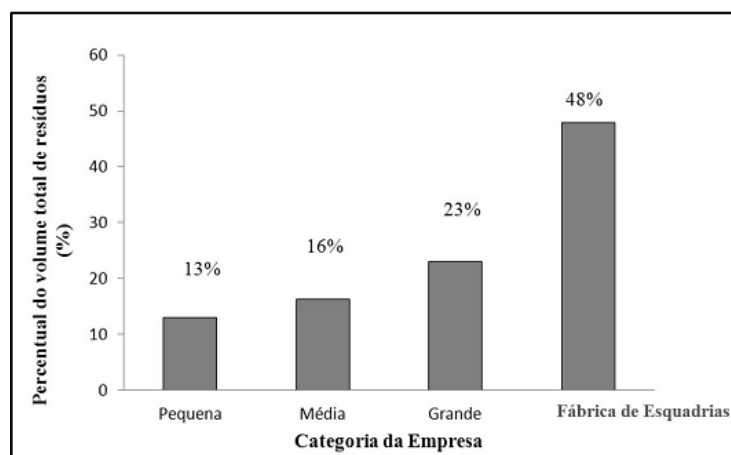
Com base nos dados coletados por Silva, C. P. *et al.* (2017), observou-se que a maior parte da geração de resíduos de madeira ocorreu na fábrica de esquadrias, contabilizando 32,23 metros cúbicos de resíduo, que por sua vez, foram equivalentes à 48% do total quantificado em um mês, em relação às demais empresas estudadas, conforme pode ser visto na Tabela 3 e na Figura 6.

Tabela 3 - Relação entre categoria e quantidade de resíduo e porte das empresas

Categoria de resíduo	Pequena V (m³)	Média V (m³)	Grande V (m³)	Fábrica de esquadrias V (m³)
Aparas	0,0784	0,3798	0,6192	1,3677
Recortes	0,0113	0,1714	0,3262	0,5254
Pó de serra	2,8000	3,4000	5,3000	9,6535
Serragem	5,8000	7,0000	9,2000	20,6860
Total	8,6897	10,9512	15,4454	32,2326

Fonte: Adaptado de Silva, C. P. *et al.* (2017).

Figura 6 - Volume total por tipo de resíduo das empresas avaliadas em Gurupi – TO no ano de 2012

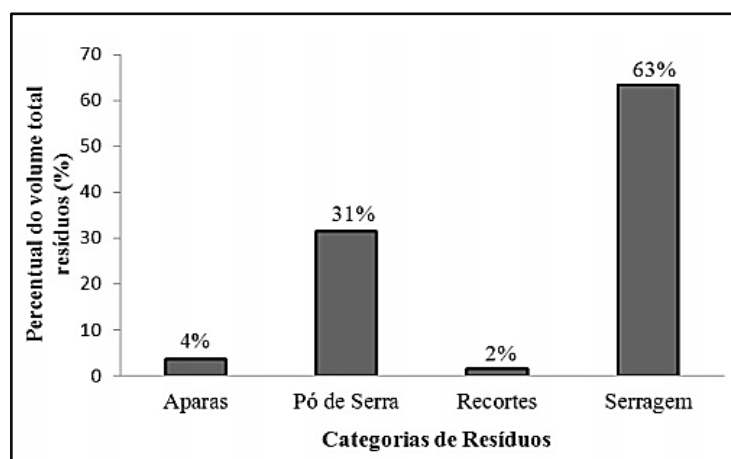


Fonte: Silva, C. P. et al. (2017)

A identificação dos resíduos adotada por Silva, C. P. et al. (2017), foi obtida com base no tamanho e forma dos resíduos sólidos. A classificação foi de acordo com Fontes (1994) e IBDF (1988), com adaptações: aparas foram desmembradas de recortes em função do tamanho do material de pesquisa. Aparas foram identificadas como peças menores que 10 cm de largura, recortes, como peças maiores que 10 cm de largura, serragem como madeira particulada (maravalha) e pó de serra como madeira em pó.

Ainda segundo Silva, C. P. et al. (2017), as categorias de resíduos que obtiveram o maior percentual em todas as empresas, foram a serragem e o pó de serra, tendo valores de 63% e 31% respectivamente, podendo ser visto através da Figura 7.

Figura 7 - Percentual e categorias de resíduos de madeira



Fonte: Silva, C. P. et al. (2017)

De acordo com Lima *et al.* (2004), citado por Vieira (2006), é importante considerar que o rendimento da madeira na fabricação de móveis, gira em torno de 6%. Ou seja, aproximadamente 94% do volume de uma tora bruta de madeira não se transforma em móveis e é descartado como resíduo.

A geração de resíduos sólidos e a fabricação de móveis sempre foram duas práticas que estiveram interligadas, em especial pelo processo de beneficiamento da madeira, que gera uma grande quantidade de serragem e pó de serra (KOZAK *et al.*, 2008).

Os melhores índices de rendimento de toras de madeira serrada, segundo pesquisas, estão situadas entre 35% a 55%, o que explica o estudo de possibilidades para o aproveitamento desses resíduos em outros processos ou produtos (FAGUNDES, 2003).

Segundo Rodrigues, T. O. (2013), um dos diversos resíduos gerados nas serrarias, e pouco aproveitada por ser de granulometria pequena, é a serragem, havendo a necessidade de se ter e criar tecnologias adequadas para possibilitar uma otimização do uso deste resíduo e evitar riscos ambientais como consequência do seu descarte no meio ambiente.

2.4 UTILIDADES PARA O RIM

Como forma de reduzir os problemas ocasionados pela remoção inadequada dos resíduos, é possível utilizá-los em alternativas racionais como cama de forração em aviários, revestimento de jardins e vasos de planta, geração de energia, compostagem e artesanato (FAGUNDES, 2003).

De acordo com Silva, E. M. *et al.* (2017), além das finalidades citadas acima, o resíduo proveniente de serragens pode ser aplicado na obtenção de bio-óleo e na produção do material que é objeto de estudo deste trabalho, o carvão ativado.

Pesquisas elaboradas por Couto (2009), Valcarenghi e Ribeiro (2013) e Nobre (2015) apontam para a capacidade de otimização do uso do RIM, a exemplo da serragem, para produção de carvão ativado. Além de afirmarem que existe não só o potencial de se utilizar a serragem como biomassa para produção de carvão ativado, como também apresentam resultados interessantes.

2.4.1 Biomassa De Madeira

Segundo Demiral e Şensöz (2006), a biomassa é o biocombustível mais valioso para produção de energia, uma vez que é neutro e biodegradável por natureza, além de ser abundantemente disponível, com produção anual de 1011 a 1012 toneladas na área terrestre do mundo, e não ser tóxico. A biomassa possui vários benefícios econômicos, sociais e ambientais (KAFFKA *et al.*, 2006). Esse material tem capacidade de produzir também combustíveis na forma de líquidos, sólidos e gases.

A serragem de madeira é uma biomassa constituída pelo resíduo industrial produzido por unidades de processamento de madeira e outras indústrias de móveis (DUANGUPPAMA *et al.*, 2016). A serragem é gerada através do corte, dimensionamento, re-serragem, afiação, aparas e alisamento da madeira. Segundo Varma e Mondal (2016), o processamento de 100 kg de madeira em uma serraria produz cerca de 12 a 25 kg de serragem. Na Índia, produz-se anualmente cerca de 20 megatoneladas de resíduos de madeira da construção (MADURWAR; RALEGAONKAR; MANDAVGANE, 2013).

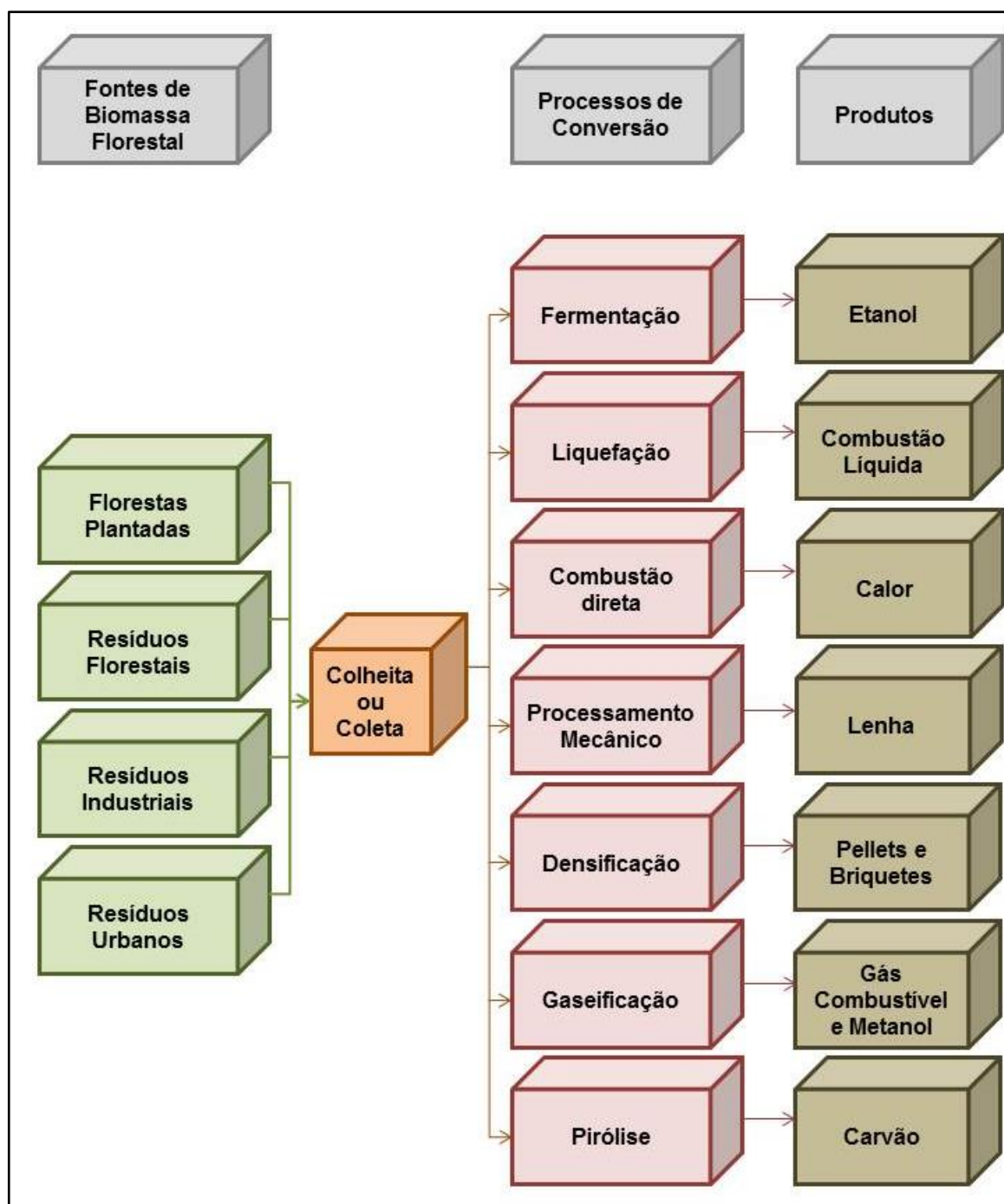
De acordo com Vidal e Hora (2011), pode ser considerada biomassa todo material orgânico, não fóssil, que tenha em seu interior conteúdo de energia química, o que agrega todos os tipos de vegetações (aquáticas ou terrestres), árvores, biomassa virgem, lixo orgânico, resíduos de agricultura, esterco de animais e outros tipos de restos industriais. Além disso, a biomassa de madeira pode incluir todo o material da árvore: tronco, ramos, folhas, casca e raízes.

2.4.2 Conversão Energética

A biomassa residual gerada pelos processos de manipulação da madeira pode ser usada para transformar sua energia interna em formas utilizáveis de energia através de processos de conversão térmica. A transformação energética da biomassa está baseada nos processos físicos, químicos, termoquímicos e biológicos (VIDAL; HORA, 2011).

A Figura 8 apresenta os possíveis processos de conversão energética da biomassa e seus principais produtos, incluindo não somente energia, mas também açúcares fermentáveis e os carburantes líquidos.

Figura 8 - Processo de conversão de biomassa e seus produtos



Fonte: Adaptado de Vidal e Hora (2011).

2.4.2.1 Fermentação

Vidal e Hora (2011) definem a fermentação como processo biológico anaeróbio em que, por meio da ação de micro-organismos, os açúcares são convertidos em álcool. Em termos energéticos, o produto final após processo é composto por etanol e metanol, sendo utilizado como combustível (puro ou adicionado à gasolina) em motores a combustão.

2.4.2.2 Liquefação

Conversão da biomassa em produtos majoritariamente líquidos, sobre a ação de pressão e temperaturas entre 400 °C e 600 °C. A liquefação pode ser realizada de modo direto, através de atmosfera redutora de hidrogênio ou mistura de hidrogênio e monóxido de carbono, ou de modo indireto, através da gaseificação com catalisador, tendo como resultado, o metanol (VIDAL; HORA, 2011).

2.4.2.3 Combustão Direta

De acordo com Varma *et al.* (2019), a combustão é um processo simples de decomposição térmica que gera calor para produção de energia. No entanto, não é um processo confiável de acordo com o ponto de vista ambiental, pois gera alto teor de dióxido de carbono e outros gases nocivos, além da eficiência térmica desse processo também ser baixa.

2.4.2.4 Processamento Mecânico

Processamento mecânico é o método mais simples e o mais antigo entre os que foram apresentados. Consiste na manipulação da madeira através do corte ou no trituração da mesma, com a manutenção de sua forma bruta (VIDAL; HORA, 2011).

2.4.2.5 Densificação

Ainda segundo Vidal e Hora (2011), o processo de densificação de biomassa é caracterizado pela aplicação de pressão a uma massa de partículas com ou sem a adição de ligantes ou tratamento térmico. No caso de densificação de biomassa de madeira, geralmente não é necessária a adição de ligantes devido à presença da lignina. Esse processo pode ser feito com toras de madeira, entretanto é mais amplamente utilizado com resíduos industriais, que são menores e estão livres de casca.

2.4.2.6 Gaseificação

É um procedimento de transformação de combustíveis líquidos e sólidos em material gasoso através de processos termoquímicos com oxidação parcial e

temperaturas elevadas (LORA *et al.*, 2012). Segundo Warnecke (2000), a gaseificação pode ser considerada como um processo termoquímico localizado em uma região paramétrica entre a combustão e a pirólise.

De acordo com Kumar *et al.* (2008), apesar de requerer um alto custo de investimento, a gaseificação é um processo muito eficiente e produz gás de síntese ($\text{CO} + \text{H}_2$). O gás obtido tem vários usos práticos, como o emprego na queima de motores à combustão interna e turbina a gás, e na geração direta de calor. Além disso, pode ser usado como matéria-prima na geração de combustíveis sintéticos, como diesel, gasolina, metanol, etanol, amônia e hidrogênio (VIDAL; HORA, 2011).

2.4.3 Pirólise

A pirólise é um procedimento em que se aplica calor, sem a presença de oxidante, em uma substância ou material, gerando sua degradação termoquímica. Desse modo, a pirólise é um processo em que absorve calor (endotérmico) e que precisa de uma fonte externa de energia (calor) para seu desenvolvimento (LORA *et al.*, 2012).

De acordo com Klass (1998), a pirólise de biomassa pode ser considerada como a decomposição térmica direta dos componentes orgânicos, em ausência parcial ou total de oxigênio, para gerar uma série de derivados líquidos, sólidos e gases combustíveis.

A pirólise pode ser descrita como um processo físico-químico no qual uma biomassa, em uma atmosfera não oxidante, aquecida a temperaturas relativamente baixas (500 a 800 °C) dá lugar à formação de um resíduo sólido rico em carbono, que é o carvão, e uma fração volátil composta de gases e vapores orgânicos condensáveis (BRIDGWATER *et al.*, 2008).

Por sua vez, Jahirul *et al.* (2012) descrevem a pirólise como um procedimento que envolve a decomposição térmica de polímeros orgânicos, que liberam vapores de vários compostos de baixo peso molecular, resultando em um resíduo sólido rico em carbono, conhecido como bio-carvão ou carvão.

Segundo Bridgwater (2003), a pirólise é um processo atrativo, pois possui uma operação simplificada além de um custo reduzido. Nos últimos anos, o processo de

pirólise tem recebido bastante atenção, pois produz energia tanto na forma sólida, quanto nas formas líquidas e gasosas da biomassa (BARTOCCI *et al.*, 2018; YANG *et al.*, 2006).

É estimado que o produto resultante do processo de pirólise tenha em um âmbito energético, o dobro da densidade do material de origem, o que possibilita seu uso em temperaturas muito mais elevadas. A quantidade de lenha possui uma relação com o carvão obtido, que varia de acordo com as características do processo e o teor de umidade do material de origem. Para a produção de uma tonelada de carvão, geralmente são necessárias de quatro a dez toneladas de lenha (VIDAL; HORA, 2011).

De acordo com Miranda (2017) e a Figura 9, é possível visualizar que o processo de pirólise, em razão da taxa de reação, pode ser dividido em dois segmentos (grupos) principais: a pirólise rápida e a pirólise lenta. A pirólise rápida acontece com taxas de aquecimento extremamente altas para proporcionar uma maior produção de gases e/ou líquidos. Por outro lado, quando as taxas de aquecimento são muito baixas, o processo fica caracterizado como pirólise lenta.

2.4.3.1 Pirólise Lenta

Segundo Miranda (2017), esse processo é caracterizado pela lenta degradação térmica dos componentes da biomassa, sendo sua maioria polímeros, na ausência de oxigênio. Esse tipo de pirólise, tradicionalmente vem sendo usada para a produção de carvão vegetal, mas vários estudos detalhados sobre a pirólise de biomassa, a partir dos anos 1970, têm levado a proporção desejada dos produtos obtidos através do controle das variáveis (STEVENS, 1994).

Nos mecanismos de reações da pirólise a baixa velocidade de aquecimento, Miranda (2017) distingue a seguinte sequência de fenômenos:

- A cerca de 160 °C acontece a eliminação de quase toda umidade;
- Entre 200 °C e 280 °C grande parte das hemiceluloses são decompostas, gerando predominantemente produtos voláteis (CO, CO₂ e vapores condensáveis);

- Na faixa de 280 a 500 °C, a celulose se decompõe a uma velocidade maior, atingindo um máximo em torno dos 320 °C.

Nessa faixa de temperatura, a lignina, após ter sofrido mudanças em sua estrutura, começa a emitir quantidades significativas de vapores condensáveis a temperaturas superiores a 320 °C (SÁNCHEZ, 2003).

Tabela 4 - Processos internos da pirólise de acordo com a temperatura

Processos	Temperatura (°C)	Hidrogênio (mol %)	Óxido de carbono (mol %)	Dióxido de Carbono (mol %)	Hidrocarbonetos (mol %)
Eliminação da água	155-200	0	30,5	68	2
Evolução dos óxidos de carbono	200-280	0,2	30,5	66,5	3,3
Evolução dos hidrocarbonetos	380-500	7,5	12,3	31,5	48,7
Dissociação	500-700	48,7	24,5	12,2	20,4
Evolução do hidrogênio	700-900	80,7	9,6	0,4	8,7

Fonte: Adaptado de Nikitin *et al.* (1962), citado por Klass (1998).

A Tabela 4 apresenta a variação dos produtos da pirólise em função do aumento da temperatura, pois durante o processo, várias reações acontecem, resultando em produtos como água, óxidos de carbono, outros gases, carvão, compostos orgânicos (que têm um peso molecular médio inferior aos precursores imediatos), alcatrões e polímeros e hidrogênio. Além disso, quando a celulose é aquecida entre 250 °C a 270 °C, a mesma produz uma grande quantidade de gás, que basicamente consiste em dióxido de carbono e monóxido de carbono (MIRANDA, 2017).

2.4.3.2 Pirólise Rápida

Segundo Goyal *et al.* (2008), os principais pontos do processo de pirólise rápida são os tempos de aquecimento das partículas e de residência curtos, para os vapores que se formam no interior do reator, altas taxas de aquecimento, elevados coeficientes

de transferência de calor e massa, e temperaturas moderadas da fonte de aquecimento.

Assim que a biomassa entra em contato com os gás, a mesma é aquecida até que a pressão de vapor dos voláteis presentes nela é alcançada, criando-se um fluxo de voláteis na direção radial de encontro à superfície da partícula (MIRANDA, 2017).

De acordo com Bridgwater e Bridge (1991), a pirólise rápida aliada à temperaturas moderadas pode proporcionar até 70%, em peso, de rendimento de produtos líquidos.

Segundo Samaniego (2007), a pirólise rápida objetiva gerar consideráveis quantidades de líquidos nos produtos. Em relação às variáveis que participam do processo, a pirólise rápida apresenta-se com diferenças marcantes em relação a outros processos de pirólise, como por exemplo, o processo de carbonização, que é conduzido especificamente para a produção de carvão vegetal (GÓMEZ, 2002).

Na Tabela 5, é possível ilustrar os parâmetros operacionais dos processos de pirólise com os principais produtos, tendo o tempo e a temperatura como os parâmetros com maior influência na distribuição e no rendimento do produto.

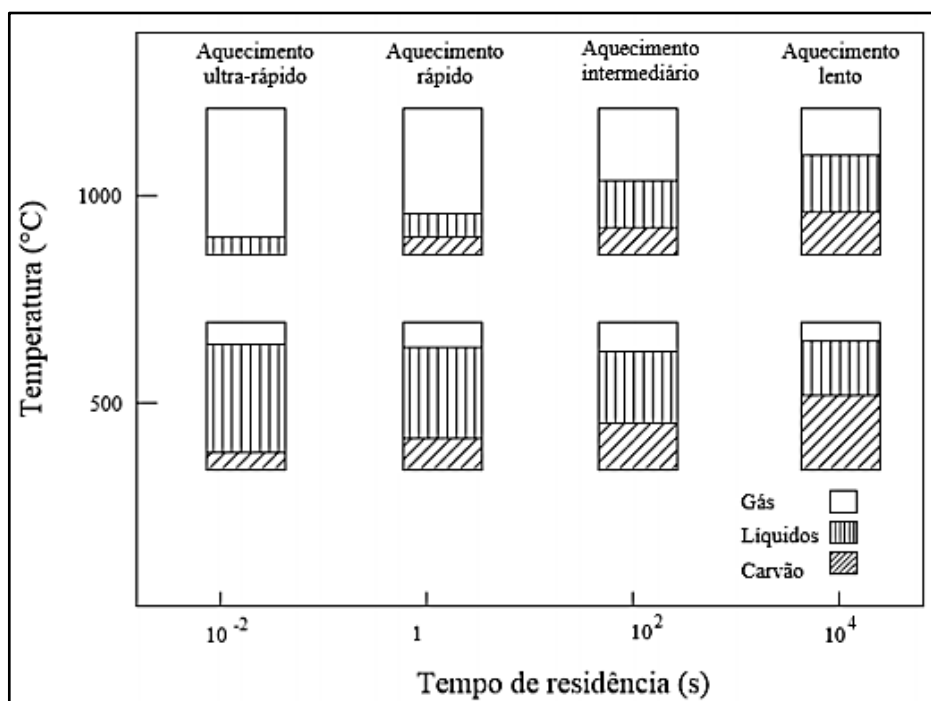
Tabela 5 - Parâmetros operacionais dos processos de pirólise e principais produtos

Tipo	Temperatura de operação (°C)	Taxa de aquecimento (°C/s)	Tempo de residência do sólido (s)	Tamanho da partícula (mm)	Produtos Obtidos
Lenta (Convencional)	300 - 700	0,1 - 1	600 - 6000	5,0 - 50	Bio-óleo, carvão e gás
Rápida	600 - 1000	> 10	0 - 10	< 0,5	Bio-óleo e gás

Fonte: Adaptado de Balat *et al.* (2009).

A Figura 9 mostra o efeito da temperatura e do tempo de residência na proporção das diferentes frações geradas durante a pirólise, pois quando a pirólise se dá com o aumento muito rápido da temperatura, as reações químicas facilitam a formação de frações voláteis, que são gás e líquidos. Em contrapartida, quando o aquecimento acontece de forma gradual, as reações favorecem a geração de frações sólidas, ou seja, carvão vegetal (MIRANDA, 2017).

Figura 9 - Distribuição das frações sólidas, líquidas e gasosas em função da taxa de aquecimento, tempo de residência e temperatura de processamento



Fonte: Mezerette e Girard (1991), *apud* Cortez e Lora (2006).

2.5 PESQUISAS COM CARVÃO ATIVADO A PARTIR DO RIM

Cardoso (2004), estudou o processo de pirólise lenta de serragem de eucalipto como processo térmico, alternativo, de tratamento de resíduos sólidos, para obtenção de produtos gasosos, sólidos e líquidos. O processo desenvolvido apresentou-se de maneira eficiente, gerando duas frações de grande interesse industrial, o bio-óleo e o carvão. Além disso, o carvão mesmo não tendo sido ativado, demonstrou apreciável capacidade de adsorção.

Martins *et al.* (2007), conduziu os experimentos de pirólise de serragem de eucalipto (*Eucalyptus grandis*, madeira local) à baixa temperatura, em condições definidas, em reator de leito fixo (Forno bipartido tubular Maitec FT-1200/BI), em atmosfera inerte (fluxo mínimo de nitrogênio), segundo programa de temperatura desenvolvido para maximizar a produção de bio-óleo e resíduo sólido. O carvão residual, assim obtido, de estrutura amorfa, constitui um sólido de baixa porosidade, com predominância de meso e macroporosidade, além de apresentar capacidade calorífica comparável à dos demais carvões de origem vegetal.

Antunes *et al.* (2010), avaliou o potencial de serragens da madeira de maçaranduba para serem utilizadas como precursoras na preparação de carvão ativado (CA), utilizando-se a ativação física (CO_2). Os resíduos apresentaram alto rendimento por granulometria, indicando grande quantidade de material a ser utilizado para a preparação de carvão vegetal, para posteriormente ser transformado em carvão ativado, podendo ser aproveitados os materiais nas peneiras com aberturas de 0,420, 0,250 e 0,49 mm. O carvão vegetal apresentou alto rendimento gravimétrico, o que significa uma maior quantidade de material precursor a ser utilizado na ativação. Além disso, o carvão ativado apresentou alta capacidade de adsorção dos compostos azul de metileno e fenol, além de grupos ácidos na sua superfície.

Linhares, Marcílio e Melo (2016), objetivaram estudar a viabilidade do uso de resíduo da casca de acácia negra (RCAN) gerado na extração do tanino, para a produção de carvão ativado. A partir dos resultados obtidos, pôde-se constatar que o resíduo de casca de acácia negra (RCAN) tem as características necessárias para ser usado como matéria prima viável para a produção de carvão ativado.

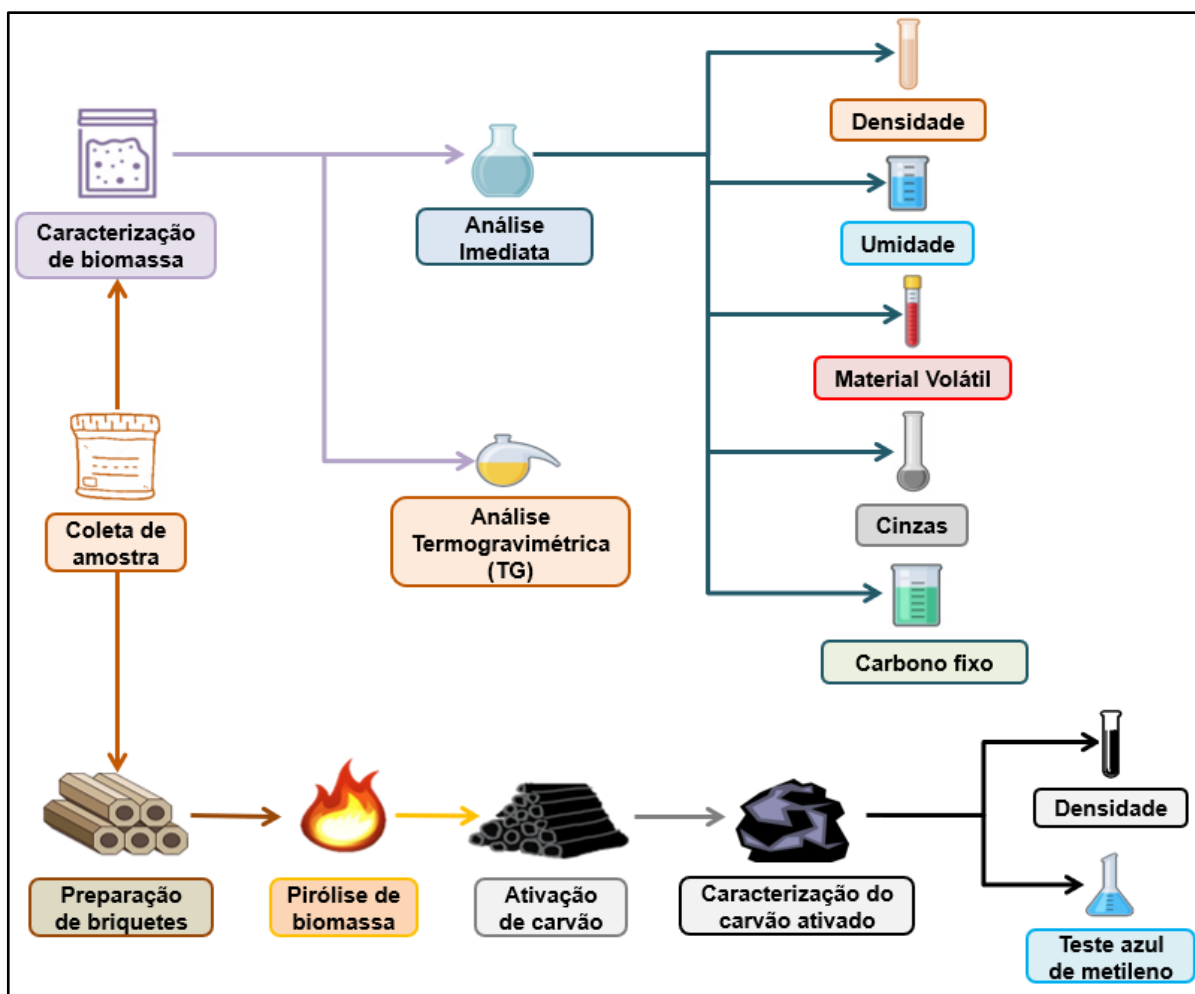
Borges, W. M. S. *et al.* (2016), Carvões ativados em forma de briquetes foram preparados a partir do resíduo da madeira de candeia, gerado no processo de extração do óleo α -bisabolol. O material foi briquetado, carbonizado e ativado com CO_2 , variando-se a temperatura (700 – 900 °C) e o tempo de ativação (1 – 3 horas). Os resultados mostraram que, com o aumento da temperatura e do tempo de ativação, ocorre aumento da área superficial, do volume de poros, da basicidade do carvão e da capacidade de adsorção de azul de metileno e de fenol. O carvão ativado de briquete mostrou ser um bom adsorvente para azul de metileno e fenol, adsorvendo 73% de fenol e 23% de azul de metileno em concentrações de 1.000 mg/L em ensaio do tipo batelada.

Silva, E. M. *et al.* (2017), caracterizou o carvão de serragem obtido por pirólise através das análises de cinética de secagem, densidade aparente, análise imediata e de adsorção. A partir dos resultados parciais encontrados para o carvão de serragem, concluiu-se que nas análises imediatas os resultados foram satisfatórios, pois o baixo teor de cinzas indicou que há poucos minerais na biomassa, fator importante a ser considerado na produção de carvão ativado.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia utilizada nesta pesquisa foi baseada no diagrama esquemático, Figura 10, das principais atividades do trabalho experimental.

Figura 10 - Diagrama dos procedimentos metodológicos abordados neste trabalho



Fonte: Autor (2020).

3.1 COLETA E PREPARO DA AMOSTRA

O material adotado e estudado neste trabalho foi o resíduo da indústria madeireira (RIM). Este material foi fornecido pela empresa Madeireira Capital no município de Palmas – TO, e foi resultado da manipulação da madeira para o emprego na construção civil e no setor moveleiro.

O RIM foi encontrado de diversas formas e granulometrias no pátio da empresa, que possuía as aparas e maravalhas, que podem ser vistas na Figura 11, a serragem

(pó médio), representada na Figura 12 e Figura 13, e pó de serra (pó fino), visto na Figura 14 e Figura 15.

Figura 11 – Aparas e maravalhas de madeira



Fonte: Autor (2020).

Figura 12 - Compartimento e pilha de pó médio (serragem)



Fonte: Autor (2020).

Figura 13 - Coleta de serragem (pó médio)



Fonte: Autor (2020).

Figura 14 - Disposição do pó de serra (pó fino)



Fonte: Autor (2020).

Figura 15 - Coleta de pó de serra (pó fino)

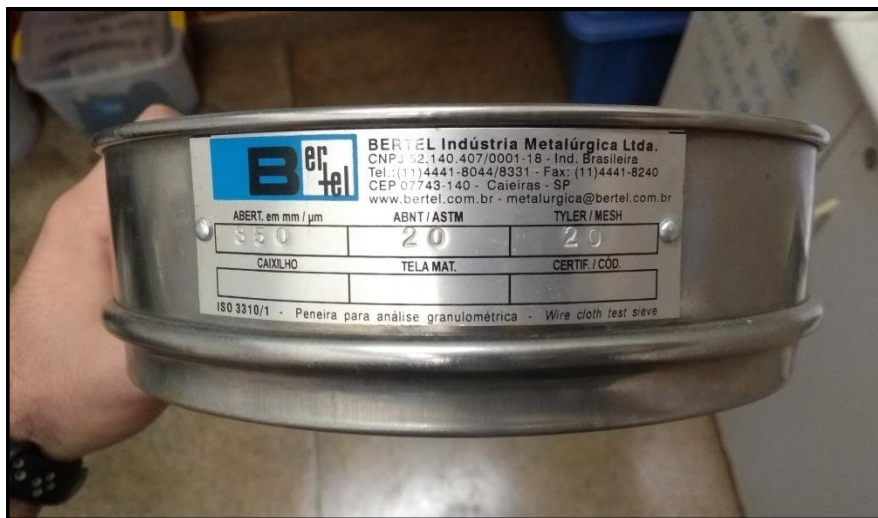


Fonte: Autor (2020).

Em razão da granulometria do pó de serra ter se apresentado como a menor dentre os resíduos, optou-se por trabalhar com ela, pois o preparo da amostra para a fabricação de briquetes se tornou mais simples, já que as etapas de triturar ou moer não foram necessárias.

Como meio de remover possíveis sujeiras superficiais e tornar a amostra mais homogênea, como demonstrada na Figura 17, o material coletado foi passado pela peneira ABNT/ASTM de número de 20, com granulometria de 850 μ m, representada pela Figura 16.

Figura 16 - Peneira para remoção de sujeiras superficiais



Fonte: Autor (2020).

Figura 17 - Pó de serra peneirado



Fonte: Autor (2020).

3.2 PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS EMPREGADOS NA CARACTERIZAÇÃO DE BIOMASSA DE RIM

3.2.1 Análise Imediata da Biomassa

As análises imediatas do resíduo da indústria madeireira (RIM), foram realizadas no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) do Instituto Federal do Tocantins (IFTO), Campus Palmas.

3.2.1.1 Densidade Aparente

Baseando-se na metodologia de Rodrigues, C. R. (2019), inseriu-se uma proveta de 100 mL em uma balança analítica, ilustrada na Figura 18, que foi zerada posteriormente, depois adicionou-se o RIM e assim foram obtidas as massas (g) nas sucessivas adições nos respectivos volumes de 10, 20, 30, 40, 50 mL, a cada 10 mL até alcançar os 100 mL. 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.

Figura 18 - Balança analítica e proveta de 100 mL



Fonte: Autor (2020).

3.2.1.2 Umidade

A umidade do RIM foi obtida conforme metodologia aplicada por Rodrigues, C. R. (2019) e Pedroza (2011), que de acordo com a norma ASTM D 3173-87, consistiu em adicionar aproximadamente 1 g de biomassa a um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. Feito isso, a amostra foi aquecida em uma estufa à temperatura de 110 °C por um período de 60 minutos. Posteriormente, colocou-se o cadinho em um dessecador por 10 minutos e logo após mediu-se a sua massa. Este procedimento foi realizado em triplicata. O teor de umidade foi determinado através da Equação 1, descrita da seguinte forma:

$$\% \text{Umidade} = ((A - B) / C) \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

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

Seguindo a metodologia de Nogueira e Rendeiro (2008) e baseado pela ABNT NBR 8112 (1986), determinou-se o teor de material volátil, que são os materiais que evaporam com mais facilidade, da biomassa do resíduo da indústria madeireira. Primeiramente, adicionou-se aproximadamente 1 g de amostra em um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. Em seguida, aqueceu-se a amostra em uma mufla, de marca Coel modelo Hm, à temperatura de 850 °C, na ausência de oxigênio, durante 7 minutos. O ensaio foi realizado em triplicata. O teor de material volátil foi determinado pela Equação 2, que se descreve como:

$$\% \text{Material Volátil} = (((P + P_0) - P_3) / P_0) \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

P= peso do cadinho vazio, g;

P₀= peso da amostra inicial, g;

P₃= peso do cadinho + amostra final, g.

3.2.1.4 Teor de Cinzas

Realizou-se esse ensaio conforme Nogueira e Rendeiro (2008) e com base na ABNT NBR 8112 (1986). Adicionou-se aproximadamente 1 g de RIM a um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. Aqueceu-se a amostra em uma mufla, de marca Coel modelo Hm, a uma temperatura de 710 °C durante 60 minutos. Na sequência, colocou-se o cadinho em um dessecador por 1 hora e posteriormente anotou-se sua massa. Realizou-se o ensaio em triplicata. O resultado do teor de cinzas foi determinado conforme a Equação 2, descrita da seguinte maneira:

$$\% \text{Cinzas} = (A / B) \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

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

Aplicando-se a metodologia utilizada por Pedroza (2011), o teor de carbono fixo, que é a porcentagem de material resultante que não evaporou após os ensaios dos teores de umidade, material volátil e cinzas, foi determinado através da Equação 4, descrita deste modo:

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

3.2.2 Análise Termogravimétrica – TG

Essa análise objetiva possuir informações acerca do processo da perda de massa da biomassa em função da temperatura, para se conhecer o rendimento gravimétrico da biomassa. Essa análise foi realizada na Central Analítica da Universidade de São Paulo (USP).

3.3 CONFECÇÃO DE BRIQUETES DA BIOMASSA DE RIM

Os briquetes de RIM foram produzidos a partir de um volume de 320 mL de biomassa in natura, com a adição de 90 mL de água destilada e misturados até se tornar uma massa homogênea. A mistura foi deixada em descanso, como na Figura 19, por um período de 5 minutos para que a água fosse absorvida e os briquetes fossem moldados em seguida.

Figura 19 - Biomassa com água destilada em descanso

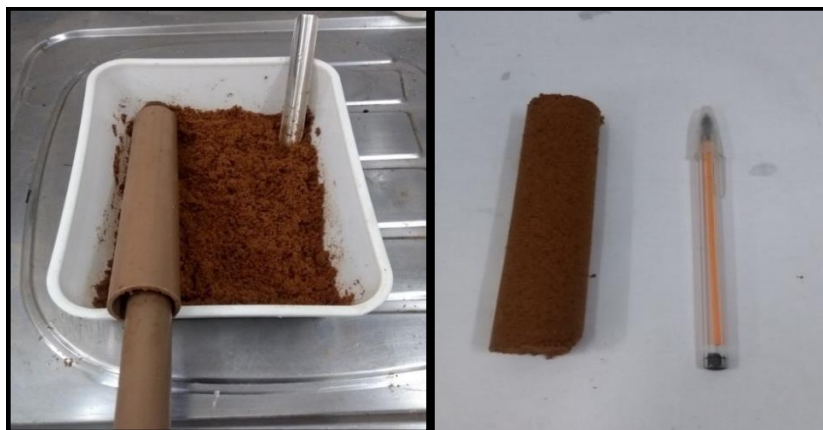


Fonte: Autor (2020).

O material foi introduzido aos poucos no molde de PVC, que possuía 20 mm de diâmetro, até alcançar cerca de 15 centímetros de altura. Inseriu-se

aproximadamente 4 gramas da mistura por vez, seguidos de leve compactação com o auxílio de uma haste em PVC. A confecção dos Briquetes foi realizada no LARSEN – IFTO, Campus Palmas, e ficaram conforme a Figura 20.

Figura 20 - Fabricação de briquete de biomassa de RIM



Fonte: Autor (2020).

3.4 PIRÓLISE E ATIVAÇÃO DE CARVÃO EM REATOR DE LEITO FIXO

A biomassa de RIM na forma de briquetes, após a secagem em estufa por tempo suficiente para que boa parte da água tenha sido evaporada, como é possível verificar na Figura 21, foi inserida ao reator. A conversão térmica efetuou-se em um reator de leito fixo, conforme o apresentado na Figura 22, de aço inox com 100 centímetros de comprimento e 10 centímetros de diâmetro externo. O reator foi aquecido por forno bipartido reclinável (marca FLYEVER, modelo FE50RPN e linha 05/50), sendo operado em regime de batelada. O gás de arraste empregado na reação foi o vapor de água aquecido entre 133 °C e 139 °C em autoclave, de acordo com a Figura 23.

Figura 21 - Secagem de briquetes em estufa



Fonte: Autor (2020).

Figura 22 - Reator de pirólise em leito fixo



Fonte: Autor (2020).

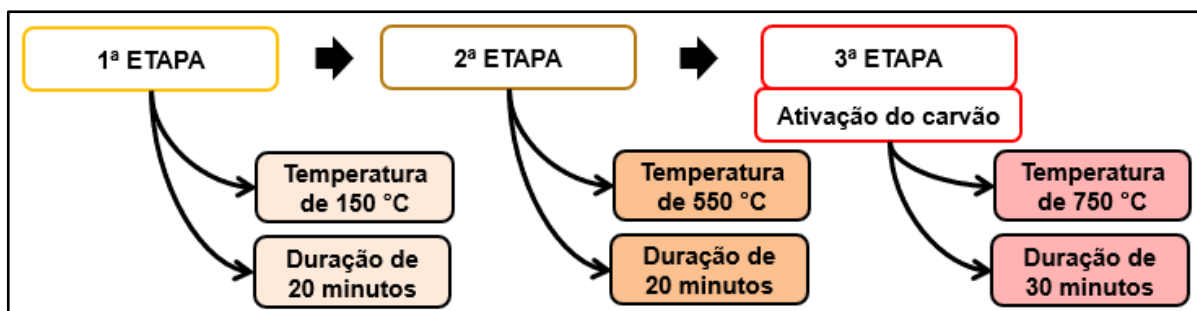
Figura 23 - Autoclave vertical e conjunto de autoclave e reator de pirólise



Fonte: Autor (2020).

O plano de ação da pirólise foi executado em três etapas de temperaturas constantes, sendo a primeira a 150 °C, com duração de 20 minutos, a segunda a 550 °C, em um intervalo de 20 minutos também, e a última (ativação do carvão) a 750 °C durante 30 minutos. A Figura 24 ilustra o plano de ação da pirólise e ativação física do carvão, e a Figura 25, o reator de pirólise de leito fixo utilizado neste trabalho com a biomassa. A pirólise do RIM em reator de leito fixo foi realizada no LARSEN – IFTO, Campus Palmas.

Figura 24 - Plano de ação da pirólise e ativação física do carvão



Fonte: Autor (2020).

Figura 25 - Amostra de biomassa fora e dentro do reator de pirólise



Fonte: Autor (2020).

Após a reação e o resfriamento da unidade de pirólise, todos os produtos do processo (líquido e sólido) foram coletados. O material sólido foi recuperado diretamente do reator e os líquidos pirolíticos foram coletados após o sistema de condensação dos vapores, em funil de separação de fases.

Através da relação entre a massa final, após a pirólise, e massa inicial, antes da pirólise, foi possível determinar o rendimento do material.

3.5 PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS EMPREGADOS NA CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO

3.5.1 Análise Imediata do Carvão Ativado

A análise imediata do carvão de RIM realizou-se no LARSEN – IFTO, Campus Palmas.

3.5.1.1 Densidade Aparente do Carvão

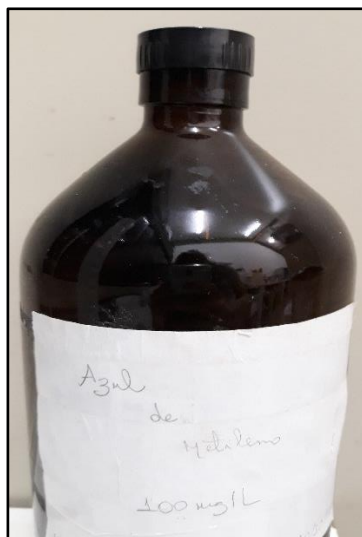
A densidade aparente do carvão de RIM foi determinada considerando a relação entre massa e volume de carvão em uma proveta de acordo com procedimento descrito no item 3.2.1.1, com a diferença de que as massas obtidas foram medidas de 5 em 5 mL, até os 60 mL.

3.5.2 Teste de Adsorção de Azul de Metileno em Filtro de Carvão e Areia

O teste foi realizado em filtro descendente contendo o carvão da pirólise do RIM como meio filtrante, de acordo com a metodologia de Rodrigues, C. R. (2019), no LARSEN – IFTO, Campus Palmas.

Realizou-se o experimento de fluxo contínuo, utilizando a solução do corante, Figura 26, em duas concentrações: 10 mg/L e 2mg/L, com pH ajustado a 7,0. Foi empregado um sistema de filtração constituído por um reservatório inferior de 50 litros, um reservatório superior de 20 litros com sistema de drenos e por fim, uma coluna de filtração (ou simplesmente filtro) de carvão e areia, representado pela Figura 27.

Figura 26 - Azul de metileno com concentração de 100 mg/L

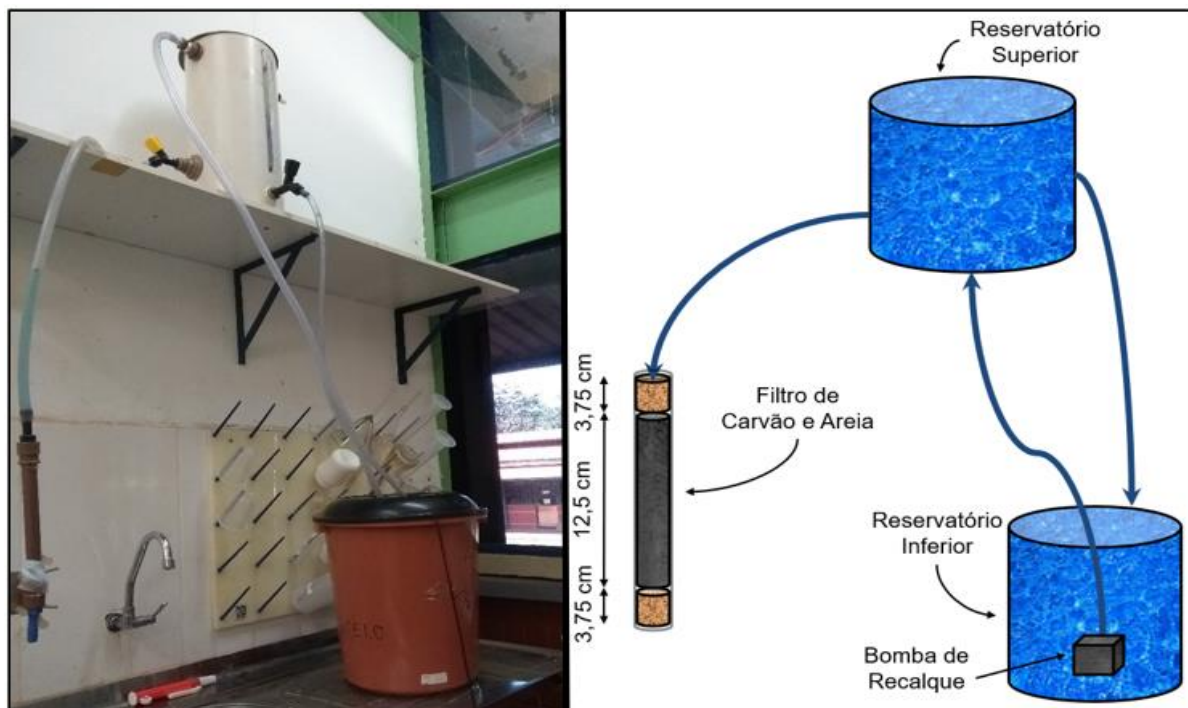


Fonte: Autor (2020).

Instalou-se uma bomba submersa no reservatório inferior para o recalque do corante ao 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. Nesse reservatório existiam três

tubulações para transporte de líquidos: alimentação do reservatório inferior, dreno para o reservatório inferior e alimentação do filtro. A alimentação do filtro foi feita por gravidade.

Figura 27 - Sistema empregado no ensaio de adsorção



Fonte: Autor (2020)

Os filtros possuíam altura total de 20 cm de tubulação, com altura do carvão em 12,5 cm, tendo 3,75 cm de areia, tanto na parte inferior quanto superior, com uma tubulação de diâmetro de 20 mm. Na Figura 28, apresenta-se a areia utilizada no ensaio, e na Figura 29, o filtro utilizado. Para a montagem do sistema foram utilizados aproximadamente 7 gramas de massa do carvão ativado em cada experimento. A alimentação realizada por gravidade foi mantida a uma vazão média de 10 mL/min.

Figura 28 - Areia passante da peneira 2 μm

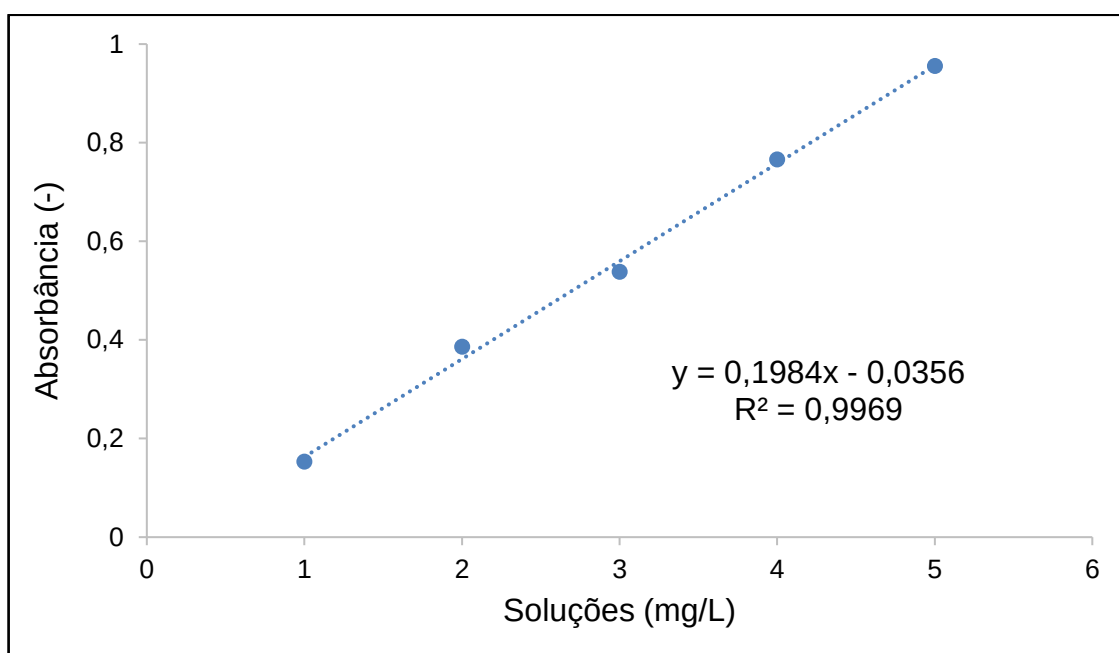


Fonte: Autor (2020)

Figura 29 - Filtro utilizado no ensaio

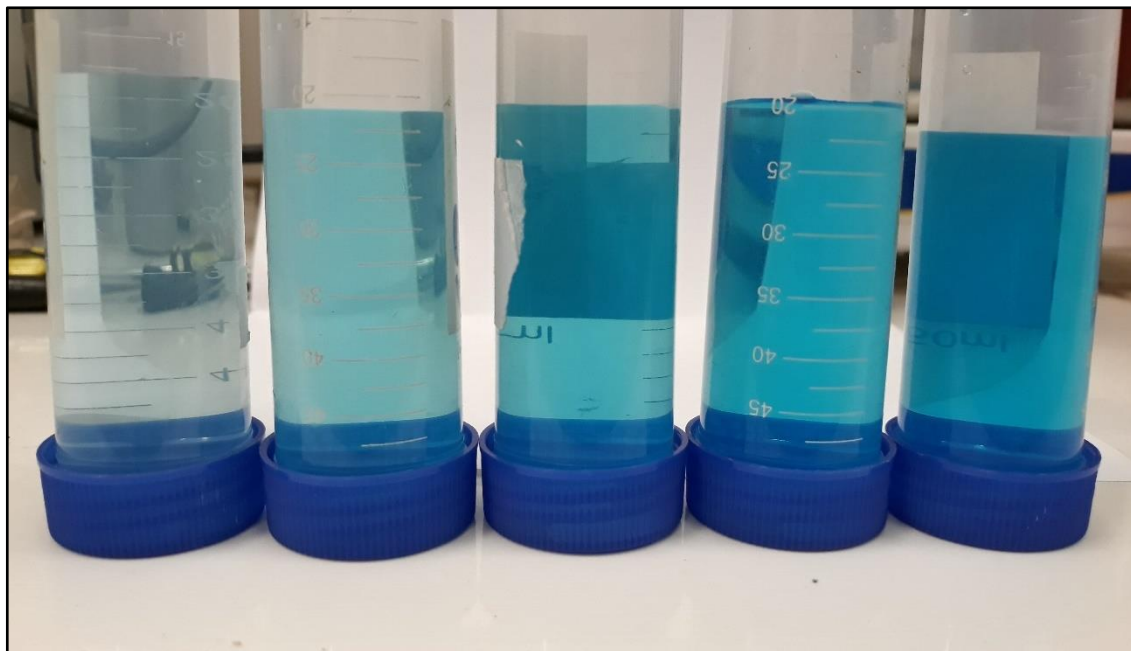
Fonte: Autor (2020).

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 externa, Figura 30, construída pela análise de soluções de concentrações iguais a: 1, 2, 3, 4 e 5 mg/L, Figura 31, partindo-se da solução inicial de azul de metileno.

Figura 30 - Curva de calibração

Fonte: Autor (2020).

Figura 31 - Soluções com concentrações de 1, 2, 3, 4 e 5 mg/L de azul de metileno



Fonte: Autor (2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

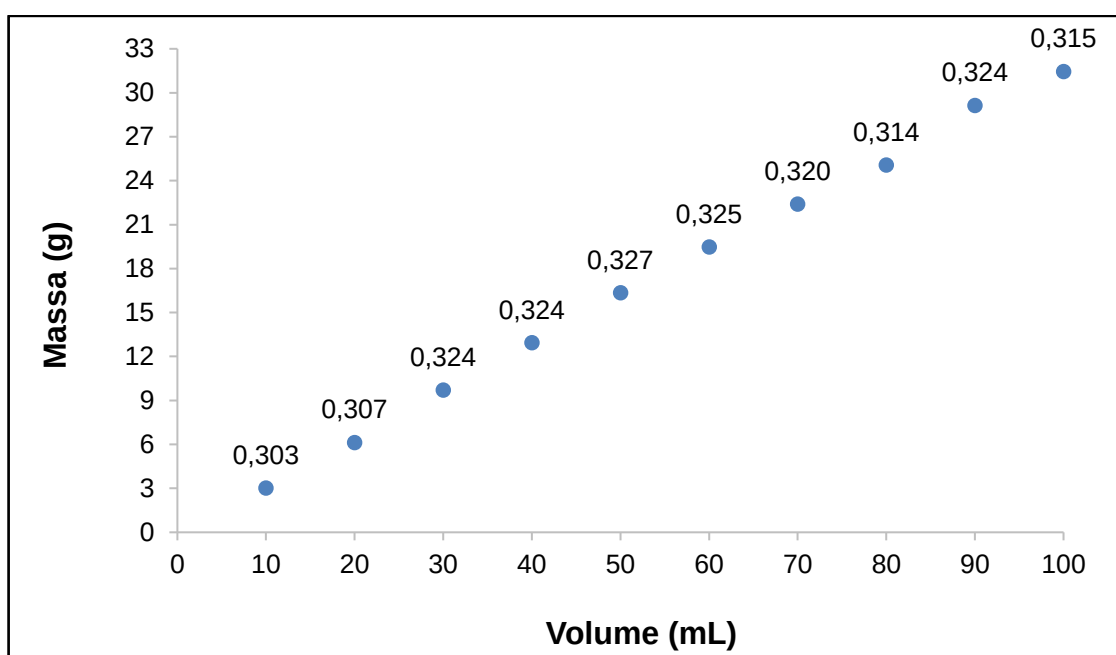
O presente capítulo expõe todos os resultados obtidos nos ensaios realizados para a caracterização da biomassa e do carvão ativado, conforme a metodologia descrita no capítulo anterior. Os ensaios de caracterização da biomassa incluem os ensaios de análise imediata e análise termogravimétrica (TG). Os 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 em duas concentrações, 2 e 10 mg/L, do corante azul de metileno em filtro de carvão ativado e areia.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

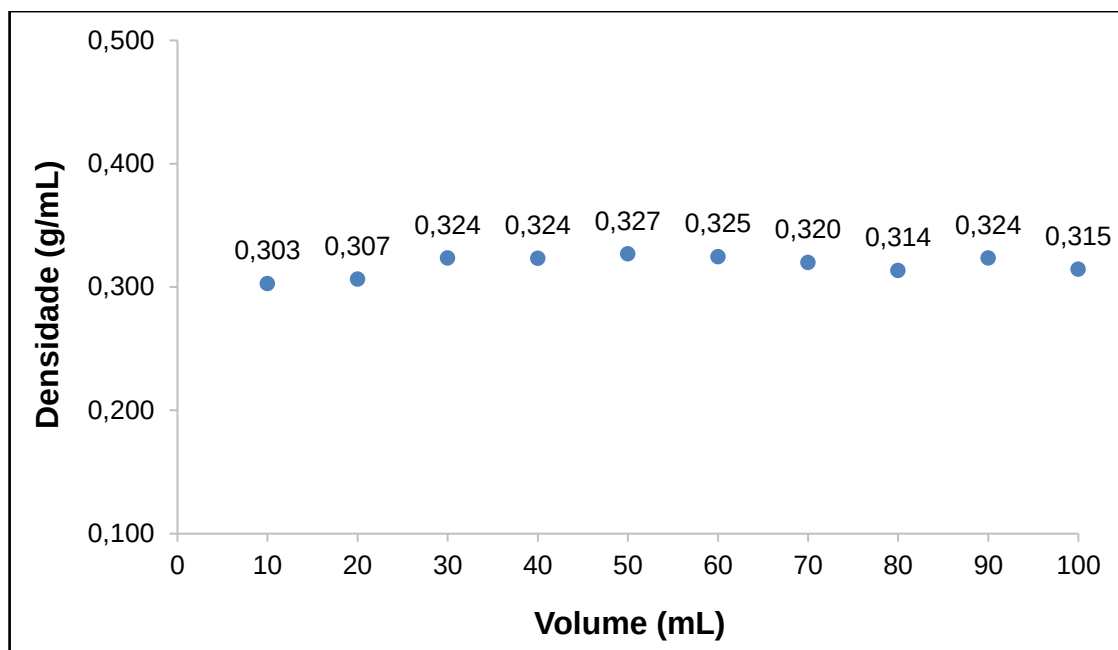
4.1.1 Análise Imediata da Biomassa

Através da Figura 32 e Figura 33 pode-se realizar a análise dos dados obtidos pelo ensaio da densidade aparente da biomassa.

Figura 32 - Relação entre massa e volume da biomassa



Fonte: Autor (2020).

Figura 33 - Tendência dos valores de densidade aparente da biomassa

Fonte: Autor (2020).

A densidade média aparente dos dados apresentados nas Figuras 32 e 33 foi igual à 0,318 g/mL, possuindo um desvio padrão de 0,008. A partir da tabela 6 é possível comparar esse valor com os de outros trabalhos.

Tabela 6 - Resultados de densidade aparente de biomassa

Variável	Resultados		Resultados Comparativos		
	Média	Desvio Padrão	Silva, E. M. (2018)	Valcarenghi e Ribeiro (2013)	Paes <i>et al.</i> (2012)
			Angelim Pedra	MDF	Angico Vermelho
Densidade (g/mL)	0,318	0,008	0,297	0,226	0,520

Fonte: Autor (2020).

Comparando os resultados da Tabela 6, nota-se que os valores de Silva, E. M. (2018) e Valcarenghi e Ribeiro (2013), foram os que mais se assemelharam com a densidade de biomassa deste trabalho. A diferença entre valores observada, principalmente em relação à Paes *et al.* (2012), pode ser em função do tipo de madeira empregada no resíduo, que possuem composição e características distintas.

De acordo com Silva, E. M. (2018), madeiras com valores de densidade elevados não confeccionam um carvão de qualidade, pois possuem áreas com espaços vazios menores e menores áreas superficiais. Diante disso, considera-se que o baixo valor da densidade encontrado no RIM deste trabalho, é favorável para a produção de um carvão eficiente.

Através da tabela 7, é possível verificar os resultados obtidos dos ensaios de caracterização do resíduo da indústria madeireira (RIM), 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 7 - 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>Hymenolobium</i> sp.	<i>Pinus</i> sp.
Umidade	6,89	12,70	4,52	8,70
Material Volátil	61,38	79,35	90,39	85,27
Cinzas	25,35	1,35	0,19	3,20
Carbono Fixo	6,38	19,30	4,90	11,53

Fonte: Autor (2020).

Observando a Tabela 7, nota-se que os resultados apresentam divergências significativas em comparação com os valores apresentados em outros trabalhos. Em relação ao teor de umidade, o resultado obtido através do ensaio desta pesquisa foi 6,89%, o que segundo Dias *et al.* (2012), a biomassa seria considerada apta à combustão, pois o teor de umidade está na faixa de valores caracterizada como ideal, que é entre 5 e 10%.

Segundo Silva, E. M. (2018), a umidade é uma variável que influencia na combustão, 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 pirolise (GÓMEZ, 2002).

A Figura 34 e Figura 35, exibe os cadinhos de porcelana com o resultado dos ensaios de teor de material volátil e teor de cinzas respectivamente.

Figura 34 - Cadinhos em dessecador durante ensaio de teor de material volátil



Fonte: Autor (2020).

Figura 35 - Cadinhos em dessecador durante ensaio de teor de cinzas



Fonte: Autor (2020).

Ao comparar os valores do teor de material volátil, nota-se que o resultado apresentado nesta pesquisa (61,38%) 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 (25,35%) é maior que os valores apresentados pelos demais trabalhos. Muitas variáveis podem ter causado tamanha divergência, a começar pelo tipo de madeira que constitui os resíduos, que no caso desta pesquisa, segundo a empresa que forneceu o material, se trata de angelim vermelho e madeiras mistas, como também o tipo de solo e nutrientes, que influenciam a composição da madeira, incluindo a quantidade de lignina. Além disso, até mesmo o próprio sistema de armazenamento de resíduos da empresa responsável pelo material, pode ser um dos fatores que acarretaram nos resultados obtidos. Os resíduos estavam em contato direto com o solo e sem nenhuma proteção às ações externas, ou seja, outras substâncias como o próprio solo, poderiam facilmente se misturar ao material.

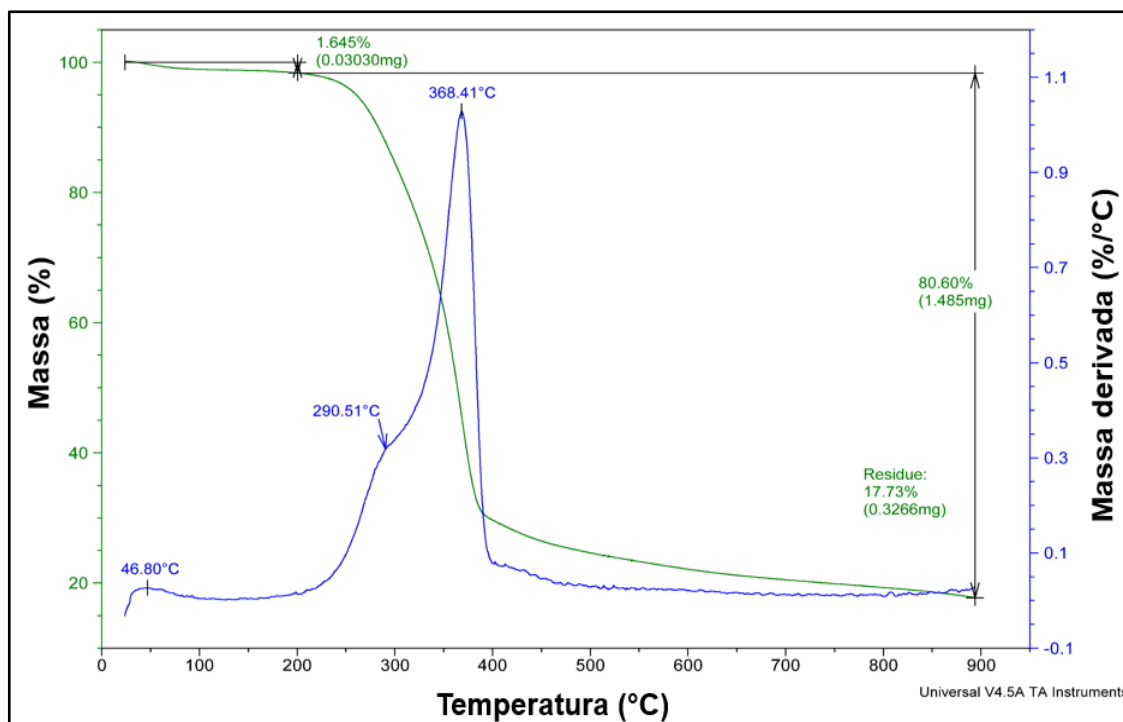
Segundo Lins *et al.* (2020), um alto teor de cinzas não é desejável quando o interesse é a produção de energia, pois a presença de cinzas nos resíduos diminui a eficiência do material combustível, que necessitaria de uma maior quantidade de oxigênio consumido para derreter as cinzas. Vale evidenciar 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 7, verifica-se que o resultado desse ensaio (6,38%) é mais semelhante ao valor obtido por Silva, E. M. (2018) (4,90%), e consideravelmente inferior aos outros dois trabalhos, Teixeira *et al.* (2016) e Amorim *et al.* (2015). Vale ressaltar que 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).

4.1.2 Análise Termogravimétrica

A análise termogravimétrica foi realizada a partir de uma amostra de resíduo de madeira e é ilustrada pela Figura 36, que consiste em duas curvas, ambas em função da temperatura, onde uma se refere à massa e a outra à massa derivada (taxa de variação de massa).

Figura 36 - Análise termogravimétrica



Fonte: Autor (2020).

Através da Figura 36, é possível verificar a presença de 3 eventos. De acordo com Rodrigues, C. R. (2019), o primeiro evento ocorre em torno de 50 °C, referente à perda de umidade da amostra, tendo iniciado aos 25 °C e concluído em 200 °C. O segundo evento acontece nas proximidades de 290 °C, que está relacionado à decomposição da hemicelulose e da maior parte da celulose, iniciando em 200 °C e finalizando em torno de 290 °C. O terceiro evento, por sua vez, se trata da decomposição residual da hemicelulose, celulose e lignina acerca de 370 °C, iniciando aproximadamente à 290 °C e encerrando nas proximidades de 390 °C. Posteriormente aos eventos, a amostra apresenta uma estabilização na perda de massa durante o restante do ensaio.

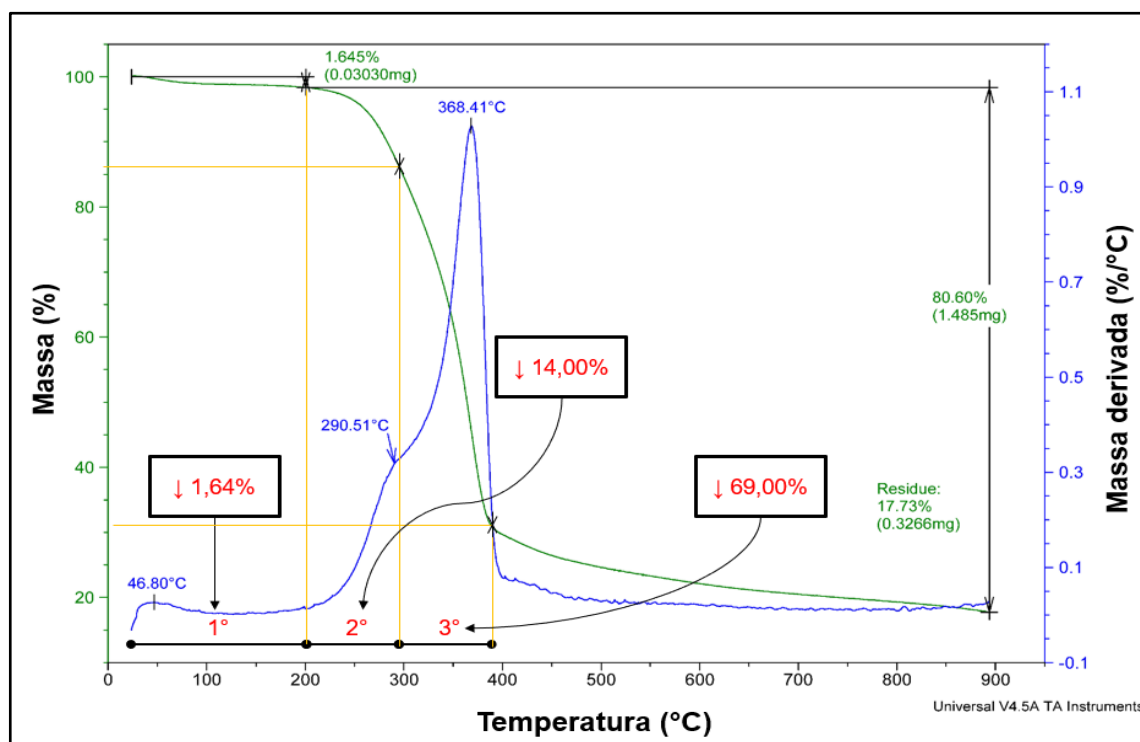
A perda de massa total observada foi de 82,27%, resultando em uma massa residual, que na verdade são as cinzas, de 17,73%. Esse valor é bem próximo ao resultado obtido no ensaio de teor de cinzas (25,35%). A diferença entre os dois dados pode ter sido em função da temperatura alcançada pelo ensaio de TG, 900 °C, que é superior a temperatura adotada no ensaio de teor de cinzas.

Segundo Pereira, B. L. C. *et al.* (2013), os componentes da madeira como celulose e hemicelulose passam pelo processo de degradação em temperaturas diferentes, sendo que antes, acontece a eliminação da água da biomassa. De acordo

com o mesmo autor, a degradação da lignina ocorre de maneira fracionada, em que os compostos mais complexos, a exemplo dos grupos carboxílicos, são degradados em elevadas temperaturas.

Com a Figura 37 e Tabela 8, é possível observar a perda de massa obtida em cada evento da análise termogravimétrica.

Figura 37 - Perda de massa durante os eventos



Fonte: Autor (2020).

Tabela 8 - Perda de massa relativa e acumulada dos eventos da TG

Evento	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Perda de massa relativa (%)	Perda de massa acumulada (%)
1	25	200	1,645	1,645
2	200	290	12,355	14
3	290	390	55	69

Obs: A perda de massa relativa é a perda de massa dentro do próprio evento, já a perda de massa acumulada, é a perda de massa total da biomassa.

Fonte: Autor (2020).

Para Shen e Zhang (2003), existe uma faixa de temperatura, ilustrada na Tabela 9, que é obedecida por alguns compostos e grupos funcionais na decomposição térmica. Segundo o mesmo autor, a decomposição de compostos

oxigenados geralmente acontece em temperaturas mais elevadas que a de outros compostos orgânicos.

Tabela 9 - Faixas de temperatura de decomposição de grupos e compostos orgânicos

Grupos de compostos	Faixa de temperatura (°C)
Umidade	Até 150
Carboxílico	150 - 600
Fenólico	300 - 600
Éter	Até 600
Celulose	Até 650
Outros compostos oxigenados	150 - 900

Fonte: Shen e Zhang (2003).

Em função da análise termogravimétrica da biomassa, é perceptível que o composto mais estável é a lignina, que por sua vez, degrada em temperaturas entre 400 e 800 °C. Para produzir uma quantidade maior de carvão, ou seja, otimizar o rendimento gravimétrico, é necessário que o processo de pirólise aconteça dentro desse intervalo de temperatura (SILVA, E. M., 2018).

A Tabela 10 exhibe os valores de temperatura de cada evento da análise termogravimétrica e os valores obtidos em outros trabalhos por outros pesquisadores.

Tabela 10 - Comparação de resultados de TG

Evento	Resultados		Resultados Comparativos		
	Pico de temperatura (°C)	Rodrigues, C. R. (2019)	Lara et al. (2017)	Pereira, B. L. C. et al. (2013)	Vidaurre, G.B. et al. (2012)
		Casca de arroz	Araucariaceae	<i>Eucalyptus</i> spp.	Paricá
1	46,80	40,27	± 125	± 60	± 50
2	290,51	310,63	± 350	± 280	± 290
3	368,41	355,42	± 400	± 350	342,62

Fonte: Autor (2020).

Observando a Tabela 10, pode-se notar que em exceção aos resultados de Lara et al. (2017), todos os resultados apresentaram valores próximos à 50 °C para o primeiro evento, 290 °C para o segundo evento, e 350 °C para o terceiro evento. A

divergência de resultados de Lara *et al.* (2017), pode ser em função das dimensões e características da biomassa empregada na análise. Por outro lado, esses resultados se apresentaram proporcionais, tendo um acréscimo de temperatura, em comparação com os demais trabalhos, em torno de 50 °C em todos os eventos da análise.

4.2 PIRÓLISE DE BIOMASSA E ATIVAÇÃO DE CARVÃO

Tabela 11 - Rendimento do carvão

Resultados			Resultados Comparativos		
Massa inicial (g)	Massa final (g)	Rendimento do material (%)	Silva, E. M. (2018) Serragem de Angelim Pedra (%)	Borges, W. M. S. <i>et al.</i> (2016) Resíduo de madeira de candeia (%)	Rodrigues, C. R. (2019) Casca de arroz (%)
40,95	17,85	43,60	22,27 a 29,71	48,21 a 96,55	24,04 a 68,99

Fonte: Autor (2020).

A Tabela 11 evidencia os resultados obtidos na pirólise para a produção do carvão ativado em reator de leito fixo, além de realizar a comparação com outros trabalhos. Ao observá-la, verifica-se que o rendimento do material em estudo foi de 43,60 %, valor este está acima ou dentro do intervalo de rendimento dos outros trabalhos em comparação.

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 chegou à conclusão de que aumentar a temperatura provoca uma redução no rendimento do carvão, como esquematizado na Figura 38, e que quanto maior o tempo de pirólise, melhor é o rendimento do material.

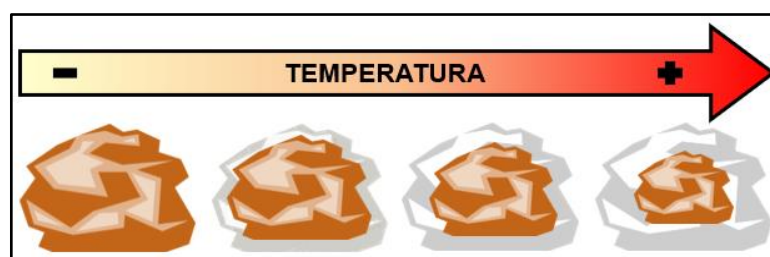
De acordo com Pedroza (2011), a devolatilização dos compostos orgânicos sólidos, que é resultado do somatório de componentes individuais como celulose, hemicelulose, lignina e extrativos, pode ser o fator que causa redução no rendimento da fração sólida com o aumento da temperatura, assim como a gaseificação 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 230 kg de biomassa *in natura*, pois o rendimento é de 43,60%.

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 24,5 toneladas de RIM, com o rendimento de 43,60%, que poderia ser adquirido através de uma parceria com as indústrias madeireiras ou afins.

Figura 38 - Perda de massa em função do aumento da temperatura



Fonte: Autor (2020).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO

4.3.1 Densidade Aparente do Carvão

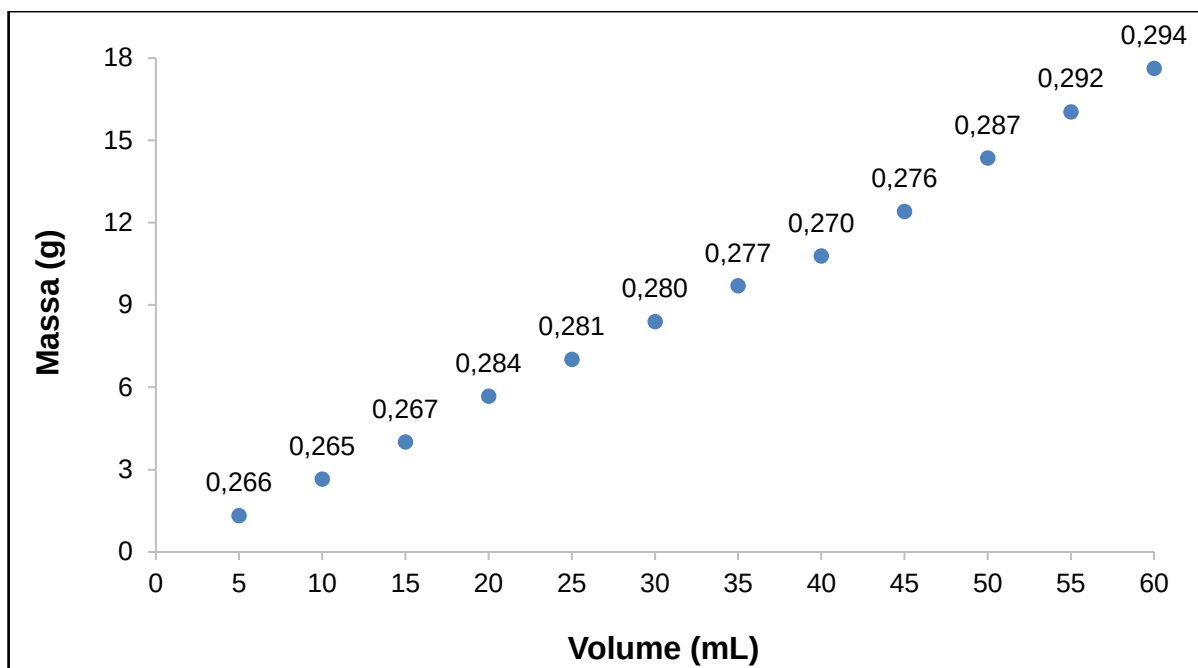
Os valores de densidade aparente do carvão apresentados nas Figuras 39 e 40 obtiverem uma média igual à 0,278 g/mL e um desvio padrão de 0,01. Com o auxílio da tabela 12, pode-se comparar esse resultado com valores obtidos em outros trabalhos.

Tabela 12 - Resultados de densidade aparente de carvão

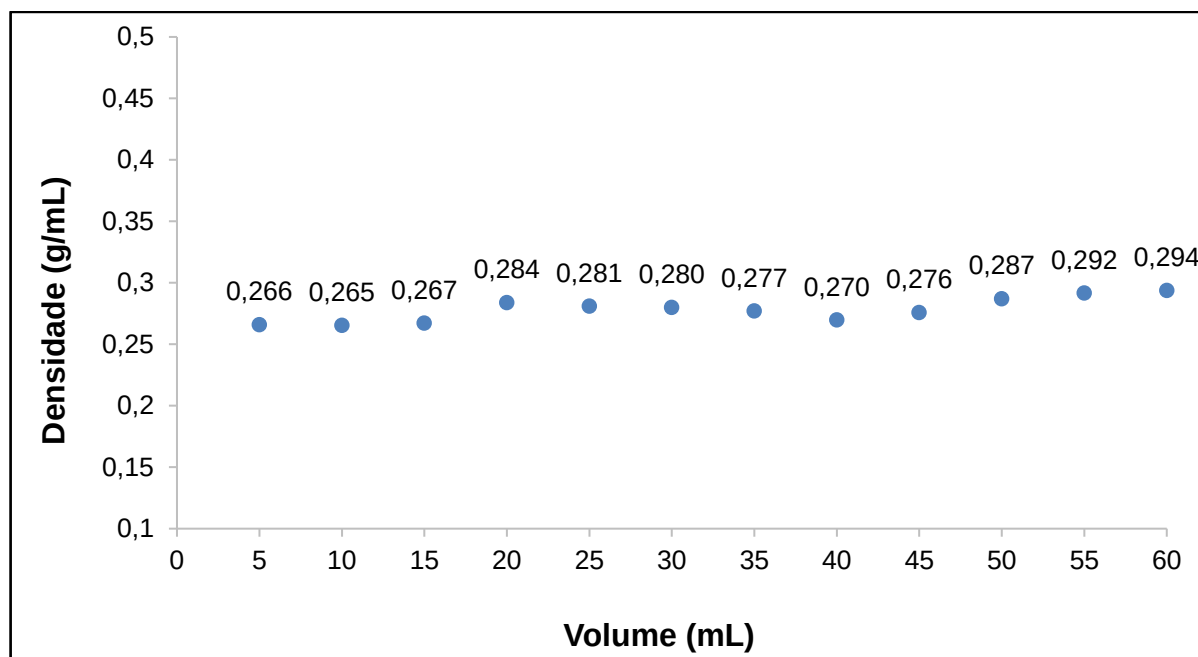
Variável	Resultados		Resultados Comparativos		
	Média	Desvio Padrão	1 Angelim Pedra	2 MDF	3 Leucena
Densidade (g/mL)	0,278	0,010	0,179	0,630	0,390

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

Fonte: Autor (2020).

Figura 39 - Relação entre massa e volume do carvão ativado

Fonte: Autor (2020).

Figura 40 - Tendência dos valores densidade aparente do carvão ativado

Fonte: Autor (2020).

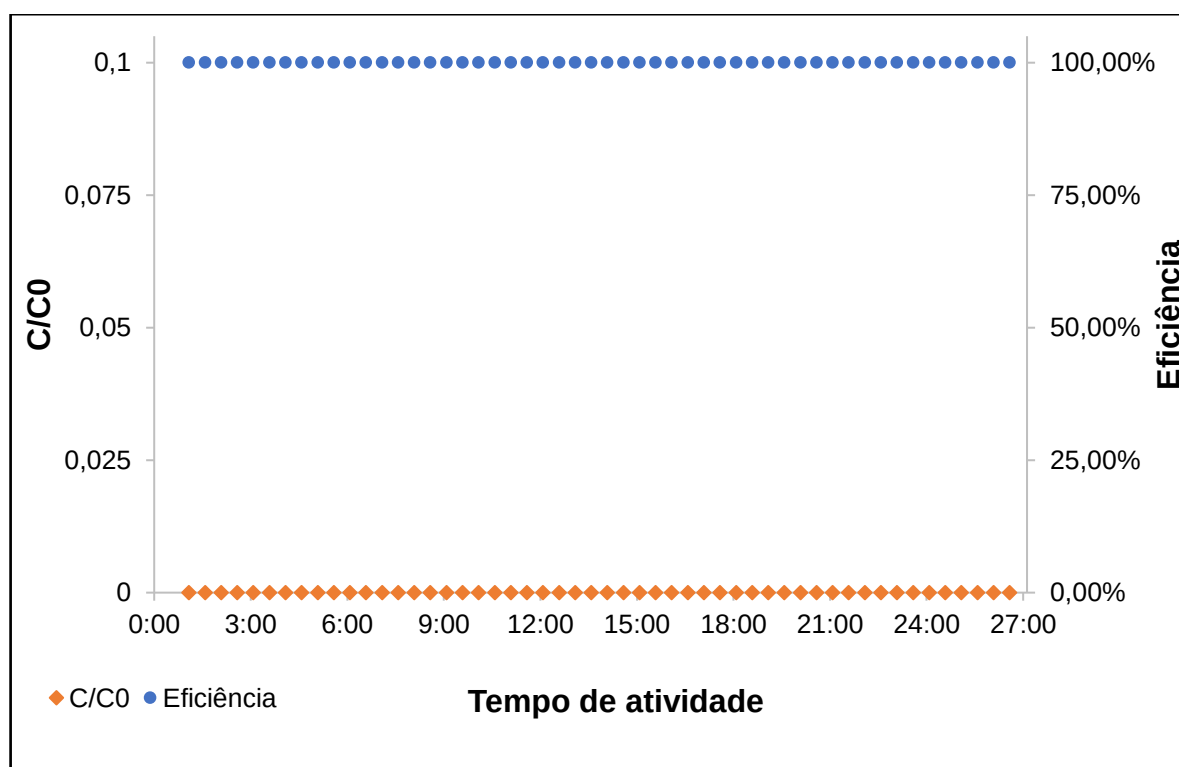
Comparando os resultados da Tabela 12, nota-se que existe uma diferença significativa entre o valor obtido por esta pesquisa e os demais trabalhos, que pode ser explicada pelas distintas granulometrias dos carvões. Diante disso, Loureiro (2012) afirma que a densidade está relacionada à granulometria 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 adsorviva 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.

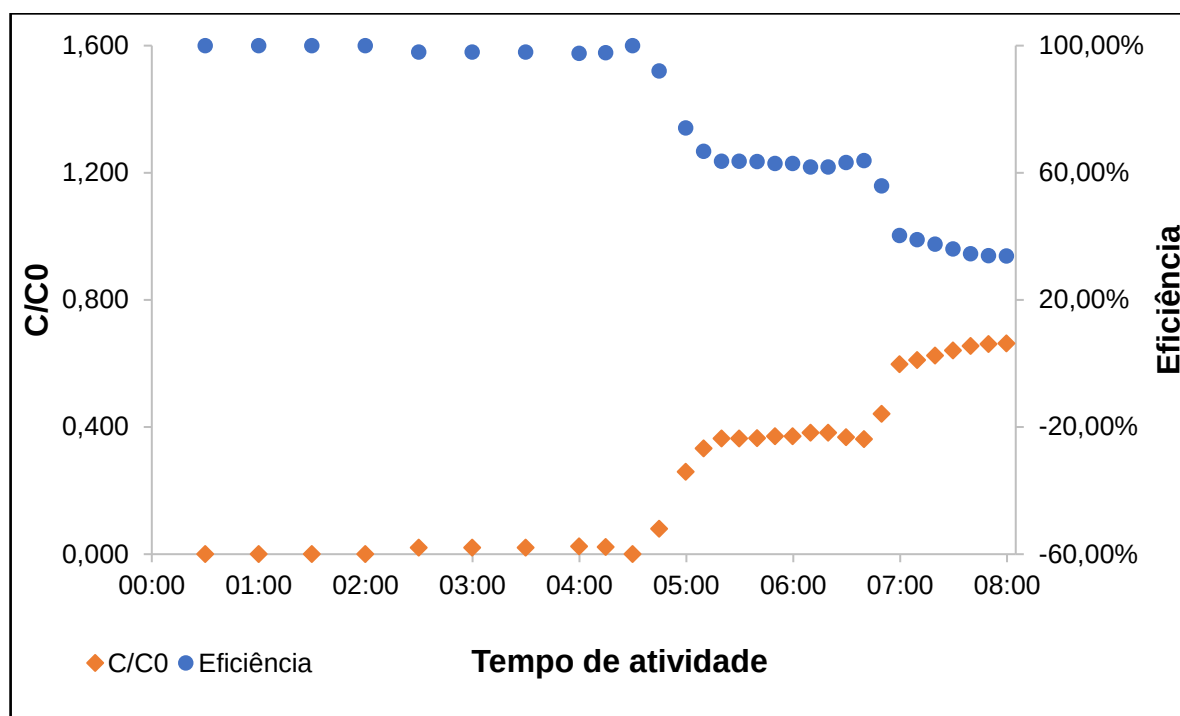
De acordo com Couto (2009), o carvão possui a capacidade adsorviva relacionada à sua área superficial, ao teor de cinzas e à existência, tamanho e distribuição de poros. Ao realizar o teste de adsorção de azul de metileno com o filtro de carvão e areia, conseguiu-se observar o desempenho do carvão com o corante, que pode ser verificado através das Figuras 41 e 42. Por sua vez, as Figuras 41 e 42 correspondem às curvas de relação entre concentração final e inicial (C/C_0) e eficiência na remoção do corante, em concentrações de 2 mg/L e 10 mg/L respectivamente.

Figura 41 - Curva de relação entre concentração final e inicial e eficiência para a concentração de 2 mg/L de corante



Fonte: Autor (2020).

Figura 42 - Curva de relação entre concentração final e inicial e eficiência para a concentração de 10 mg/L de corante



Fonte: Autor (2020).

O teste de adsorção realizado com o corante a uma concentração de 2 mg/L, ilustrado na Figura 41, apresenta resultados com a taxa máxima de adsorção por um período de 26 horas e 35 minutos, onde foram realizadas as leituras de absorbância a cada 30 minutos, com exceção à primeira leitura, que foi realizada após 1 hora e 5 minutos do início do teste. Vale ressaltar que o tempo de atividade poderia ser estendido por um período indeterminado antes de alcançar a saturação do filtro.

Com a concentração de 10 mg/L do corante, os resultados adquiridos no teste de adsorção, apresentados na Figura 42, evidenciaram um ótimo desempenho por um período de 4 horas e 30 minutos, mantendo a eficiência acima de 97% na remoção do corante. As leituras de absorbância, efetuadas a cada 30 minutos inicialmente, foram reduzidas para intervalos de 10 minutos ao alcançar o tempo de atividade igual a 5 horas. O teste foi encerrado após 8 horas de duração, apresentando 33,75% de eficiência de adsorção na última leitura.

Diante dos testes de adsorção do azul de metileno, com concentrações de 2 mg/L e 10 mg/L, percebeu-se que quanto maior a concentração do corante, mais rápido o filtro atinge a saturação, e, conseqüentemente, menor é a sua capacidade adsortiva.

A Figura 43 apresenta o filtro de carvão ativado e areia após o ensaio de adsorção, sendo possível visualizar como o material se acomodou no interior do elemento.

Figura 43 - Filtro de carvão e areia após ensaio de adsorção



Fonte: Autor (2020).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Utilizando-se o resíduo da indústria madeireira (RIM) 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 do RIM apresentou resultados inferiores à outras pesquisas, o que é favorável para a confecção de carvão, pois um valor de densidade elevado não produz um carvão de qualidade em razão de seus espaços vazios menores e menores áreas superficiais.

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 combustão.

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.

O RIM possui um elevado teor de cinzas, que pode ser explicado pela composição química da madeira, que por sua vez, sofre influência do solo e seus nutrientes. Considera-se também a possibilidade da presença de outras substâncias (areia, terras) que se misturaram à amostra durante o seu armazenamento sem proteção alguma às ações externas.

O teor de carbono fixo, por sua vez, apresentou um baixo resultado, que é explicado pela associação dos resultados dos ensaios de teores acima. O valor em questão favorece o processo de combustão, pois quanto maior o teor de material volátil e menor o teor de carbono fixo, mais rápida a combustão acontece.

A análise termogravimétrica (TG) apontou a existência de 3 eventos durante a sua realização, sendo o primeiro evento responsável pela perda de água, e os demais eventos em função da degradação dos componentes como hemiceluloses, celulosas

e lignina. A TG mostrou resultados semelhantes às outras pesquisas, o que concerne veracidade aos ensaios realizados e resultados obtidos.

No processo de pirólise de RIM e ativação física de carvão em reator de leito fixo, o material empregado resultou em um rendimento ligeiramente abaixo da metade da massa inicial, 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.

Na caracterização do carvão ativado, encontrou-se um baixo valor de densidade aparente, muito em razão da granulometria do material empregado nesta pesquisa.

Através do ensaio de adsorção de azul de metileno, obteve-se ótimos resultados, em que o carvão ativado de RIM atuou removendo 100% do corante à uma concentração de 2 mg/L durante 26 horas e 35 minutos. Já na remoção desse corante à uma concentração de 10 mg/L alcançou-se uma taxa de eficiência igual ou superior a 97% durante 5 horas.

Além dos ótimos resultados obtidos, o carvão ativado de RIM 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 o resíduo da indústria madeireira (RIM) 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 sujeiras 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

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM, 1991. Annual Book of ASTM Standards. Sec 05.05. Standard Test **Methods for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke**. ASTM, D 3173-87. Philadelphia, PA, p. 324-325.
- AMORIM, F. S. *et al.* Produção de briquetes a partir de espécies florestais. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, vol. 10, n. 4, p. 34-41, 2015. <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v10i4.3779>
- ANTUNES, M. L. P. *et al.* Estudo da utilização de serragem de madeira como adsorvente para tratamento de efluentes têxteis. **REA – Revista de estudos ambientais**, Santa Catarina, v.12, n. 2, p. 6-14, jul./dez. 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8112**: Agregados – Carvão vegetal – Análise imediata. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- BALAT, M. *et al.* Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. *In*: Part 1: Pyrolysis systems. **Energy Conversion and Management**. v. 50, p. 3147-3157, 2009.
- BARTOCCI, P. *et al.* 2018. Batch pyrolysis of pellet made of biomass and crude glycerol: mass and energy balances. **Renewable Energy**, Copenhaguen, v. 124, p. 172-179. 2018.
- BORGES, A. S.; CINIGLIO, G.; BRITO J. O. **Considerações energéticas e econômicas sobre resíduos de madeira processada em serraria**. *In*: CONGRESSO NACIONAL FLORESTAL PANAMERICANO, 1. ,1993; CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993. Anais... Curitiba: SBF: SBEF, 1993. p. 280-282.
- BORGES, W. M. S. *et al.* Produção, caracterização e avaliação da capacidade adsorviva de carvões ativados em forma de briquete. **Revista matéria**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 4, p. 930-942, 2016.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Amazônia**. Brasília – DF: Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/biomas/amaz%C3%B4nia>. Acesso em: 10 mar. 2020.
- BRIDGWATER, A. V. 2003. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. **Chemical Engineering Journal**, Germany, v. 91, p. 87-102, 2003.
- BRIDGWATER, A. V.; BRIDGE, S. A. **Review of biomass pyrolysis and pyrolysis Technologies**. *In*: Biomass pyrolysis liquids upgrading and utilization. London and New York: Elsevier Applied Science, p. 11-92, 1991.
- BRIDGWATER, C. *et al.* **Fast Pyrolysis of Biomass**: a handbook. Reino Unido: Aston University, Bio-Energy Research Group, 2008. 188 p.
- CARDOSO, A. L. **Pirólise lenta de serragem de eucalipto para produção de bioóleo e carvão**. Santa Maria. 2004. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

CASTRO, E. M. R.; SILVA, R. N. M. **Setor madeireiro, dinâmica de atores e política florestal**. In: VENTURIERI, A. (Ed.). Zoneamento ecológico-econômico da área de influência da rodovia BR 163 (Cuiabá-Santarém) diagnóstico do meio socioeconômico, jurídico e arqueologia. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2007. Cap. 8.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S. **Biomassa para energia**. Editora da Unicamp. Campinas-SP, 2006.

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.

DEMIRAL, I. I.; ŞENSÖZ, S. Fixed-bed pyrolysis of hazelnut (*Corylus avellana* L.) bagasse: influence of pyrolysis parameters on product yields. **Energy Sources**, United Kingdom, v. 28, p. 1149-1158. 2006.

DIAS, J. M. *et al.* Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. **EMBRAPA Agroenergia**: Brasília, DF. Documentos 13. 2012. 130 p.

DUANGUPPAMA, K.; SUWAPAET, N.; PATTIYA, A. Fast pyrolysis of contaminated sawdust in a circulating fluidised bed reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Colorado, USA, v. 118, p. 63-74, 2016.

DUTRA, R. I. J. P.; NASCIMENTO, S. M.; NUMAZAWA, S. Resíduos de indústria madeireira: caracterização, consequências sobre o meio ambiente e opções de uso. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, São Paulo, 5. ed., 2005.

FAGUNDES, H. A. V. **Diagnóstico da produção de madeira serrada e geração de resíduos do processamento de madeira de florestas plantadas no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2003.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Forests and Energy**. Rome, 2008.

FONTES, P. J. P. **Auto-suficiência energética em serraria de pinus e aproveitamento de resíduos**. Curitiba, 1994. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 1994.

GOMES, J. I.; SAMPAIO, S. S. **Aproveitamento de resíduos de madeira em três empresas madeireiras do estado do Pará**. Comunicado técnico 102, EMBRAPA, Belém do Pará, 2004.

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

GORGULHO, H. F.; MESQUITA, J. P.; GONÇALVES, F.; PEREIRA, M. F. R.; FIGUEIREDO, J. L. Characterization of the surface chemistry of carbon materials by potentiometric titrations and temperature-programmed desorption. **Carbon**, Elmsford, v. 46, n. 12, p. 1544-1555, out. 2008

GOYAL, H. B.; SEAL, D.; SAXENA, R. C. Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, p. 504-17, 2008.

JAHIRUL, M. I. *et al.* Biofuels Production through Biomass Pyrolysis - A Technological Review. **Energies**, New York, v. 5, p. 4952-5001, 2012.

KAFFKA, S. R. *et al.* Economic, social, and environmental effects of current and near-term biomass use in California. **Energy Policy**, Washington D. C., v. 34, p. 1004-1014, 2006.

KLASS, D. L. **Biomass for Renewable Energy. Fuels, and Chemicals** 1. ed. Califórnia: Academic Press, 1998. 651 p.

KOZAK, P. A. *et al.* Identificação, quantificação e classificação dos resíduos sólidos de uma fábrica de móveis. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, Paraná, v. 6, n. 2, p. 203-212, 2008.

KUMAR, A. *et al.* Thermogravimetric characterization of corn stover as gasification and pyrolysis feedstock. **Biomass Bioenergy**, England, v. 32, p. 460-467, 2008.

LARA, D. M. *et al.* **Avaliação de fragmentos de lenhos carbonizados de araucariaceae por meio de termogravimetria e infravermelho associadas à análise multivariada.** Quím. Nova [online]. 2017, vol.40, n.8, pp.895-901. ISSN 1678-7064. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170095>.

LEEUWESTEIN, J. M.; MONTEIRO, R. A. **Procedimentos técnicos para enquadramento de corpos de água – Documento orientativo.** Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. Diretoria de Programa de Implementação. Brasília, 2000.

LIMA, E. G.; SILVA, D. A. Resíduos gerados em indústrias de móveis de madeira situadas no polo moveleiro de Arapongas - PR. **Revista FLORESTA**, v. 35, n. 1, p. 105-116, 2005.

LIMA, J. T. *et al.* **Uso da madeira de Eucalyptus selecionado para a confecção de móveis de alta qualidade.** In: Anais do IX encontro brasileiro em madeiras e estruturas de madeiras. Cuiabá, 2004.

LINHARES, F. A.; MARCÍLIO, N. R.; MELO, P. J. Estudo da produção de carvão ativado a partir do resíduo de casca da acácia negra com e sem ativação química. **SCIENTIA CUM INDUSTRIA (SCI. CUM IND.)**, Caxias do Sul, v. 4, n. 2, p. 74-79, 2016.

LINS, T. R. S. *et al.* Rendimento e caracterização do carvão vegetal de galhos de *Mimosa caesalpiniiifolia* benth. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5 n. 1 p. 39-43, 2020. DOI: [dx.doi.org/10.5380/biofix.v5i1.67394](https://doi.org/10.5380/biofix.v5i1.67394)

LORA, E. E. S. *et al.* 2012. Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis. In: LORA, E. E. S.; VENTURINI. O. J. (coord.). **Biocombustíveis**. v. 2, Rio de Janeiro: Interciência. 2012. p. 411-498.

LOUREIRO, Lorena Frasson. **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.

LOURENÇO, P. B.; BRANCO, J. M. Dos abrigos da pré-história aos edifícios de madeira do século XXI. *In*: MELO A. S.; RIBEIRO M. C. (coord.). **História da construção: arquiteturas e técnicas construtivas.** Porto: CITCEM/LAMOP, 2012, p. 201-213. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/26503>. Acesso em: 10 mar. 2020.

MACHADO, Paulo Ricardo Silva. **Prospecção de bioprodutos a partir da degradação termoquímica do sabugo de milho visando aplicação industrial.** Palmas, TO. 2019. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2019.

MADURWAR, M. V.; RALEGAONKAR, R. V.; MANDAVGANE, S. A. Application of agrowaste for sustainable construction materials: a review. **Const. Build. Mater**, Amsterdã, v. 38, p. 872-878, 2013.

MARTINS, A. F. *et al.* Caracterização dos produtos líquidos e do carvão da pirólise de serragem de eucalipto. **Quim. Nova**, São Paulo, v. 30, n. 4, p. 873-878, 2007.

MEZERETTE, C.; GIRARD, P. **Enviromental Aspects of gaseous Emissions from Wood Carbonisation and Pyrolysis Proecess.** *In*: Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilization. London: Elsevier Applied Science, Vol I, p. 263-287, 1991.

MIRANDA, M. R. S. **Investigação da pirólise de biomassas do cerrado para aplicação à sistemas de gaseificação estagiada.** Brasília. 2017. Tese (Doutorado em Ciências Mecânicas) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

MONTEIRO, K. F. G. *et al.* Uso de resíduos de madeira como alternativa de melhorar as condições ambientais em sistema de reflorestamento. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 40, n. 3, p. 409-413, set. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672010000300001>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0044-59672010000300001&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 10 mar. 2020.

NIKITIN, N. I. *et al.* **"The Chemistry of Cellulose and Wood"**, (translated in 1966 from Russian by J. Schmorak, Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, Israel). 1962.

NOBRE, J. R. C. Caracterização do Carvão ativado Produzido a Partir de Serragens de Maçaranduba. **Scientia Forestalis** 43(107), 693-702, 2015.

NOGUEIRA, M. F. 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.

NUNES, P. A.; MELO, C. O.; TEIXEIRA, D. A participação do setor madeireiro na economia das microrregiões geográficas do Paraná — 2009. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 2, n. 1, p. 8-20, 2012.

OHIMAIN, E. I. The prospects and challenges of waste wood biomass conversion to bioelectricity in Nigeria. **Journal of Waste Conversion, Bioproducts, and Biotechnology**. Fayetteville, North Carolina, EUA, v. 1, p. 3-8, 2012.

PAES, Juarez Benigno; LIMA, Carlos Roberto de; OLIVEIRA, Elisabeth de; SANTOS, Heric Cavalcanti Mascarenhas dos. Rendimento e Caracterização do Carvão Vegetal de Três Espécies de Ocorrência no Semiárido Brasileiro. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 3, n. 1, p.1- 10, maio 2012.

PEDROZA, M. M. **Bio-óleo e Biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2011.

PEREIRA, Bárbara Luísa Corradi; CARNEIRO, Angélica de Cássia Oliveira; CARVALHO, Ana Márcia Macedo Ladeira; TRUGILHO, Paulo Fernando; MELO, Isabel Cristina Nogueira Alves; OLIVEIRA, Aylson Costa. Estudo da Degradação Térmica da Madeira de Eucalyptus Através de Termogravimetria e Calorimetria. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 3, p.567-576, jun. 2013.

PEREIRA, D. *et al.* 2010. **Fatos Florestais da Amazônia**. Belém: Imazon. 124 p.

PEREIRA, M. C. S. **Produção e consumo de produtos florestais: perspectivas para a região sul com ênfase em Santa Catarina**. Florianópolis: BRDE/AGFLO/GEPLA, 2003. 51 p.

PEREIRA, M.P.C.F. *et al.* Torrefação de cavacos de eucalipto para fins energéticos. **Pesquisa florestal brasileira**, v.36, n.87, p.269- 275, 2016.

RAMOS, W. F. *et al.* Análise da indústria madeireira na amazônia: gestão, uso e armazenamento de resíduos. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais – RBCIAMB**, Rio de Janeiro, n. 43, p. 1-16, 2017.

RIUL, M.; RIBEIRO, E. L. Diagnóstico e diretrizes para a gestão de resíduos no APL de móveis de João Pessoa-PB. **UNOPAR Científica: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 11, n. 1, p. 15-24, nov. 2012.

ROCHA, Y. T.; CAVALHEIRO, F.; CONTI, J. B. **Ibirapitanga: história, distribuição geográfica e conservação do pau-brasil (caesalpinia echinata LAM., leguminosae) do descobrimento à atualidade**. 2004. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

RODRIGUES, C. R. **Degradação Térmica da Casca de Arroz e Utilização do Carvão Obtido no Processo para Polimento de Águas Cinzas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2019.

RODRIGUES, T. O. **Avaliação dos Impactos Ambientais da Produção de Bio-óleo a partir de Serragem no Estado do Pará**. 2013. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

RUIVO, M. L. P. *et al.* Gestão Florestal e Implicações Sócio-Ambientais na Amazônia Oriental (Estado do Pará). **Oecologia Brasiliensis**, v. 11, p. 481-492, 2007.

SAMANIEGO, M. R. P. **Uso de bicomcombustível da pirolise rápida da palha de cana em um motor de ciclo Otto**. 2007. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

SÁNCHEZ, C. G. **Apostila do curso de Tecnologia de Gaseificação**: IM 338. Curso de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade de Campinas, Campinas, cap. 5, 2003. 16 p.

SCHETINO JR., M. A.; FREITAS, J. C. C.; CUNHA, A. G.; EMMERICH, F. G. Preparação e caracterização de carvão ativado quimicamente a partir da casca de arroz. **Química nova**, São Paulo, v. 30, n. 7, p. 1663- 1668, nov. 2007.

SHEN, L., ZHANG, D. An experimental study of oil recovery from sewage sludge by lowtemperature pyrolysis in a fluidised-bed. **Fuel**, 82, p.465 -476, 2003.

SILVA, C. P. *et al.* Quantificação de Resíduos Produzidos nas Indústrias Madeireiras de Gurupi, TO. **Floram Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, ano 24, 13 jul. 2017.

SILVA, E. M. *et al.* Produção de Carvão através da Pirólise de Serragem. *In*: VIII Jornada de Iniciação Científica e Extensão – JICE, IFTO. Palmas, 2017.

SILVA, E. M. **Obtenção, caracterização e utilização do carvão de serragem como adsorvente para purificação de água**. Palmas, TO. 2018. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2018.

SILVA, L. L. H. *et al.* Características energéticas do carvão vegetal de aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Allemão) e leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) R. de Wit). **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 412-419, jan.- mar., 2018.

STEVENS, C. J. **Evaluation Misuse from the User's Perspective**. New Directions for Program Evaluation 64: Winter, p. 79-84. 1994.

SZABÓ JÚNIOR, A. M. **Educação ambiental e gestão de resíduos**. 2. ed. São Paulo: Rideel, 2010. 118 p.

TEIXEIRA, C. M. *et al.* Caracterização Química de Resíduos de *Eucalyptus* sp. de Floresta de Curta Rotação para a Produção de Bioenergia. **Revista virtual de química**, v.8, n. 4, pp. 1693-1701, Set., 2016.

TUOTO, M. **Levantamento sobre a geração de resíduos provenientes da atividade madeireira e proposição de diretrizes para políticas, normas e condutas técnicas para promover o seu uso adequado**. Projeto PNUD BRA 00/20 - Apoio às Políticas Públicas na Área de Gestão e Controle Ambiental. Curitiba: PNUD, 2009.

VALCARENGHI, Gustavo; RIBEIRO, Luiz Felipe Prata. **Adsorção de azul de metileno de solução aquosa com utilização de pó de serragem de mdf e madeirite e carvão ativado granular**. 2013. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

VARMA, A. K. *et al.* Pyrolysis of wood sawdust: Effects of process parameters on products yield and characterization of products. **Waste Managment**, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, v. 89, p. 224-235, 2019.

VARMA, A. K.; MONDAL, P. Physicochemical characterization and pyrolysis kinetics of wood sawdust. **Energy Sour**, United Kingdom, v. 38, p 2536–2544, 26 set. 2016.

VERÍSSIMO, A.; LIMA, E.; LENTINI, M. **Pólos madeireiros do Estado do Pará**. Belém, Imazon, 2002.

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. **Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia**. Rio de Janeiro: BNDES, 2011. 55 p.

VIDAURRE, G. B. Propriedades energéticas da madeira e do carvão de paricá (*Schizolobium amazonicum*). **Revista Árvore**, v. 36, n. 2, p. 365-371, 2012.

VIDOR, F. L. R. *et al.* Inspection of Wooden Poles in Electrical Power Distribution Networks in Southern Brazil. **IEEE-Institute of Electrical and Electronics Engineers**, Piscataway, Nova Jersey, US, v. 25, p. 479-484, 2010.

VIEIRA, G. E. G. *et al.* Biomassa: uma visão dos processos de pirólise. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 15, n. 24, p. 105-212, jul./dez. 2014.

VIEIRA, R. S. **Uso de madeira de Eucalyptus selecionado para confecção de móveis de alta qualidade**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

VIEIRA, R. V. **Pequenos Objetos de Madeira de Eucalipto: possibilidade de aproveitamento de resíduos**. Lavras, 2006, 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2006.

WARNECKE, R. Gasification of biomass: comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier. **Biomass and Bioenergy**, England, vol. 18, p. 489-497, 2000.

YANG, H. *et al.* Mechanism of palm oil waste pyrolysis in a packed bed. **Energy Fuels**, Washington, D. C., v.20, p. 1321-1328, 2006.

ZENID, G. J. *et al.* **Madeira: uso sustentável na construção civil**. 2. ed. São Paulo: IPT, 2009. 99 p. (IPT Publicação 3010).