

UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGCEM

JOSÉ INÁCIO TUSQUE

DESENVOLVIMENTO DE BRIQUETES DE PÓ DE MADEIRA COM ADIÇÃO DE
RESÍDUOS DE EMBALAGENS POLIMÉRICAS LAMINADAS E FINOS DE
CARVÃO VEGETAL

CRICIÚMA, 2023.

JOSÉ INÁCIO TUSQUE

**DESENVOLVIMENTO DE BRIQUETES DE PÓ DE MADEIRA COM ADIÇÃO DE
RESÍDUOS DE EMBALAGENS POLIMÉRICAS LAMINADAS E FINOS DE
CARVÃO VEGETAL**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito à obtenção do título de mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Matheus Vinicius Gregory Zimmermann.

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Junca.

CRICIÚMA, 2023.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

T964d Tusque, José Inácio.

Desenvolvimento de briquetes de pó de madeira com
adição de resíduos de embalagens poliméricas
laminadas e finos de carvão vegetal / José Inácio
Tusque. - 2023.

52 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo
Sul Catarinense, Programa em Ciência e Engenharia de
Materiais, Criciúma, 2023.

Orientação: Matheus Vinicius Gregory Zimmermann.
Coorientação: Eduardo Junca.

1. Briquetes. 2. Resíduos sólidos urbanos. 3.
Resíduos como combustível. 4. Rejeitos de produção do
carvão - Reaproveitamento. 5. Resíduos poliméricos -
Reaproveitamento. I. Título.

CDD 23. ed. 662.6

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla - CRB 14/1101
Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

José Inácio Tusque

Desenvolvimento de briquetes de pó de madeira com adição de resíduos de embalagens poliméricas laminadas e finos de carvão.

Esta Dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre(a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 30 de março de 2023.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **SABRINA ARCARO**
Data: 09/12/2025 15:29:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª Drª Sabrina Arcaro
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Documento assinado digitalmente
 **FABIANO RAUPP PEREIRA**
Data: 09/12/2025 17:35:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Fabiano Raupp Pereira
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Documento assinado digitalmente
 **LILIAN VANESSA ROSSA BELTRAMI**
Data: 16/12/2025 09:53:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª Drª Lillian Vanessa Rossa Beltrami
Universidade de Caxias do Sul - UCS

AGRADECIMENTOS

A Deus, por guiar meus passos.

A minha família por acreditarem em mim e por terem dado todo suporte.

Aos meus avós Zelindra Citadin Tusque e Antônio Pereira Tusque pelo apoio e pela referência que foram em toda a minha vida.

Ao meu aluno e amigo Lucas Eduardo Dias de Oliveira pela inspiração que me repassa todos os dias.

Aos meus orientadores, professor Dr. Matheus Vinícius Gregory Zimmermann e professor Dr. Eduardo Junca pelo apoio, orientação e conhecimento passados durante esses anos.

Ao meu supervisor Gabriel Antunes Pires e a toda equipe do SENAI de Campos Novos/SC e Capinzal/SC pelo apoio repassado.

Ao Laboratório de Valoração de Resíduos - LabValora/ UNESC pelas análises.

A UNESC e aos demais professores e colaboradores do Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM.

Aos membros da Banca avaliadora.

Muito obrigado!

“O mundo que iremos deixar para nossos filhos, dependerá dos
filhos que iremos deixar para o nosso mundo”.

(Rodrigo Milla)

RESUMO

Nos últimos anos, está cada vez mais evidente a necessidade de reduzir o impacto ambiental causado pela população mundial. O briquete surge como uma solução atraente e viável para reutilização de resíduos sólidos urbanos e industriais. A utilização de briquetes com incorporação de resíduos sólidos visa gerar energia térmica através da combustão, podendo ser utilizada em diversos meios industriais e comerciais. A incorporação de embalagens poliméricas multicamadas e finos de carvão vegetal juntamente ao pó de serragem, tem por objetivo eliminar a dificuldade que esses resíduos geram de armazenamento e reutilização para as indústrias. Tendo em vista que, os polímeros e o carvão vegetal apresentam um potencial calorífico superior ao da madeira, neste trabalho foi desenvolvido um método para confecção de amostras de briquetes a partir da mistura desses três resíduos (madeira, carvão e plástico) e realizada as análises das propriedades térmicas e físicas dos briquetes. Os principais resultados indicam que a incorporação dos resíduos de finos carvão prejudicam a compactação do briquete, pela ausência de ligantes. Já a adição de resíduos de plástico funde na temperatura de processamento, promovendo aglomerados heterogêneos na estrutura do briquete. Já na análise cinética de degradação mostrou que a os resíduos de carvão e plástico apresentaram menor teor de cinzas e (energia de ativação). A incorporação dos resíduos de finos de carvão e plásticos trouxe significativo aumento no poder calorífico do briquete, sendo que a composição mista com 80% de madeira, 10% de carvão e 10% de plástico a amostra que apresentou maior poder calorífico.

Palavras-chave: Resíduos, Briquete, Polímero, Carvão, Poder Calorífico.

ABSTRACT

In recent years, the need to reduce the environmental impact caused by the world's population has become increasingly evident. The briquette emerges as an attractive and viable solution for the reuse of urban and industrial solid waste. The use of briquettes incorporating solid residues aims to generate thermal energy through combustion, which can be used in various industrial and commercial environments. The incorporation of multilayer and fine polymeric packages of charcoal together with sawdust, aims to eliminate the difficulty that these residues generate in storage and reuse for industries. Bearing in mind that polymers and charcoal have a higher calorific potential than wood, this work developed a method for making briquette samples from the mixture of these three residues (wood, charcoal and plastic) and carried out the analyzes of the thermal and physical properties of the briquettes. The main results indicate that the incorporation of fine coal residues impairs the compaction of the briquette, due to the absence of binders. The addition of plastic waste melts at the processing temperature, promoting heterogeneous agglomerates in the briquette structure. The kinetic analysis of degradation showed that the coal and plastic residues had lower ash content and (activation energy). The incorporation of fine charcoal and plastic residues brought a significant increase in the calorific value of the briquette, with the mixed composition of 80% wood, 10% charcoal and 10% plastic being the sample that presented the highest calorific value.

Keywords: Waste, Briquette, Polymer, Coal, Calorific Value.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparativo entre lenha e briquete.	18
Figura 2 - Aplicações setoriais de plástico.	20
Figura 3 - Representação de uma estrutura de filme flexível laminado: PEBDL / PET.	22
Figura 4 - Campos de aplicação de materiais plásticos e tipos de polímeros predominantemente utilizados em embalagens.	23
Figura 5 – Macroetapas das atividades desenvolvidas.	30
Figura 6 – (a) imagem fotográfica da prensa térmica a ser utilizada, (b) dimensões do molde a ser utilizado no processo e (c) imagens fotográficas do processamento e produto (briquete) resultante do parâmetro informado.	32
Figura 7 – Análise termogravimétrica dos constituintes originais das amostras de briquete. ...	36
Figura 8 – Análise termogravimétrica do pó de serragem para as taxas de 5°C/min, 10°C/min e 15°C/min.	38
Figura 9 - Análise termogravimétrica do polímero multicamadas laminadas para as taxas de 5°C/min, 10°C/min e 15°C/min.	39
Figura 10 - Análise termogravimétrica do polímero multicamadas laminadas para as taxas de 5°C/min, 10°C/min e 15°C/min.	40
Figura 11 - Relação entre $\log \beta \times 1/T$ para a amostra de madeira de <i>Pinus Elliottii</i>	40
Figura 12 - Relação entre $\log \beta \times 1/T$ para a amostra do polímero multicamadas.	42
Figura 13 – Relação entre $\log \beta \times 1/T$ para a amostra de finos de carvão vegetal.	43
Figura 14 - Imagens fotográficas dos briquetes de madeira com e sem a adição dos resíduos.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição e nomenclatura das amostras.	31
Tabela 2 – Resultados da análise elementar.	36
Tabela 3 – Valores de Energia de Ativação para gaseificação do pó de serragem <i>Pinus Elliottii</i>	41
Tabela 4 – Valores de Energia de Ativação para gaseificação do polímero multicamadas laminadas.	42
Tabela 5 – Valores de Energia de Ativação para gaseificação dos finos de carvão vegetal. ...	43
Tabela 6 – Densidade média das amostras.	45
Tabela 7 – Resultados obtidos para o poder calorífico das amostras de briquetes.	46

LISTA DE ABREVIACÕES E SBOLOS

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

PE = Polietileno

PET = Poli(tereftalato de etileno)

TG = Termogravimetria

ton = Toneladas

MPa = Mega Pascal

MJ = Mega Joules

Ea = Energia de ativação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS.....	16
2.1.	OBJETIVO GERAL	16
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1.	BRIQUETES PRODUZIDOS COM BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA.....	17
3.2.	VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS – UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM BRIQUETES	19
3.3.	RESÍDUOS POLIMÉRICOS	20
3.4.	CARVÃO VEGETAL	24
3.5.	PROCESSO DE BRIQUETAGEM.....	25
4	MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1.	OBTENÇÃO DOS MATERIAIS.....	30
4.2.	PREPARAÇÃO DOS RESÍDUOS	31
4.3.	PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS.....	31
4.4.	CARACTERIZAÇÕES	32
4.4.1	Densidade Aparente.....	32
4.4.2	Análise Elementar.....	33
4.4.3	Cinética de Degradação	33
4.4.4	Poder Calorífico.....	34
4.4.5	Densidade Energética	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
6	CONCLUSÃO	47
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	48
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um grande produtor nos ramos florestais e agrícola devido à sua imensa área para cultivo, à possibilidade de implantação de diferentes culturas, à posição no globo favorável à intensa radiação solar durante o ano, ao clima tropical, além de grande biodiversidade e alta tecnologia, o que o coloca em uma posição privilegiada no ramo das ciências agrárias. No entanto, a alta produção também gera uma grande quantidade de resíduos, os quais podem causar graves problemas ambientais. Atrelado a isso, a busca por formas alternativas de energia se demonstra de grande importância para o cenário energético atual. O mundo está em processo acelerado de urbanização, o que resulta em uma maior demanda e consumo de energia.

Em 2013, segundo dados do BEN (2014), a matriz energética do Brasil foi representada pelo uso em mais de 39,3% nas fontes derivadas do petróleo, 12,8% de gás natural, 5,6% de carvão mineral e 1,3% do urânio. O consumo de fontes energéticas renováveis correspondeu a 16,1% de biomassa de cana, 12,5% de energia hidráulica, 8,3% lenha e carvão vegetal e 4,2% lixo.

O Brasil é um dos grandes produtores e consumidores de carvão vegetal do mundo, respondendo por de 30% da produção global. Aproximadamente de 80% da produção nacional é destinada a siderurgia para a produção de ferro gusa, ferro ligas e aço. Além desse setor, o carvão possui inúmeras funcionalidades, como o uso doméstico, carvão metalúrgico, carvão para gasogênio, carvão ativo, carvão para a indústria química e carvão para a indústria de cimento, além da geração de energia elétrica em termelétricas (AMS, 2009).

No ano de 2012, o Brasil registrou 6,51 milhões de hectares de área total plantada de eucaliptos e pinus. Aproximadamente 46,8% do carvão vegetal consumido no Brasil é proveniente de florestas nativas e o restante provém de florestas plantadas (AMS, 2012).

A reciclagem ou a reutilização de materiais são cruciais para que os conceitos de sustentabilidade possam estar de acordo e em sincronia com a economia, meio ambiente e sociedade. A necessidade de reciclar os mais diversos resíduos industriais tem impulsionado cada vez mais estudos científicos que visam minimizar o impacto ambiental provocado pelo acúmulo destes resíduos, através do desenvolvimento de aplicações adequadas aos mesmos (RESCHKE, 2003).

De acordo com Vale e Gentil (2008), resíduo é todo material descartado nas atividades de um processo produtivo, podendo tornar-se um risco para o meio ambiente e para a

sociedade. Porém, eles podem deixar de ser um risco transformando-se em matéria-prima para diversos outros processos, reduzindo o preço e a demanda do produto principal.

Neste sentido, o uso de resíduos para produção de briquetes para queima pode contribuir com a sustentabilidade do segmento. Segundo Benício (2011), a briquetagem utiliza a compactação de biomassas para a produção de combustíveis sólidos com excelente balanço de propriedades físicas, químicas e caloríficas.

A utilização de briquetes possui as seguintes vantagens: são produzidos em tamanho padrão, espaço de armazenagem reduzido, produto higiênico sem os inconvenientes da lenha, produto totalmente reciclado, haja vista que se trata de um combustível renovável, quando produzido com produtos lignocelulósicos, que permite o aproveitamento de resíduos dos mais diversos segmentos, como carvão, diesel, poliméricos, entre outros.

Os briquetes podem ser utilizados em diversas empresas que possuam forno ou caldeira para a queima direta, como exemplo: padarias, pizzarias, frigoríficos, olarias e churrasarias.

Ainda sobre o alvo de estudo desse trabalho, a embalagem é conhecida como um invólucro destinado a proteger os produtos contra os danos mecânicos durante o manuseio, transporte e estocagem, preservando-os para posteriormente serem consumidos ou usados sem que ocorra uma perda. Devido ao aumento na população mundial, a nova demanda da sociedade por embalagens cada vez menores, mais leves e resistentes, permitiu o desenvolvimento tecnológico de novos materiais e processos que permitem a substituição do uso de embalagens de materiais como alumínio e vidro por materiais poliméricos. Porém devido a preocupação ambiental, algumas industriais estão voltando a utilizar embalagem em materiais como vidro e aço. Isso se deve ao fato da dificuldade em reutilizar ou reciclar filmes poliméricos multicamadas.

A biomassa e seus resíduos são combustíveis sólidos que podem ser utilizados diretamente na condição em que se encontram, sob controle de umidade e podem ser transformados por processos mecânicos em partículas menores, como cavacos ou, mesmo, serragem ou, ainda, adensados na forma de briquetes (VALE & GENTIL, 2008).

Froehlich et al., 2012 relata que o aproveitamento do volume total de uma tora na indústria madeireira é estimado em apenas 40 a 60%, ou seja, de cada dez árvores cortadas aproximadamente cinco são aproveitadas em sua totalidade para gerarem algum produto final.

Segundo Tuoto (2009) no Brasil são geradas aproximadamente 30 milhões de toneladas de resíduos provenientes da madeira anualmente tendo como principal fonte geradora de resíduos a indústria madeireira. Esse ramo contribui com 89% dos resíduos de madeira gerados, gerando um total de aproximadamente 27 milhões de toneladas por ano.

Enquanto que o meio urbano e a construção civil, por exemplo, representam um total de 3% e o meio urbano de 8%. As indústrias madeireiras enfrentam diversos problemas relacionados ao acúmulo desses resíduos, como por exemplo, a estocagem deles em áreas de preservação permanentes por falta de demanda.

2 OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar as propriedades físicas e caloríficas de briquetes produzidos com pó de serragem após a incorporação de resíduos de embalagens poliméricas multicamadas e finos de carvão vegetal na composição.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o efeito da incorporação de diferentes teores de resíduos de finos de carvão e embalagens plásticas multicamadas na composição de briquetes produzidos com pó de serragem de pinus.
- Avaliar a cinética de degradação e energia de ativação dos constituintes originais do briquete (madeira, carvão e plástico).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. BRIQUETES PRODUZIDOS COM BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

Nos dias atuais, a busca por novas alternativas para produção de energia, tem sido alvo de diversos estudos e pesquisas científicas. Neste sentido, o uso de resíduos de biomassa é apontado como uma grande opção que pode contribuir para o desenvolvimento sustentável nas áreas ambiental, social e econômica e pode ser utilizada em conjunto com os combustíveis fósseis (BERMANN, 2008).

Biomassa é todo material considerado orgânico, de origem não fóssil, que possua energia disponível para queima, isso inclui todos os tipos de vegetais, ou seja, toda matéria orgânica de origem vegetal que pode ser utilizada na geração de energia (OMACHI, 2004).

Os briquetes são considerados materiais combustíveis, produzidos a partir da compactação de resíduos lignocelulósicos na forma de pó, utilizando pressão e temperatura (SILVA, 2007). Um briquete pode ser fabricado a partir de vários tipos de resíduos orgânicos, tendo assim características diferentes de acordo com as propriedades de cada matéria-prima usada (DANTAS, 2012).

O processo de produção de briquetes, chamado de briquetagem, consiste na densificação de biomassa, com o uso de prensadas, briquetadores ou pressão, com ou sem aquecimento. As pequenas partículas são prensadas, geralmente com ligante adequado, para formar sólidos com formato definido e alta densidade, que possuem maior valor comercial (FAAIJ, 2005).

Segundo Fontes (1984), por meio da briquetagem obtêm-se um combustível com homogeneidade granulométrica, densidade maior e resistência à geração de finos. O aumento da densidade proporcionado por esse processo produz um combustível com maior concentração energética por unidade de volume que, aliado à resistência mecânica adquirida, viabiliza técnica e economicamente o transporte a distâncias maiores. Além disso, os briquetes apresentam constituição homogênea e formato regular.

Resíduos lignocelulósicos são caracterizados por conterem lignina e celulose na sua constituição sendo, na maioria das vezes, de origem vegetal. Rejeitos provenientes da madeira ou da indústria madeireira, móveis velhos, restos de madeira de demolições, resíduos de culturas agrícolas e de beneficiamento de produtos agrícolas são exemplos. Outra grande fonte geradora de resíduos lignocelulósicos é a exploração florestal para beneficiamento de peças de madeira (RAMOS & PAULA, 2010).

Os resíduos originados do processamento da madeira em indústrias madeireiras ou moveleiras, geralmente apresentam formas e granulometria bastante heterogênea, baixa densidade e elevado teor de umidade (QUIRINO, 2004).

Os briquetes podem ser produzidos utilizando apenas um material lignocelulósico ou uma mistura entre diversos materiais. É comum adicionar serragem em briquetes com outros materiais e o carvão vegetal, para aumentar o poder calorífico. (QUIRINO, 2004).

Dentre os vários materiais lignocelulósicos podem-se utilizar casca e galho de árvores, aparas de madeira, serragem, maravalhas, bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, palha, caule e sabugo de milho, dentre outros.

De acordo com Vale e Gentil (2008) a preocupação com a poluição e o uso dos resíduos gerados pela utilização da biomassa vegetal não pode ser deixada de lado. Na maioria das vezes os resíduos vegetais são descartados de forma inadequada ou queimados diretamente para sua eliminação, causando impactos ambientais devido ao aumento considerável na poluição do meio ambiente, além de representar perdas de matéria prima e energia.

Silveira e Lopes (2010) citam que a principal característica dos briquetes é ter volume menor do que os resíduos originais, é reciclável, tem o mesmo poder calorífico e durabilidade de três vezes superior a da lenha, ter formato homogêneo e tamanho programado facilitando assim o transporte e manuseio. A Figura 1 representa uma tabela e faz um comparativo entre briquete e lenha onde são apresentadas as vantagens que o briquete traz com relação a lenha.

Figura 1 – Comparativo entre lenha e briquete.

	LENHA	BRIQUETE
PODER CALORÍFICO	Baixo: 1700 – 2500 kcal/kg	Alto: 4000 – 4800 kcal/kg
UMIDADE	Alta: 20 a 45%	Baixa: 8 a 12%
RENDIMENTO	Irregularidade térmica, baixa uniformidade e temperatura de chama	Regularidade térmica, alta uniformidade e temperatura de chama
RESÍDUOS DE CINZA, FULIGEM, FUMAÇA	Alto volume	Baixo volume
MANUSEIO, MÃO DE OBRA	Dificuldade por não existir uniformidade, trabalhoso	Facilidade por ter forma e embalagem padronizada
ESPAÇO FÍSICO – ARMAZENAMENTO	Ocupação de grande espaço	Ocupa pequeno espaço
HIGIENE, LIMPEZA	Sujeita, umidade, bichos, contaminação	Limpo, seco, sem bichos e contaminação
LICENÇA AMBIENTAL	Necessidade de licenciamento e guia de transporte ATPF/RET do IBAMA, com taxas a pagar	Dispensado de guia de transporte e fiscalização. Sem Custos
COMERCIALIZAÇÃO	Por m ³ (Impreciso)	Por Peso (Exato)

Fonte: CAIRES, R. R., 2010.

3.2. VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS – UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM BRIQUETES

Segundo Ramos e Paula (2010) cita que resíduos lignocelulósicos são resíduos que contém lignina e celulose na sua constituição sendo, na maioria das vezes, de origem vegetal. Como por exemplo, rejeitos provenientes da madeira ou da indústria madeireira, móveis velhos, restos de madeira de demolições, resíduos de culturas agrícolas ou de beneficiamento de produtos agrícolas, postes, estacas, palletes e outros. A exploração florestal é uma grande fonte de resíduos lignocelulósicos, uma parte significativa destes resíduos provenientes de utensílios e embalagens em madeira é encontrada também no lixo urbano (RAMOS & PAULA, 2010).

Os resíduos originados do processamento da madeira em indústrias madeireiras ou moveleiras, palletes em desuso, móveis velhos, artigos de madeira em geral, estacas, moirões, galhos de árvores podadas, resíduos de culturas agrícolas, como palha de arroz, bagaço de cana-de-açúcar etc, são resíduos lignocelulósicos. Os resíduos lignocelulósicos geralmente apresentam formas e granulometria bastante heterogênea, baixa densidade e elevado teor de umidade (QUIRINO, 2004).

O aumento da geração de resíduos sólidos se deve muito ao fato da população mundial de consumidores também ter aumentado consideravelmente e isso fez com que o armazenamento e tratamento desses resíduos se tornassem cada vez mais difícil. Essa dificuldade pode gerar uma contaminação do meio podendo afetar tanto a população local quando a fauna e a flora.

Marques (2011) afirma que a geração de resíduos causa impactos negativos como alteração de paisagem devido à poluição visual, a liberação de maus odores ou substâncias químicas voláteis pela decomposição dos resíduos. Ainda, materiais particulados podem ser dispersos pela ação do vento ou serem liberados juntamente a gases tóxicos quando os resíduos são queimados.

Outra problemática é devido à má disposição desses resíduos, Castilho Junior (1988) afirma que o lançamento destes resíduos em encostas onde a topografia é acidentada aumenta o risco de deslizamentos do solo. As características químicas são associadas aos impactos, como poluição e contaminação química por substâncias perigosas presentes nos resíduos, carregadas pela infiltração de lixiviado no solo e nos aquíferos subterrâneos ou quando este atinge os corpos d'água devido ao escoamento superficial.

3.3. RESÍDUOS POLIMÉRICOS

Antigamente, a embalagem consistia em um único material como frascos de vidro, garrafas de refrigerante de poli(tereftalato de etileno) (PET) ou latas de metal. Porém, esses materiais tem uma limitação que inibe sua utilização mais ampla: o vidro é pesado e frágil, o PET não fornece uma barreira de oxigênio suficiente para muitos produtos e o metal não é transparente, por exemplo. Ao combinar diferentes materiais, podemos obter os conceitos ideais de embalagem, assim como seus requisitos, que também podem ser adaptados (MORRIS, 2016).

Desde a invenção do polietileno (PE) e polipropileno (PP) nos anos cinquenta, os plásticos atingiram quase todas as áreas de nossas vidas. A produção global de materiais plásticos em 2018 foi de cerca de 359 milhões de toneladas, o que representa um aumento de 40% em uma década. Este sucesso é largamente atribuído ao baixo custo, baixa densidade e inúmeras propriedades mecânicas e térmicas que tornam os plásticos adequados para uma ampla gama de aplicações. Os maiores mercados de uso final de plásticos são os setores de embalagens (38%) e de construção civil (19%) conforme pode-se observar na Figura 2 (PLASTIC EUROPE, 2017).

Figura 2 - Aplicações setoriais de plástico.



Fonte: Picplast, 2018 (<http://www.picplast.com.br/>)

Polímero é qualquer material orgânico ou inorgânico, sintético ou natural que tenha um alto peso molecular e variedades estruturais repetitivas (monômeros) ligadas entre si através de ligações primárias e estáveis. Os plásticos são polímeros orgânicos, sintéticos ou derivados

de compostos orgânicos que podem ser moldados de diversas formas sob certas condições de calor e pressão (MANRICH, 2005).

Os polímeros podem ser classificados de diferentes maneiras, dependendo do objetivo de quem os classifica. As formas mais comuns de classificação são: do ponto de vista da estrutura química; do método de preparação; das características tecnológicas e do comportamento mecânico (MANRICH, 2005).

Um dos resíduos poliméricos que tem chamado atenção, pela sua dificuldade de reciclagem são os filmes e chapas multicamadas. As chapas multicamadas são compostas por pelo menos duas camadas de materiais diferentes, e são comumente utilizadas em embalagens de produtos industrializados, tendo como função básica conter, proteger e apresentá-los de maneira atrativa ao consumidor final.

Filmes plásticos flexíveis multicamadas podem ser utilizados como embalagem de produtos em função de propriedades importantes como resistência mecânica, barreira ao oxigênio, brilho e transparência, aliados à facilidade de processamento e um custo compatível. As aplicações em embalagens requerem polímeros com boas propriedades de barreira, que resultam na obtenção de um longo período de *shelf-life* (tempo de exposição para o consumo) para o produto. Entretanto, quando utilizado um polímero simples na composição da chapa de embalagem, torna-se muito difícil de obter todas as propriedades requeridas, já que, por exemplo, um polímero com boas propriedades de barreira ao oxigênio, pode apresentar baixas propriedades de barreira à água, enquanto que outro polímero pode apresentar comportamento oposto (BELTRAME, 1999).

Entre todos os materiais plásticos, os filmes flexíveis estão se tornando cada vez mais populares, principalmente devido à sua versatilidade, leveza, resistência e capacidade de impressão, entre outras propriedades. Uma tendência atual, por exemplo, é substituir as embalagens rígidas de bebidas por materiais flexíveis (AMI, 2017).

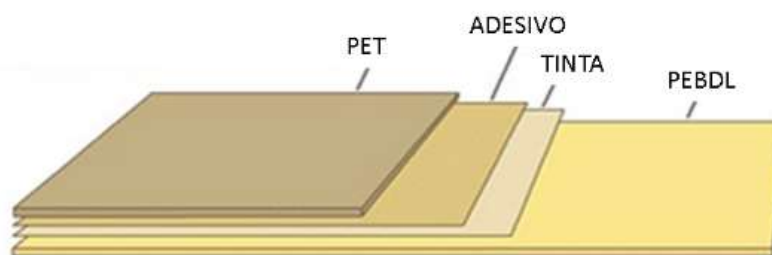
. Os filmes multicamadas possuem mais de uma estrutura, unidas entre si, que podem ser materiais poliméricos (termoplásticos) ou não poliméricos (papel ou folhas de alumínio). Atualmente, é possível produzir filmes de 2 a 17 camadas, com diferentes tipos de barreiras.

Uma embalagem de duas camadas consiste em um lado interno, de contato com o produto, e uma camada externa, que fica exposta ao consumidor. Normalmente, neste caso a camada interna fornece vedabilidade e a camada externa proteção contra abrasão da tinta, barreira e auxilia na resistência da embalagem. A camada de selante fornece vedação em altas velocidades de linha de empacotamento e também pode contribuir para o desempenho da barreira. O polietileno de baixa densidade linear (PEBDL) é usado com objetivo de atribuir uma melhor selagem para esta camada. Como essas resinas não possuem rigidez, a

integridade estrutural e resistência da embalagem são adquiridas através da camada externa da embalagem, que também pode trazer uma funcionalidade adicional. O poli(tereftalato de etileno) (PET) ou a poliamida (PA) quando adicionados na embalagem, contribuem para o aumento de resistência e apresentam baixa permeabilidade aos gases (melhor barreira), enquanto que o poli(tereftalato de etileno) recoberto por alumino (PET Metalizado), além das características do PET, contribui significativamente com o aumento do *shelf-life* do produto envasado (KAISER, 2017).

Para unir os respectivos filmes da embalagem é utilizado um conjunto de adesivo e catalisador entre as camadas que permite a laminação dos substratos. Em muitos casos, a impressão inversa é aplicada, o que significa que os filmes são impressos e laminados em uma camada de selante com o lado de impressão voltado para dentro para garantir a proteção do lado externo pela camada do filme, conforme pode-se observar na Figura 3 (KAISER, 2017).

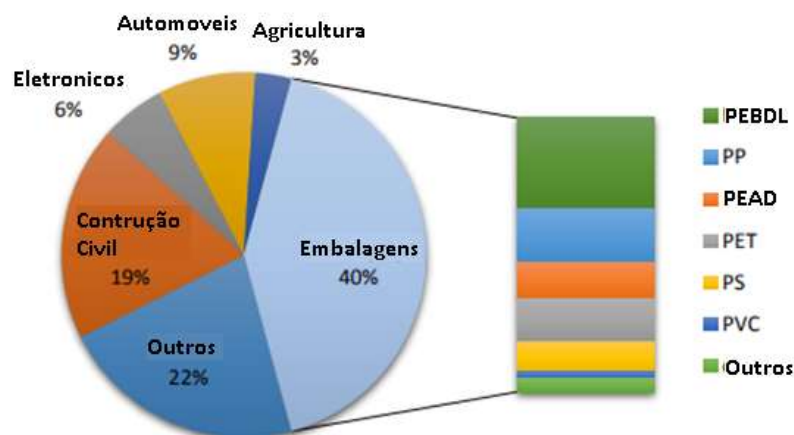
Figura 3 - Representação de uma estrutura de filme flexível laminado: PEBDL / PET.



Fonte: Dário, 2020.

A Figura 4 apresenta os principais polímeros utilizados na fabricação de embalagens multicamadas. Uma razão para o crescente número de embalagens multicamadas é que os custos podem ser reduzidos pela adição de um número adicional de camadas, diminuindo assim a quantidade de material, em comparação com o que seria necessário para que uma única camada desempenhasse a mesma função. Adicional a isto, a estrutura multicamadas permite que o material execute uma combinação de funções que não é possível com uma única camada (EBNESAJJAD, 2013).

Figura 4 - Campos de aplicação de materiais plásticos e tipos de polímeros predominantemente utilizados em embalagens.



Fonte: Kaiser (2017).

Deve-se salientar uma desvantagem dos resíduos plásticos: o impacto negativo que podem causar ao meio ambiente. Devido à sua baixa degradação, esses materiais formam um resíduo de grande volume, agravando os problemas dos aterros sanitários ou, quando não são corretamente descartados, contribuem para a poluição das cidades e tornam-se, inclusive, foco de doenças por acumularem água em seu interior (ALMEIDA, 2010).

Nesse sentido, a reciclagem e o reuso de produtos plásticos tornaram-se assuntos de grande importância, alvos de preocupação de muitos cientistas, que, cada vez mais, procuram reaproveitar esses materiais (STRONG, 1996).

Como evidenciado pelo Fórum Econômico Mundial em 2017, apenas 14% das embalagens plásticas, que atualmente representam a maior aplicação dos plásticos produzidos, são coletadas globalmente para reciclagem, enquanto 72% não são recuperadas, gerando significativa degradação de sistemas naturais. Por outro lado, os benefícios potenciais da reciclagem de embalagens flexíveis, em termos de eficiência de recursos, desvio de aterros e economia de emissões, são muito altos, considerando que esses tipos de embalagem estão ganhando rapidamente participação de mercado de outros setores, como embalagens rígidas tradicionais (GAROFALO, 2018).

Segundo Ehrig (1992), a reciclagem de polímeros pode ser classificada em quatro categorias:

Reciclagem primária: consiste na conversão dos resíduos poliméricos industriais por métodos de processamento padrão em produtos com características equivalentes àsquelas dos produtos originais produzidos com polímeros virgens, por exemplo, aparas que são novamente introduzidas no processamento (polímero pós-industrial).

Reciclagem secundária: conversão dos resíduos poliméricos provenientes dos resíduos sólidos urbanos (pós-consumo) por um processo ou uma combinação de processos em produtos que tenham menor exigência do que o produto obtido com polímero virgem, por exemplo, reciclagem de embalagens de PP para obtenção de sacos de lixo.

Reciclagem terciária ou reciclagem química: processo tecnológico de produção de insumos químicos ou combustíveis a partir de resíduos poliméricos.

Reciclagem quaternária ou reciclagem energética: processo tecnológico de recuperação de energia de resíduos poliméricos por incineração controlada.

É necessária uma atenção especial aos métodos de reciclagem que envolvam o processo de incineração, pois diversos agentes maléficos a saúde humana podem ser liberados, como por exemplo, a combustão de polímeros que contenham altos teores de cloro ou enxofre.

3.4. CARVÃO VEGETAL

O carvão vegetal é produzido através da carbonização da madeira, caracterizando assim um processo de decomposição térmica. A fabricação do carvão vegetal pode envolver processos industriais modernos. No entanto, no Brasil, na maioria dos casos são utilizados métodos rudimentares com uso de fornos de alvenaria, cada qual tendo características específicas de produção (CENBIO, 2008).

Um problema relacionado à característica física do carvão vegetal é sua capacidade de se fragmentar em pequenos pedaços de acordo com seu manuseio (friabilidade). Durante as fases de produção, transporte, armazenamento e manuseio o carvão gera em torno de 25% de finos, dificultando ou inviabilizando a sua utilização devido a sua forma geométrica. Uma possível solução para estes finos de carvão vegetal é o processo de briquetagem (QUIRINO, 1991). Na utilização em alto-fornos onde são desejáveis carvão com alta resistência e formato geométrico específico, esses finos são indesejáveis (FONTES et al. 1989).

O processo de briquetagem de finos de carvão vegetal surge então como uma forma de agregar valor a esse resíduo, aumentando a sua densidade energética, gerando assim mais energia em um menor volume, facilitando o transporte e armazenamento desses materiais por proporcionar uma forma geométrica homogênea, com a vantagem de reduzir o impacto de exploração irracional das florestas.

3.5. PROCESSO DE BRIQUETAGEM

A recente preocupação ambiental resultou em leis mais rígidas, fazendo com que a briquetagem ganhasse um novo impulso de aplicação no meio industrial. Hoje ela é uma excelente alternativa para a reutilização de rejeitos industriais, como por exemplo, os finos de carvão vegetal, turfa, plásticos, lixo biológico, limalhas metálicas e outros.

Outra grande vantagem da briquetagem é a possibilidade de aproveitamento de resíduos lignocelulósicos carbonizados em geral (FONTES, 1984).

Quanto às condições para produção de briquetes, as técnicas utilizadas de compactação podem ser classificadas em duas categorias, as do Tipo A – compactação quente e com alta pressão e as do Tipo B – compactação fria e com baixa pressão. A do tipo B é a mais importante em relação à variedade de materiais que pode processar e as características dos produtos obtidos, tanto que se tornou o mais comum e o termo compactação usualmente se refere a esse tipo de técnica. A outra categoria, em condições de elevada pressão, permite a obtenção de um produto com maior densidade e maior durabilidade, principalmente em relação a manuseio e transporte (OLIVEIRA, 2013).

Em relação aos tipos de operação, os processos de compactação podem ser subdivididos em duas categorias: Tipo 1 – Compactação feita de uma só vez e Tipo 2 – Compactação contínua, (BHATTACHARYA, 2004).

Atualmente, devido as pressões ambientais supracitadas pela otimização no uso de recursos naturais, busca-se desenvolver metodologias para a briquetagem de resíduos, sendo que todo resíduo de origem vegetal pode ser compactado, bastando atender às necessidades de granulometria e teor de umidade exigidos pelo processo (OLIVEIRA, 2013).

Segundo Silva (2007), embora a compactação seja uma tecnologia bastante conhecida, não há um consenso científico a respeito do processo mecânico mais adequado para efetuar-se a compactação da biomassa. Os equipamentos empregados podem ser classificados em quatro grupos: prensa peletizadora, prensa extrusora de pistão mecânico, prensa hidráulica e prensa extrusora de rosca sem fim.

Prensa peletizadora: opera pelo processo extrusivo. É o princípio dos equipamentos de produção de ração animal, onde existe a necessidade de injeção de vapor para aquecer a corrigir a umidade (SILVA, 2007).

Prensa extrusora de pistão mecânico - tecnologia desenvolvida desde o princípio do século e bastante conhecida no mundo. Um pistão ligado excêntricamente a um volante força o material que será compactado por meio de um cone (SILVA, 2007).

Prensa hidráulica - equipamento que usa um pistão acionado por força hidráulica. O material a ser compactado é alimentado lateralmente por uma rosca sem fim. Uma peça frontal ao embolo abre e expulsa o briquete quando se atinge a pressão desejada. Não é um processo extrusivo e a pressão aplicada geralmente é menor que em outros métodos, produzindo briquetes de menor densidade. (SILVA, 2007).

Prensa extrusora de rosca sem fim: processo comum para resíduos, no qual uma rosca sem fim produz briquetes com furo central em um processo contínuo. É importante comparar estes processos com relação à exigência de umidade do resíduo, em função do consumo de energia na secagem. As extrusoras de rosca e de pistão mecânico trabalham com material a 10-12% de umidade. As de pistão hidráulico aceitam material com 18-20% de conteúdo de umidade. As peletizadoras trabalham com resíduos com até 20% de conteúdo de umidade, usando pressões que variam de 80 a 320 kg/cm². De qualquer maneira, a umidade que permanece no briquete após a prensagem virá a reduzir seu poder calorífico (SANTOS, 2008).

No Brasil, não há normas específicas para análise de propriedades de biomassa compactada, embora a produção de briquetes e péletes existam há muitos anos. O que se observa é que estudos relacionados ao assunto utilizam métodos de análise próprios ou adaptam normas ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), utilizadas para o carvão vegetal. O principal movimento para normatização de péletes e briquetes no Brasil é do Serviço Florestal Brasileiro (SFB/MMA) que propõe classes de qualidade para briquetes e péletes, baseadas no respectivo teor de cinzas, no tipo de utilização (industrial ou doméstica), na origem dos resíduos e no processo de fabricação (BRAGA, 2015).

Para obtenção de um briquete de boa qualidade, a escolha do aglutinante, caso seja necessária, e dos resíduos que serão utilizados é fundamental. O teor de umidade, cinzas e tamanho de partículas são fatores que comprometem a qualidade do briquete (COSTA, 2010).

Moro (1987), estabeleceu as seguintes etapas para o processo de briquetagem:

- **Escolha do material:** esta etapa refere-se ao tipo da matéria prima que será utilizada, do tipo de briquete que se pretende produzir e das características do material (tamanho de partículas, densidade e umidade) a ser utilizado;
- **Secagem:** tem por finalidade extrair a umidade dos resíduos selecionados, a fim de deixar o material com a faixa de umidade necessária para a realização do processo;
- **Moagem dos resíduos:** tem por objetivo triturar os resíduos, formando partículas menores. Desse modo facilitando o processo e a ação de aglutinantes se estes forem necessários;
- **Peneiramento:** visa promover a separação por tamanho das partículas geradas na moagem em granulometrias diferentes;

- **Mistura com aglutinante:** o aglutinante é responsável pela aderência das partículas dos resíduos. Essa escolha influencia diretamente no custo do processo e deve-se levar em consideração a escolha do tipo e da qualidade do aglutinante. Esta etapa nem sempre ocorre, pois alguns resíduos são capazes de se aglutinar apenas com a plastificação da lignina em ambiente de alta pressão e temperatura;

- **Prensagem:** a prensagem proporciona resistência aos briquetes. É realizada por meio da ação de prensas que aplicam altas pressões e temperaturas a massa de resíduos e ao ligante. Esta etapa define a forma final do briquete, de acordo com a presa utilizada;

- **Estocagem e embalagem:** os briquetes devem ser armazenados em silos de estocagem a fim de manter um estoque intermediário entre a produção e a distribuição. Posteriormente poderão ser embalados para o consumo.

Para Ginâni (2013), existem diversas variáveis que podem afetar a compactação dos resíduos durante o processo de briquetagem. Nesse sentido, têm-se as propriedades do próprio resíduo, tais como tamanho, umidade e a densidade; bem como as variáveis do processo pelo qual esse material é submetido, especialmente, pressão e temperatura. Dentre os fatores que afetam a produção do briquete estão: massa específica; tamanho das partículas; teor de umidade; teor de voláteis; teor de cinzas; carbono fixo.

Para Rodrigues (2010), a briquetagem reduz o volume de matéria-prima, característica importantíssima para matérias que apresentam baixa densidade. Todavia, para densificar esse tipo de material requer uma maior demanda de energia no processo e, materiais que apresentam alta densidade, não teriam muito interesse pelo fato do pouco ganho de densificação. Uma solução interessante, tendo em vista estes tipos de materiais com densidades diferentes, seria fabricar briquetes através da mistura destes resíduos. (RODRIGUES, 2010; NWABUE, 2017).

A granulometria dos resíduos também influencia na qualidade do briquete, ou seja, quanto menor a partícula melhor o processo de carbonização e maior a resistência mecânica.

Com relação ao tamanho das partículas dos constituintes, de acordo com Silva (2007), os resíduos que tem dimensões pequenas podem ser aplicados diretamente no processo de briquetagem. Entretanto, os que apresentam dimensões maiores precisam passar por um processo de redução de tamanho de modo a facilitar a compactação.

Segundo Ginâni (2013), quanto menor o tamanho melhor será a compactação. Partículas com dimensões pequenas são interessantes pelo fato de abranger uma área maior de superfície e conseqüentemente, promover uma melhor interação. Borghi (2012) afirma que o tamanho das partículas influencia na durabilidade e resistência dos briquetes, por isso, é

importante que seja feito a classificação granulométrica da biomassa antes da compactação, pois as partículas menores facilitam a união das mesmas, diminuindo os espaços vazios entre as partículas.

Outra importante característica na produção de briquetes é o teor de umidade dos constituintes. O teor de umidade pode ser definido como a massa de água contida na biomassa e pode ser expressa tanto na base úmida quanto na base seca, qual pode ser avaliada pela diferença entre os pesos de uma amostra, antes e logo após ser submetida à secagem (NOGUEIRA, 2012).

Quirino (2004) cita que segundo Earl (1975) é importante que o teor de umidade da madeira a ser usada como combustível seja reduzido, diminuindo assim o manejo e o custo de transporte, agregando valor ao combustível.

Segundo Carvalho e Brinck (2004) para que os briquetes não apresentem fraturas pela expansão dos gases é necessário que a matéria-prima usada para sua confecção esteja seca. Para que haja uma aglomeração das partículas é imprescindível que a umidade esteja numa faixa entre 8 e 15%.

Segundo Rodrigues (2010) os briquetes que apresentam um teor de umidade acima de 15% podem ter sua eficiência de queima comprometida pelo fato da relação entre poder calorífico e umidade. Ou seja, se o resíduo estiver acima da umidade ideal ou muito seco isso comprometerá o briquete, deixando-o sem estabilidade.

Segundo McKendry (2002) o teor de voláteis é a parte da biomassa que evapora por aquecimento, incluindo a umidade. Para Lewandowski (1997) citado por Klautau (2008), o teor de voláteis expressa a facilidade de se queimar um material e é obtido medindo a fração de massa que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra padronizada e previamente seca, em atmosfera inerte. Assim, o conteúdo de voláteis é uma medida da reatividade do combustível, quanto maior o teor de voláteis, maior a reatividade e mais rápida é a ignição.

O teor de cinza é a quantidade de resíduo inorgânico que permanece após a queima da matéria orgânica, que é transformada em energia, gás carbônico e água (BARROS, 2012). Ele representa a fração inerte da amostra, a qual é incombustível (parte inorgânica, contendo geralmente cálcio, potássio, fósforo, entre outros). Quando este apresenta valores elevados, reduz-se o poder calorífico superior (PCS), que possui relação direta com a composição química da matéria-prima queimada.

Strehler (2000) citado por Klautau (2008) afirma que as cinzas da biomassa em alta concentração podem diminuir o poder calorífico, e também causar perda de energia. A presença de resíduos prejudica a transferência de calor.

O teor de carbono fixo (CF) representa a massa restante após a libertação de compostos voláteis, excluindo as cinzas e teores de umidade (MCKENDRY, 2002).

Uma importante propriedade para o briquete é o poder calorífico, no qual segundo Quéno et al. (2011), representa a energia térmica produzida pelo combustível durante a sua combustão. Tal propriedade é expressa em joules (J) por grama (g), quilocaloria (kcal) por quilo (kg) ou calorias (cal) por grama (g) do material. Geralmente, é calculado utilizando-se uma bomba calorimétrica e representa uma das propriedades mais importantes de um combustível.

O poder calorífico é classificado em superior e inferior. O poder calorífico superior (PCS) é determinado a um volume constante, pela quantidade de calor extraído na combustão, de modo que a água formada no processo se condensa e o calor da condensação é recuperado. Já o poder calorífico inferior (PCI) é determinado considerando o calor extraído de modo efetivo, descontada a parcela de perda com a vaporização da água. Ou seja, no PCI, subtrai-se da energia liberada na reação a quantidade de energia liberada durante a condensação. Em projeto de máquinas térmicas, para efeito de dimensionamento, utiliza-se o PCI, por ser inadequada a condensação de água nos produtos, em razão da complexidade de sua remoção (DIAS, 2012).

A análise elementar é um ensaio realizado para determinação da composição química, e através dela podemos obter o poder calorífico superior (PC) dos combustíveis.

Segundo Klautau (2008), o ensaio fornece os percentuais mássicos dos elementos, carbono “C”, hidrogênio “H”, oxigênio “O”, nitrogênio “N”, enxofre “S” e cinzas “Z” contidos na amostra do combustível.

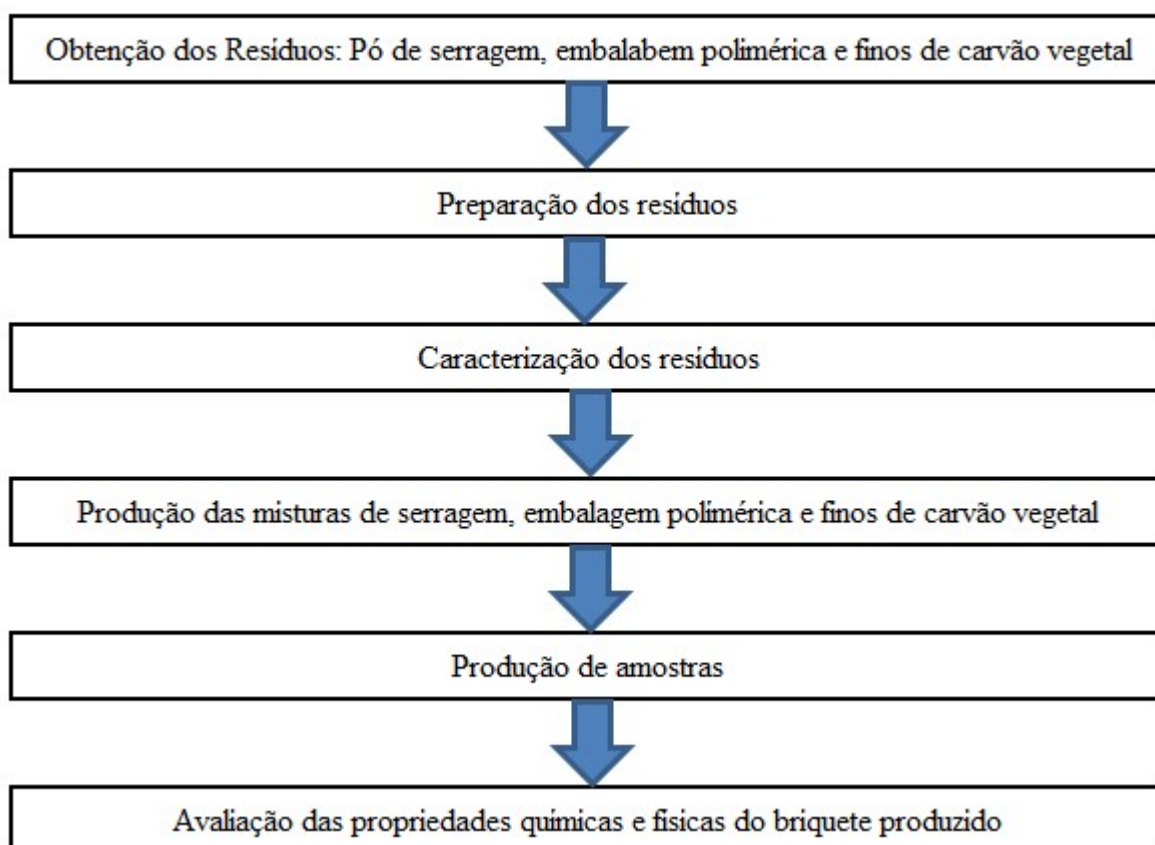
Essa análise também fornece a razão entre as populações de átomos de hidrogênio/carbono e oxigênio/carbono. Essas relações permitem o cálculo do Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI), pois existe correlação entre o PCS e as razões H/C e O/C. Além disso, conhecendo-se a relação H/C é possível calcular o PCI (VIEIRA, 2012).

McKendry (2002) afirma que quanto maior a proporção de oxigênio e hidrogênio, em comparação com o carbono, menor será o valor energético de um combustível, devido a menor energia contida em carbono (C) – oxigênio (O) e carbono (C) – hidrogênio (H), que em ligações carbono (C) – carbono (C).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

As atividades que foram desenvolvidas neste trabalho estão organizadas e descritas de acordo com as macroetapas apresentadas na Figura 5.

Figura 5 – Macroetapas das atividades desenvolvidas.



Fonte: Do autor, 2023.

4.1. OBTENÇÃO DOS MATERIAIS

O resíduo de madeira *Pinus Elliottii* foi gentilmente fornecido pela empresa Madeireira Capivaras Ltda, localizada em Criciúma / SC. O resíduo pós industrial de embalagens laminadas de polietileno (PE) com poli(tereftalato de etileno) (PET) foi gentilmente cedido pela empresa Canguru Embalagens Ltda. O carvão utilizado é de origem vegetal (Acácia-negra) da empresa BR Sul Indústria e Companhia De Carvão Vegetal Ltda (Ki-Carvão).

4.2. PREPARAÇÃO DOS RESÍDUOS

Primeiramente, a serragem de pinus passou pelo processo de secagem para posterior separação por granulometria. O pó de serragem foi colocado dentro de recipientes metálicos para realização do processo de secagem. A secagem foi realizada durante 4 horas a 100° C em uma estufa de secagem da marca Servitech. A serragem foi estabilizada com 10% de umidade, utilizando um borrifador de água deionizada.

Para classificação da serragem através da granulometria, o material foi colocado em um classificador granulométrico da marca Produteste, por um período de 15 minutos. Para produção dos briquetes foi utilizado o pó de madeira retido entre as peneiras 18 mesh e fundo.

Os resíduos poliméricos utilizados no estudo, não necessitaram de preparação pois já possuíam forma de pellets e estavam prontos para incorporação nas amostras de briquetes. O material é oriundo da extrusão de diversos resíduos de embalagens multicamadas.

Os resíduos de carvão vegetal foram triturados com o auxílio de almofariz e pistilo para obtenção dos finos, visando posterior incorporação nas amostras de briquetes.

4.3. PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS

A Tabela 1 apresenta a composição e nomenclatura das amostras produzidas. Para composição das amostras, foram realizados testes preliminares e adotou-se a inclusão máxima de polímero e/ou carvão com até 20% com relação à massa da amostra.

Tabela 1 – Composição e nomenclatura das amostras.

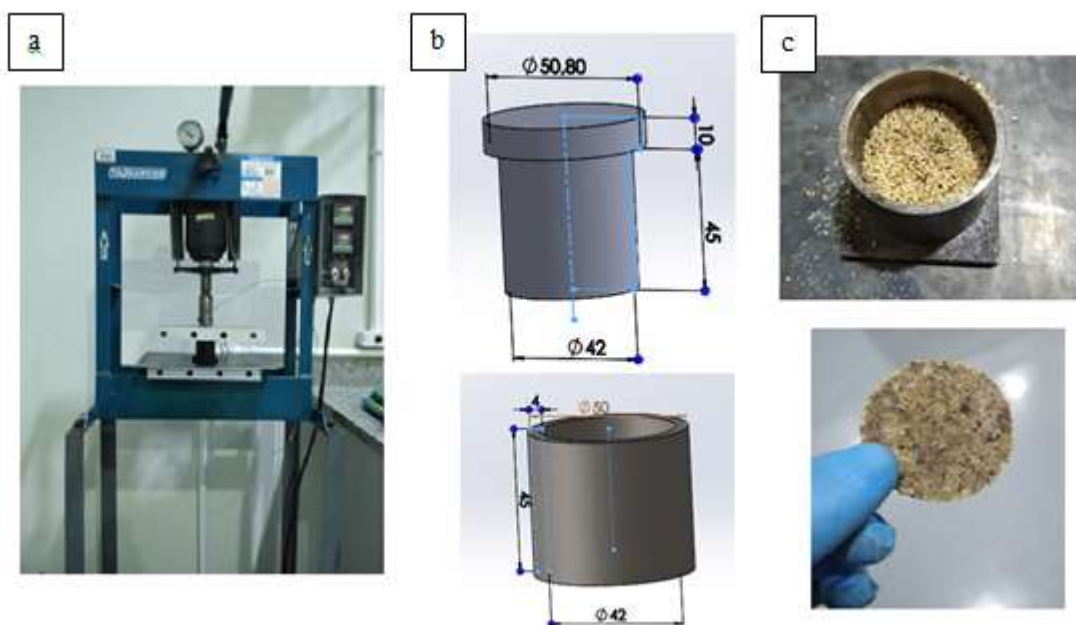
Composição das Amostras						
Amostra	Massa de Madeira (g)	Teor de Madeira (%)	Massa de Finos de Carvão (g)	Teor de Finos de Carvão (%)	Massa de Polímero (g)	Teor de Polímero (%)
M100	11	100%	0	0%	0	0%
M80C20	9	80%	2	20%	0	0%
M80P20	9	80%	0	0%	2	20%
M80C10P10	9	80%	1	10%	1	10%

Fonte: Do autor, 2023.

O processo de fabricação das amostras de briquetes foi realizado por compressão a quente, no qual utilizou-se uma prensa térmica da marca Marcon, modelo 10 ton, adaptada com sistema de aquecimento conforme representado na Figura 6. A espessura final do briquete foi controlada pela quantidade mássica dos constituintes a serem inseridos no molde, levando-se em consideração a capacidade do equipamento.

Para processamento dos briquetes, foi utilizado 4 toneladas de carga aplicada, por 10 minutos a temperatura de 160° C. A Figura 6 ilustra as imagens fotográficas e características do molde e processo a serem utilizados neste trabalho.

Figura 6 – (a) imagem fotográfica da prensa térmica a ser utilizada, (b) dimensões do molde a ser utilizado no processo e (c) imagens fotográficas do processamento e produto (briquete) resultante do parâmetro informado.



Fonte: Do autor, 2023.

4.4. CARACTERIZAÇÕES

Densidade Aparente

A densidade aparente dos briquetes foi calculada pela relação entre a massa da amostra (g) e seu volume (cm³). Foram realizadas cinco amostragens das medidas de cada amostra, conforme a norma ASTM D1622-08.

■ Análise Elementar

A análise elementar dos constituintes originais (madeira, plástico e carvão), para determinação do teor de carbono, hidrogênio, nitrogênio foi realizado analisador elementar PerkinElmer 2400, modelo Series II CHNS/O.

■ Cinética de Degradação

A investigação cinética dos constituintes do briquete (madeira, plástico e carvão vegetal) foi realizada segundo o modelo livre de Ozawa-Flynn-Wall (Equação 1) para determinar a energia de ativação (E_a) da gaseificação dos materiais. Neste modelo, a E_a é determinado pela regressão linear que apresenta a maior linearidade (R^2) entre $\log(\beta) \times 1/T$. O método integral de Satava-Sestak (Equação 2) foi utilizado para determinar o mecanismo de controle, no qual $G(\alpha)$ representa o modelo integral do mecanismo de controle (Tabela 2). A escolha do mecanismo de controle foi realizada comparando a linearidade do $\log(G(\alpha)) \times 1/T$, em que o modelo que apresenta o maior valor de R^2 é o mecanismo de controle. Caso mais de um modelo satisfaça a linearidade, o valor de E_s deve ser comparado (que deve ser próximo ao valor de E_a) (LAN et al., 2022; NAJARNIA et al., 2022).

$$\log \beta = \log \frac{AE_a}{g(\alpha)R} - 2.315 - 0.4567 \frac{E_a}{RT} \quad \text{Equação 1}$$

$$\log G(\alpha) = \log \frac{AE}{R\beta} - 2.315 - 0.4567 \frac{E_x}{RT} \quad \text{Equação 2}$$

A fração reagida (α) foi calculada conforme a Equação 3, na qual m_0 é a massa da amostra no momento em que inicia o fluxo de ar sintético, m é a massa da amostra em um determinado momento e m_a é a massa das cinzas ou a massa restante no cadinho.

$$\alpha = \frac{(m_0 - m)}{(m_0 - m_a)} * 100 \quad \text{Equação 3}$$

A investigação cinética foi realizada entre 25 e 1000°C sob fluxo de 50 mL/min de ar sintético, com taxas de aquecimento de 5°C/min, 10°C/min e 15°C/min, utilizando uma termobalança Netzsch.

Tabela 2 - Equações de controle do mecanismo adotadas na investigação cinética da gaseificação dos resíduos de madeira, carvão e plástico, em atmosfera de CO₂.

Símbolo	Mecanismo	$G(\alpha)$	$f(\alpha)$
D ₁	1-D diffusion	α^2	$1/2\alpha^{-1}$
D ₂	2-D diffusion (Valensi)	$\alpha+(1-\alpha)\ln(1-\alpha)$	$[-\ln(1-\alpha)]^{-1}$
D ₃	2-D diffusion (Jander)	$[1-0-\alpha]^{1/2}$	$(1-\alpha)^{1/2}[1-(1-\alpha)^{1/2}]^{-1}$
D ₄	3-D diffusion (G-B)	$1-2/3\alpha-(1-\alpha)^{2/3}$	$3/2[(1-\alpha)^{-1/3}-1]^{-1}$
D ₅	3-D diffusion (Z-L-T)	$[(1-\alpha)^{-1/3}-1]^2$	$3/2(1-\alpha)^{4/3}[(1-\alpha)^{-1/3}-1]^{-1}$
A ₂	Random nucleation and nuclei growth	$[\ln(1-\alpha)]^{1/2}$	$2(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{1/2}$
A ₃	Random nucleation and nuclei growth	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/3}$	$3(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{1/3}$
A ₄	Random nucleation and nuclei growth	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/4}$	$4(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{1/4}$
C ₁	Reaction order (n = 2)	$(1-\alpha)^{-1}-1$	$(1-\alpha)^2$
C ₂	Reaction order (n = 3/2)	$(1-\alpha)^{-1/2}$	$2(1-\alpha)^{3/2}$
C ₃	Reaction order (n = 3)	$(1-\alpha)^{-2}$	$1/2(1-\alpha)^3$
R ₂	2-D phase boundary reaction	$1-(1-\alpha)^{1/2}$	$2(1-\alpha)^{1/2}$
R ₃	3-D phase boundary reaction	$1-(1-\alpha)^{1/3}$	$3(1-\alpha)^{2/3}$

Fonte: LAN et al., 2022; NAJARNIA et al., 2022

Poder Calorífico

A análise de poder calorífico superior (PCS) dos briquetes foi realizada em uma bomba calorimétrica - LECO AC-500 segundo norma ASTM 5865/d5865M-19. Já o poder calorífico inferior (PCI) foi calculado de acordo com teor de hidrogênio e de acordo com a Equação 4, citada por Gomide (1984).

Segundo Nascimento (2006) a partir do poder calorífico superior (PCS), desconta-se a energia gasta para evaporação da água, devido à vaporização do hidrogênio, presente no combustível, e obtém-se o poder calorífico inferior (PCI). O poder calorífico inferior (PCI) do combustível seco.

$$PCI = PCS - H * 100 * \left(\frac{9H}{100}\right)$$

Equação 4

Em que:

PCI = Poder Calorífico Inferior (kcal/kg);

PCS = Poder Calorífico Superior (kcal/kg);

H = Teor de hidrogênio (% em base seca).

Por fim, foi determinado o poder calorífico útil (PCU, cal/g ou kcal/kg), levando-se em consideração o teor de água da biomassa (Equação 5), calculado de acordo com as recomendações de Vale et al. (2007).

$$PCU = PCI * (1 - Ubu) - 600Ubu \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

PCU = poder calorífico útil (kcal kg⁻¹);

PCI = poder calorífico inferior (kcal kg⁻¹);

Ubu = teor de umidade da amostra em base úmida.

Densidade Energética

A densidade energética (MJ/m³) foi calculada através da simples multiplicação entre o poder calorífico útil (PCU) e a densidade aparente do briquete.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1.1. Análise Elementar

A Tabela 2 apresenta o valor da análise elementar dos constituintes dos briquetes. É possível observar que a amostra de plástico apresentou maior teor de carbono e hidrogênio que as amostras de carvão e madeira. A estrutura química predominante no resíduo de embalagens plásticas é polietileno, cuja fórmula é $[\text{CH}_2\text{-CH}_2]$, o que justifica a predominância destes elementos. A amostra que apresentou menor teor de carbono foi a madeira.

Segundo Jittabut (2015), a composição resultante dos constituintes afeta as características de combustão do briquete à medida que a massa total do combustível diminui durante a fase de combustão. Carbono e hidrogênio são os elementos que mais contribuem para o poder calorífico dos combustíveis e oxigênio é geralmente presente em combustíveis vegetais, sendo que sua presença diminui o poder calorífico dos combustíveis, bem como as exigências teóricas de ar de combustão. Nitrogênio e Enxofre são significativos na formação de emissões nocivas e têm efeito nas reações de formação de cinzas. Munalula & Meincken (2009) afirmam que o maior teor de nitrogênio está relacionado a impactos ambientais e a poluição do ar, devido à formação de óxidos de nitrogênio e ácido nítrico. Os teores de nitrogênio relatados são mais pronunciados nas amostras de carvão vegetal e madeira.

Tabela 3 – Resultados da análise elementar.

Amostra	Carbono (%)	Hidrogênio (%)	Nitrogênio (%)	Outros (%)
Carvão	74,29	4,24	9,08	12,39
Plástico	83,07	14,95	1,46	0,52
Madeira	47,77	7,04	5,16	40,03

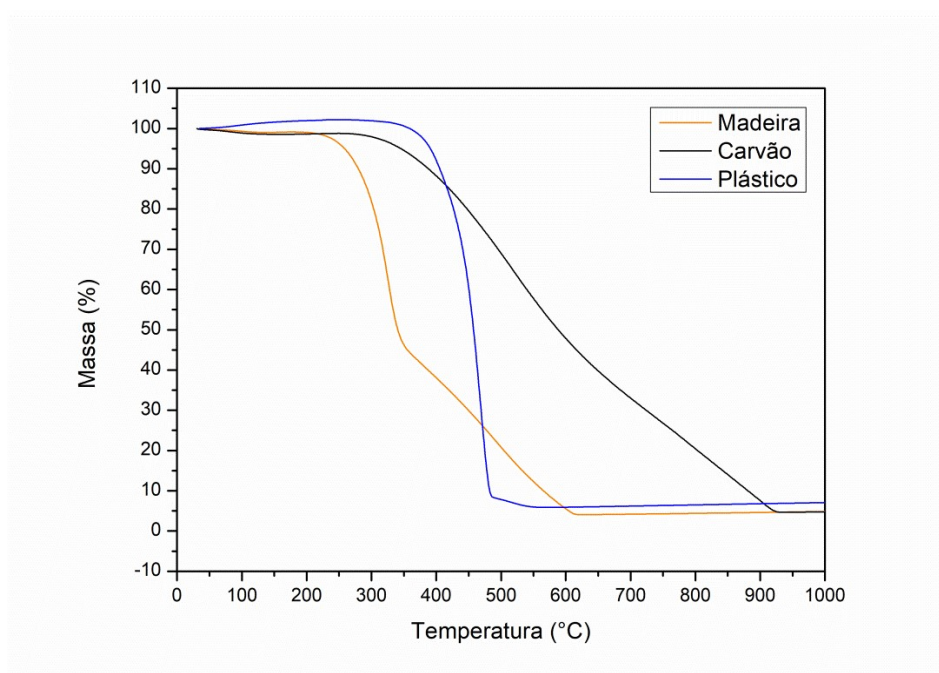
Fonte: Do autor, 2023.

5.1.2. Análise de Termogravimetria

A Figura 7 apresenta os termogramas de degradação dos constituintes originais do briquete, na taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$. Na análise termogravimétrica, nas amostras de carvão e madeira, ambas as amostras apresentaram um evento de perda de massa (5%) relacionado ao processo físico de dessorção de água da estrutura do material e ocorreu abaixo de 100°C . O polímero não apresentou este evento por ser uma amostra hidrofóbica e não absorver umidade. No termograma de degradação da madeira, observa-se que a amostra começou a perder massa quando a temperatura atingiu aproximadamente 300°C e estabilizou

a perda de massa com aproximadamente 625 °C, completando o processo de degradação. Esse comportamento de degradação térmica se deve à estrutura complexa da madeira, que é composta basicamente por celulose, hemicelulose e lignina, e que se degrada em diferentes estágios (BASU, 2010; PERONDI, 2017). A amostra de polímero começou a perder massa quando a temperatura atingiu aproximadamente 425 °C e estabilizou a perda de massa no processo de queima com 475 °C. Já a amostra de carvão vegetal iniciou o processo de perda de massa com 350 °C e estabilizou o processo de perda de massa quando a temperatura atingiu aproximadamente 925 °C.

Figura 7 – Análise termogravimétrica dos constituintes originais das amostras de briquete.



Fonte: Do autor, 2023.

5.1.3. Cinética de Degradação

Para análise da cinética de degradação dos componentes e dos briquetes, utilizou-se a análise de termogravimetria para monitoramento da variação de massa das amostras com aumento da temperatura, permitindo desta forma o cálculo da energia de ativação de cada componente utilizado nos briquetes. Para isso, estabeleceu as condições para aumento da taxa de aquecimento de 5°C/min, 10°C/min e 15°C/min. As Figuras 8, 9 e 10 apresentam os termogramas de degradação das amostras de madeira, plástico e carvão, respectivamente, nas diferentes taxas de aquecimento.

A energia de ativação (E_a) da combustão é então um parâmetro importante para se avaliar a qualidade de um combustível. Este parâmetro cinético pode ser obtido a partir de

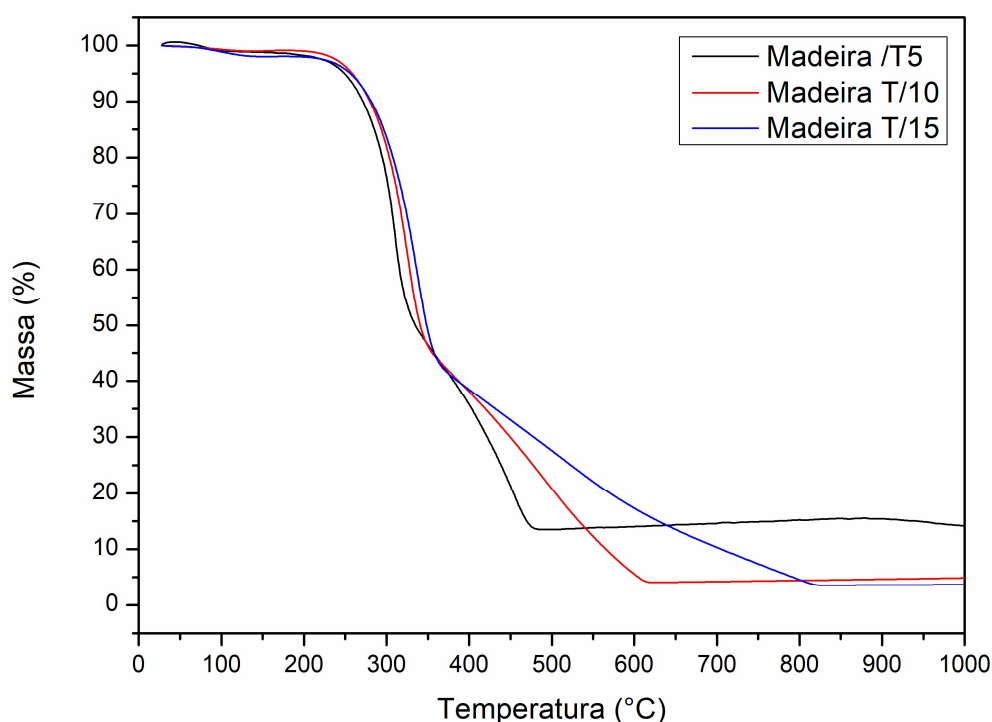
ensaios experimentais e a análise térmica é uma ferramenta útil, que possibilita essa determinação. Contudo, necessita-se definir modelos descritivos destes processos.

A energia de ativação é a energia mínima que os reagentes precisam para que inicie a reação química. Esta energia mínima é necessária para a formação do complexo ativado.

Quanto maior a energia de ativação, mais lenta é a reação, porque aumenta a dificuldade para que o processo ocorra. Quanto menor a energia de ativação, menor a “barreira” de energia, mais colisões efetivas e, portanto, uma reação mais rápida.

No termograma da madeira, representado pela Figura 8, observa-se que existe uma variação na perda de massa provocada pela variação da temperatura. Para as três variações de temperatura, a perda de massa iniciou-se por volta dos 225 °C e estabilizou a queima em aproximadamente 475 °C, 625 °C e 825 °C quando a aceleração da temperatura foi de 5°C/min, 10°C/min e 15°C/min, respectivamente.

Figura 8 – Análise termogravimétrica do pó de serragem para as taxas de 5°C/min, 10°C/min e 15°C/min.

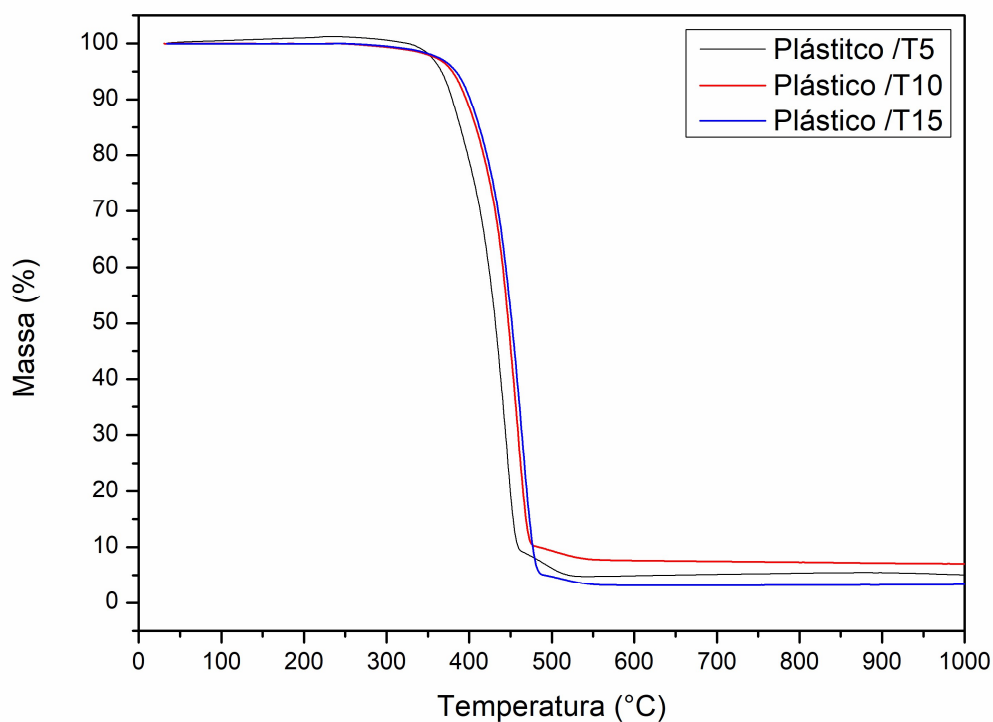


Fonte: Do autor, 2023.

Na Figura 9, que apresenta os termogramas de degradação do plástico, nas diferentes taxas de aquecimento, observa-se uma maior uniformidade, e pouca variação nos termogramas de degradação, apesar das variações da taxa de aquecimento. Nas três variações

da taxa de aquecimento, o polímero inicia sua perda de massa em aproximadamente 400 °C e estabiliza a queima de material ao atingir aproximadamente 475 °C.

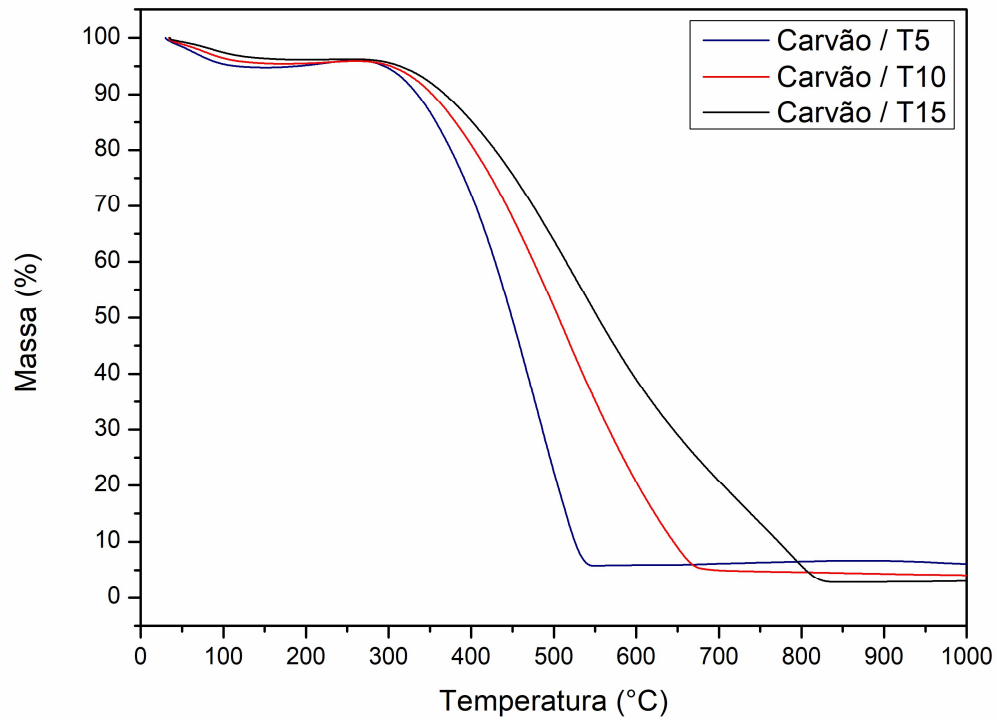
Figura 9 - Análise termogravimétrica do polímero multicamadas laminadas para as taxas de 5°C/min, 10°C/min e 15°C/min.



Fonte: Do autor, 2023.

Já para o termograma do carvão vegetal, representado pela Figura 10, observa-se que também existe uma variação mais pronunciada do comportamento do termograma de perda de massa provocada pela variação taxa de aquecimento. Para as três variações na taxa de aquecimento, a perda de massa iniciou-se por volta dos 350 °C e estabilizou a queima em aproximadamente 550 °C, 675 °C e 825 °C quando a taxa de aquecimento foi de 5°C/min, 10°C/min e 15°C/min, respectivamente.

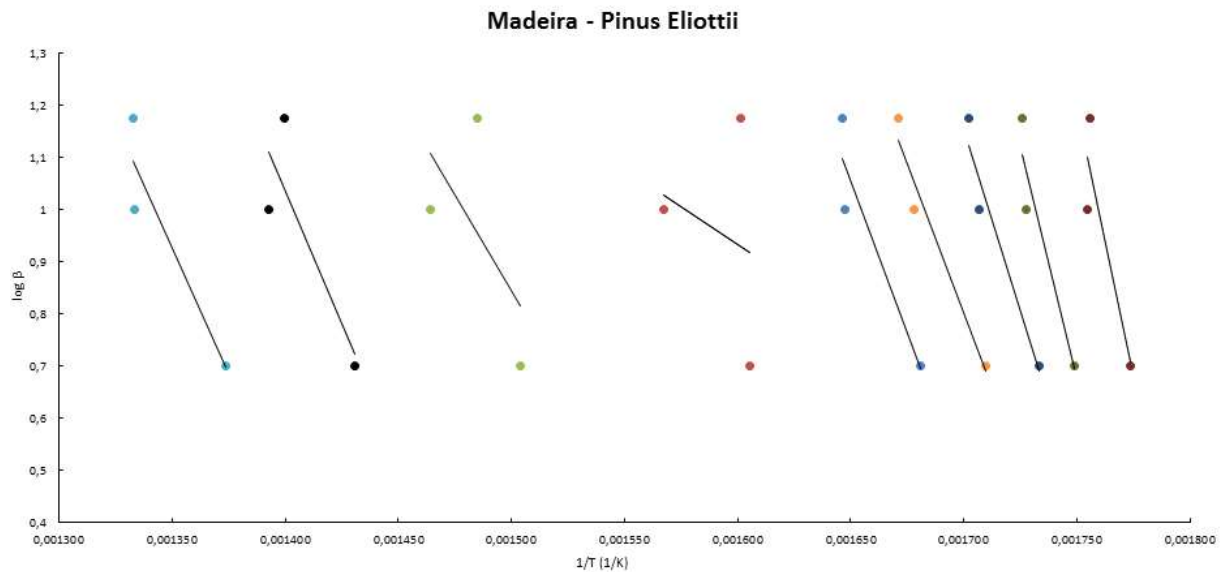
Figura 10 - Análise termogravimétrica do polímero multicamadas laminadas para as taxas de 5°C/min, 10°C/min e 15°C/min.



Fonte: Do autor, 2023.

A Figura 11 mostra a relação entre $\log \beta \times 1/T$ para a amostra de madeira de *Pinus Eliottii* e a Tabela 3 mostra a energia de ativação do processo de gaseificação.

Figura 11 - Relação entre $\log \beta \times 1/T$ para a amostra de madeira de *Pinus Eliottii*.



Fonte: Do autor, 2023.

Tabela 4 – Valores de Energia de Ativação para gaseificação do pó de serragem *Pinus Elliottii*.

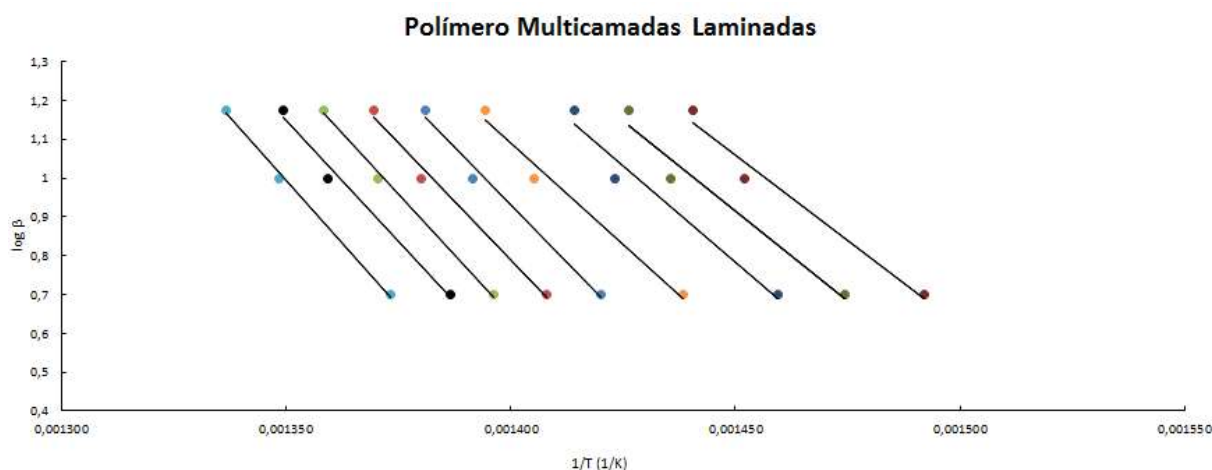
Fração Reagida	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Ea (kJ/mol)	377,7	326,5	252,1	208,0	210,1	51,8	134,1	185,6	174,4

Fonte: Do autor, 2023.

A energia de ativação para a gaseificação do *Pinus Elliottii* variou entre 134,1 a 377,7 kJ/mol. Wang et al. (2020) encontraram Ea entre 196,9-283,3 kJ/mol para gaseificação de semicoque e carvão vegetal de palha de soja e suas misturas. Bui et al (2017) encontraram uma Ea entre 222 kJ/mol a 224 kJ/mol para a gaseificação de carvões de madeira e resíduos florestais produzidos em diferentes pressões. Para a fração reagida de 0,6 não foi possível determinar a energia de ativação devido a baixa linearidade ($R^2 = 0,06$), o que indica que o modelo proposto não apresenta confiabilidade para este ponto, portanto o modelo cinético aqui proposto exclui este ponto. A maior energia de ativação observada no início do processo de gaseificação é decorrente da eliminação de moléculas maiores e hidrocarbonetos. Para uma fração reagida de 0,6 provavelmente foi finalizada a eliminação dos hidrocarbonetos do pinus, que são moléculas maiores e mais difíceis de serem quebradas. A partir da fração reagida de 0,6 houve um aumento da taxa de reação, consequentemente uma diminuição da energia de ativação. Isto ocorre devido a formação de sítios ativos após a eliminação das moléculas maiores citadas anteriormente. Observou-se também um aumento na energia de ativação para as frações reagidas acima de 0,7. Isto ocorre porque à medida que a reação de gaseificação progride, há uma diminuição desses sítios ativos, e a reação progride através de sítios ativos com ligações mais fortes (WANG, 2022).

A Figura 12 mostra a relação entre $\log \beta \times 1/T$ para a amostra do polímero multicamadas e a Tabela 4 mostra a energia de ativação do processo de gaseificação.

Figura 12 - Relação entre $\log \beta \times 1/T$ para a amostra do polímero multicamadas.



Fonte: Do autor, 2023.

Tabela 5 – Valores de Energia de Ativação para gaseificação do polímero multicamadas laminadas.

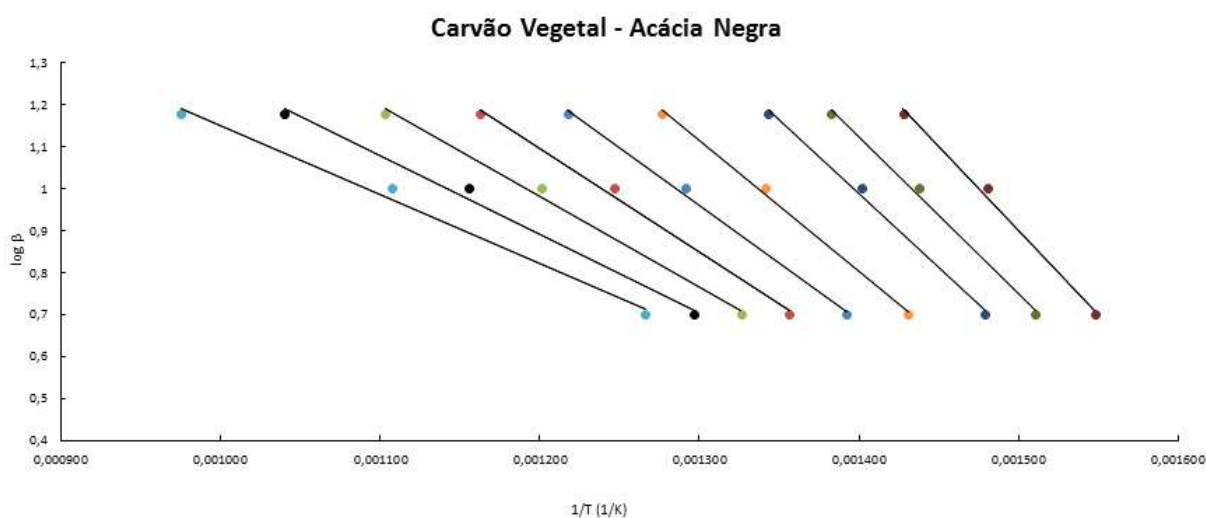
Fração Reagida	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Ea (kJ/mol)	160,9	168,6	180,6	190,1	216,3	219,9	227,5	226,7	235,1

Fonte: Do autor, 2023.

A energia de ativação para a combustão da amostra de polímero multicamadas laminadas variou entre 160,9 a 235,1 kJ/mol. Novamente nota-se um aumento na energia de ativação com aumento das frações reagidas. Isto ocorre porque à medida que a reação de gaseificação progride, há uma diminuição desses sítios ativos, e a reação avança através de sítios ativos com ligações mais fortes (WANG, 2022).

Brillard et al. estudaram a cinética de combustão de resíduos de mascaras contendo 70% polietileno tereftalato, 30% poliamida 6 e outra mantendo microfibras feitas com 70% polietileno tereftalato, 30% poliamida. Os resultados mostraram que no primeiro resíduo a energia de ativação variou entre 202 a 213 kJ/mol. Já para o segundo, a energia de ativação variou entre 172 a 213 kJ/mol.

A Figura 13 mostra a relação entre $\log \beta \times 1/T$ para a amostra de finos de carvão vegetal e a Tabela 5 mostra a energia de ativação do processo de gaseificação.

Figura 13 – Relação entre $\log \beta \times 1/T$ para a amostra de finos de carvão vegetal.

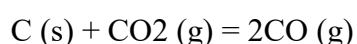
Fonte: Do autor, 2023.

Tabela 6 – Valores de Energia de Ativação para gaseificação dos finos de carvão vegetal.

Fração Reagida	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Ea (kJ/mol)	72,7	68,2	64,3	56,7	49,8	44,9	39,2	34,0	30,1

Fonte: Do autor, 2023.

A reação de gaseificação se inicia pelos sítios ativos mais fracos, indicando que no início da reação de gaseificação o que pode indicar um mecanismo controlador por difusão do oxigênio até o sítio ativo, o que sugere energia de ativação mais alta de 72,7 kJ/mol. Observou-se também que conforme a reação de gaseificação prossegue ocorre uma diminuição da energia de ativação. Para as frações reagidas acima de 0,3 a temperatura foram superiores a 400 °C. Isso indica que a reação de Boudouard (Equação 6) está ativa, sendo esta uma reação endotérmica. Assim, é de se esperar que o aumento da temperatura também aumente a reação de redução (JANSEN et. al, 2022).



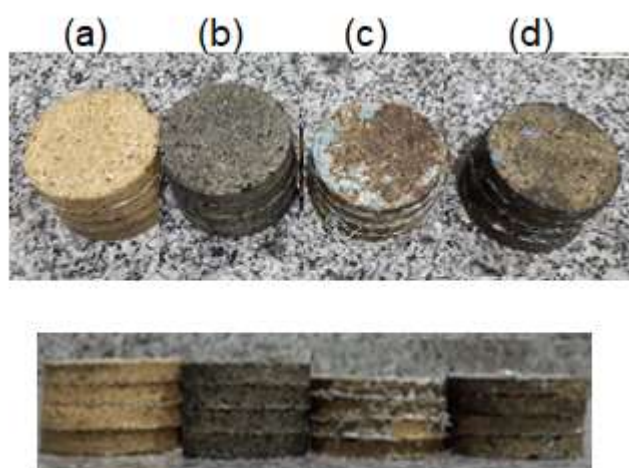
Equação 6

Na análise comparativa entre os constituintes a serem utilizados nos briquetes, o carvão vegetal apresentou menor energia de ativação, seguida pela amostra de resíduo de plástico e por fim o resíduo de madeira.

5.1.4. Análise Física e Visual dos Briquetes

A Figura 14 apresenta as imagens fotográficas dos briquetes de madeira com e sem a adição dos resíduos de carvão vegetal e plástico. Todas as amostras apresentaram estabilidade física e dimensional. Na Figura 14 (c), que representa o briquete M80P20, observa-se uma heterogeneidade da distribuição das partículas de plástico, bem como a fusão do mesmo, gerando regiões com maior aglomeração e concentração de plástico na estrutura do briquete. É possível também observar pela Figura 14, de forma visual a diferença de espessura entre as amostras após o processo de compactação da briquetagem, que será abordado na sequência.

Figura 14 - Imagens fotográficas dos briquetes de madeira com e sem a adição dos resíduos.



Fonte: Do autor, 2023.

A Tabela 7 apresenta as características físicas dos briquetes produzidos. Observa-se que o briquete de madeira (M100) apresentou maior densidade entre as amostras analisadas. Este fato está atribuído a capacidade de compactação da madeira e liberação de ligantes (lignina e ceras de baixa massa molar) durante o aquecimento, que contribui para densificação do mesmo. Com a adição do carvão vegetal, que possui densidade similar a da madeira, o fato deste não possuir em sua composição ligantes, pode prejudicar a compactação e agregação das partículas, o que tende diminuir a densidade do sistema. Este fato também é observado pela espessura dos briquetes da amostra M80C20, que apresentou maior valor quando comparado com as demais amostras. Observa-se também, que as amostras contendo a incorporação de 10% de polímero e 10% de carvão vegetal (M80C10P10) apresentaram o menor desvio padrão de massa média e de densidade média, demonstrando que os briquetes apresentaram maior uniformidade após o processo de briquetagem.

Tabela 7 – Densidade média das amostras.

Amostra	Massa Média das Amostras (g)	Espessura Média das Amostras (mm)	Densidade Média das Amostras (kg/m ³)
Madeira	-	-	450,4 ± 12,5
Carvão	-	-	390,5 ± 10,1
Plástico	-	-	950 ± 8,2
M100	10,95 ± 0,13	6,20 ± 0,1	1067,6 ± 12,7
M80C20	9,70 ± 0,17	7,00 ± 0,2	873,5 ± 15,3
M80P20	9,46 ± 0,12	5,80 ± 0,1	1021,9 ± 12,6
M80C10P10	10,02 ± 0,05	6,00 ± 0,1	1032,5 ± 5,5

Fonte: Do autor, 2023.

Na Tabela 6, observa-se que a amostra de resíduo polimérico é a que possui a maior densidade e menor desvio padrão quando comparado com a madeira e o carvão vegetal. Também é possível observar que o pó de serragem de *Pinus Elliottii* (Madeira) apresentou uma densidade média de 450,4 kg/m³ antes do processo de compactação e após esse processo, aumentou sua densidade média para 1067,6 kg/m³ (M100).

Com relação a massa média das amostras, observa-se que a amostra M80P20 apresentou uma redução após o processo de compactação da briquetagem, devido a temperatura (160 °C) e ao tempo de compactação (10 minutos) e que a amostra M80C10P10 apresentou o menor desvio padrão.

5.1.5. Poder Calorífico

A Tabela 8 apresenta as propriedades térmicas dos briquetes produzidos com os diferentes resíduos de madeira, carvão e plástico. Carvalho (2010) afirma que quanto maior for o poder calorífico superior (PCS), maior será a energia contida no combustível. Já o poder calorífico inferior (PCI) é a quantidade de calor necessária para produzir um quilo de combustível, através da combustão deste com o excesso de ar e gases de descarga, resfriados até o ponto de ebulição da água, evitando sua condensação.

Tabela 8 – Resultados obtidos para o poder calorífico das amostras de briquetes.

Amostra	Umidade de Higroscopia (%)	Poder calorífico inferior (cal/g)	Poder calorífico superior - Analisado (cal/g)	Poder calorífico útil (cal/g)	Densidade energética (MJ/m ³)
M100	9,30	3815	4219	3404	15215,3
M80C20	8,61	6498	6872	5887	21529,7
M80P20	6,15	5319	5725	4955	21199,9
M80C10P10	7,61	6992	7390	6414	27726,9

Fonte: Do autor, 2023.

Pela Tabela 8 é possível observar que a amostra que apresentou menor umidade de higroscopia foi a M80P20, conforme já observado pela análise termogravimétrica, que o resíduo de plástico não absorve umidade. A amostra que apresentou maior valor para umidade de higroscopia foi M100. Comparativamente ao briquete produzido somente com madeira, todas as demais amostras contendo resíduos de finos de carvão vegetal e plástico apresentaram valores superiores de PCI e PCS, sendo a amostra M80C10P10 que apresentou maior valor para PCI, PCS, poder calorífico útil e densidade energética.

Como esperado, observa-se que a inclusão de resíduos de polímeros multicamadas e finos de carvão vegetal no briquete M80C10P10 trouxeram resultados energéticos satisfatórios. Isso se deve ao fato da análise elementar dos constituintes apresentarem para os resíduos poliméricos e de finos de carvão vegetal, um teor de carbono maior que o do pó de serragem do *Pinus Elliottii*. Outro fato que justifica isso é o teor de hidrogênio apresentado pelo resíduo polimérico.

6 CONCLUSÃO

Como fonte de energia, os resultados deste trabalho evidenciaram a viabilidade da moldagem e utilização de briquetes produzidos com a inclusão de resíduos poliméricos multicamadas e finos de carvão vegetal.

A produção de briquetes com a utilização desses resíduos tende a ser uma das alternativas de consumo, evitando assim diversos problemas ambientais. O estudo demonstrou que a inclusão desses resíduos de maneira separada (M100, M80P20 e M80C20), não apresenta resultados tão satisfatórios quanto o composto contendo os três constituintes. Briquetes intitulados M80C10P10, mostraram que o composto formado gerou resultados satisfatórios com relação aos aspectos de poder calorífico, umidade e densidade.

Maiores teores de umidade em briquetes proporcionam produtos com uma qualidade inferior, demandando mais energia e afetando de forma negativa o poder calorífico.

Para briquetes, não é necessária secagem após a produção, o que é positivo do ponto de vista econômico de sua aplicação.

Sendo a energia de ativação (E_a) um parâmetro importante na qualidade de um combustível, o estudo demonstrou que na análise comparativa entre os três constituintes utilizados na produção de amostras de briquetes, o carvão vegetal foi o resíduo que apresentou menor energia de ativação, seguida pela amostra de resíduo de plástico e por fim o resíduo de madeira.

Conclui-se que a formação do composto estudado pode contribuir com aspectos econômicos e ambientais, contribuindo de forma significativa para reduzir queimadas e o desmatamento.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação das propriedades mecânicas do briquete;
- Alteração das frações composicionais dos resíduos utilizados no briquete;
- Avaliação da toxicidade da queima dos componentes utilizados na composição dos briquetes.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. A. Jansen, I. J. van der Walt, and P. L. Crouse, *Thermochim. Acta* 708, 179104 (2022).

ALMEIDA, R. S. **Influência da velocidade de rotação no processo de extrusão do polipropileno – virgem e reciclado.** Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2010. Dissertação (Mestrado).

AMI. **Polyethylene film extruders in Europe.** Europa, 2017.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA - AMS. **Anuário Estatístico AMS. Florestas plantadas – um caminho para um desenvolvimento sustentável.** Belo Horizonte: AMS, 2012.

BARROS, L. O. **Densidade energética de briquetes produzidos a partir de resíduos lignocelulósicos.** 37p. Universidade de Brasília. Brasília-DF, 2012.

BELTRAME, P.; Citterio, C.; Test, G & Seves, A. – *J. Polym. Sci*, 74, p.1941, 1999.

BENICIO, E. L. **Utilização de resíduo celulósico na composição de briquetes de finos de carvão vegetal.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica. 2011.

BERMAN, C. **Crise ambiental e as energias renováveis.** *Ciencia e cultura*. vol.60 no.3 São Paulo Sept. 2008.

BHATTACHARYA, SC 2004. **Combustível para o pensamento, energia renovável mundo**, vol. 7, No. 6, pp 122-130.

BORGHI, M. M. **Efeito da granulometria na avaliação dos briquetes.** 47p. Monografia - Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Jerônimo Monteiro , ES, 2012.

BRAGA, M. **Normas e especificações para análise de briquetes e peletes.** *Jornal Dia de Campo. Artigos Especiais*. 2015.

BUI, H. H. et al. **CO₂ gasification of charcoals produced at various pressures.** *Fuel Processing Technology*, v. 152, p. 207–214, 2016.

CARVALHO, E. D., & Brinck, V. (2004). **Briquetagem em Tratamento de Minérios**. Luz, A.B.; Sampaio, J.A.; Almeida, S. LM (Eds).

CASTILHO JÚNIOR, A. B. **Estimativa da Distribuição e dos Teores dos Metais Pesados nas Diversas Frações dos Resíduos Urbanos no Brasil**. BIO – Revista Brasileira de Saneamento e Meio Ambiente. Rio de Janeiro, v.1, n.1, p. 57-60, 1988.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA – CENBIO. **Carvão Vegetal: aspectos técnicos, sociais, ambientais e econômicos**. Nota técnica da disciplina ENE5726: Biomassa como fonte de energia – conversão e utilização. . Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo – IEE/USP, 2008.

COSTA, D. R. et al. **Análise de briquetes de Eucalyptus**. Revista da madeira, São Paulo, v. 123, p. 46-48, 2010.

DANTAS, A.P.; SANTOS, R.R.; SOUZA, S.C. **O Briquete como Combustível Alternativo para a Produção de Energia**. III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Goiânia/GO, 2012.

DIAS, J, M, C, S.[et al.]. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais** – Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2012. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/78690/1/DOC-13.pdf>>. Acesso em 27 de junho de 2021.

EBNESAJJAD, S. **Plastic Films in Food Packaging—Materials, Technology and Applications**. Amsterdam, 2013. p.384

EHRIG, R. J.; Curry, M. J. **Plastics recycling: products and processes**; Oxford University Press: New York, 1992.

d. Perondi, P. Poletto, D. Restelatto, C. Manera, J.P. Silva, J. Junges, G.C. Collazzo, A. Dettmer, M. Godinho, A.C.F. Vilela, **Steam gasification of poultry litter biochar for bio-syngas production**. Environ. Prot. Process Saf. (2017). <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.04.029>

FAAIJ, A. et al. **Novas tecnologias para os vetores modernos de energia de biomassa**. In: ROSSILO–CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H (Org). **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. 1 ed. Campinas, SP 2005. p 339 417.

FONTES, P.J.P. de; QUIRINO, W.F.; PASTORE JUNIOR, F.; FILGUEIRAS, S.M.S. **Aglutinante para briquetagem de carvão vegetal**. Brasília: DPQ/IBDF, 1984. Não paginado.

GINÂNI, T. P. **Estudo Preliminar da Produção de Briquetes Compostos a Partir de Resíduos Vegetais**. 37p. Monografia - Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Angicos, RN, 2013.

GWENZI, W.; NCUBE, R.; RUKUNI, T. **Development, properties and potential applications of high energy fuel briquettes incorporating coal dust, biowastes and postconsumer plastics**. SN Applied Sciences, 2020. DOI: 10.1007/s42452-020-2799-8

JITTABUT, P. **Physical and Thermal Properties of Briquette Fuels from Rice Straw and Sugarcane Leaves by Mixing Molasses**. 2015 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies. Energy Procedia, 79, 2 – 9, 2015.

KAISER, K., SCHMID, M., SCHLUMMER, M., **Recycling of polymer-based multilayer packaging: a review**. Alemanha, p.1-26. dez. 2017

KLAUTAU, J. V. P. **Análise Experimental de uma Forno a lenha de Fluxo Cocorrente Para Secagem de Grãos**. 192p. 2008. Dissertação (mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) PPGERHA, UFPR. Curitiba: 2008.

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e molde**, 1. ed. - São Paulo: Artiber Editora, 2005.

MARQUES, R. F. P. V. **Impactos Ambientais da Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos no Solo e na Água Superficial em Três Municípios de Minas Gerais**. Dissertação do Programa de Pós-Graduação apresentada à Universidade Federal de Lavras. 95 p. Lavras-MG. 2011.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass: part 1, overview of biomass**. *Bioresource Technology*, Essex, v. 83, n. 1, p. 37-46, 2002a.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass: part 2, conversion technologies.** Bioresource Technology, Essex, v. 83, p. 47-54, 2002b.

NAJARNIA et al. **Thermal decomposition kinetic study of Fe₅C₂ nanoparticles.** Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2022.

NWABUE, F.I.; UNAH, U.; ITUMOH, E.J. **Production and Characterisation of Smokeless Bio-coal Briquettes Incorporating Plastic Waste Materials,** Environmental Technology & Innovation, 2017. DOI: 10.1016/j.eti.2017.02.008

LAN et al. **Influence mechanism of CaO on gasification characteristics and kinetic behaviors of carbon-CO₂ reaction.** Full Length Article 2022.

OLIVEIRA RICARDO. **Moldagem de briquetes com finos de carvão vegetal aglutinado com parafina: caracterização de algumas propriedades.** 2013. 80 p. Tese (Mestrado em Ciencias dos Materiais) – Universidade Estadual de São Carlos, Sorocaba, SP.

OMACHI, I. H. et al. **Produção de biomassa florestal para exportação: o caso Amcel.** Revista biomassa e energia, Viçosa, v. 1, n.1, p. 29-36, 2004.

PAULA, L. E. R. **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos.** 2014. 83 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

P. Basu, **Biomass gaseification and pyrolysis** (Academic Press, Boston, 2010).

Plastic Europe. **An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data.** Plastic-The Facts 2017. Association of Plastics Manufacturers.

QUÉNO, L. M. R., SOUZA; A. N.; MARTINS, I. S. **Custo de produção das biomassas de eucalipto e capim-elefante para energia.** Cerne, Lavras, v. 17, n. 3, p. 417-426, 2011.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. **Características e Índice de Combustão de Briquetes de Carvão Vegetal.** Laboratório de Produtos Florestais - LPF/IBAMA. Brasília, 1991. 19p.

QUIRINO, W.F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Brasília: LPF/IBAMA, 2003. 14p.

QUIRINO, W. F. et al. **Poder Calorífico da Madeira e de Resíduos Lignocelulósicos**, Biomassa & Energia - LPF/IBAMA v. 1, n. 2, p. 173-182. Brasília, 2004.

RESCHKE, Juliana Soares. **Escória granulada de fundição utilizada como substituição ao cimento em concretos: avaliação de propriedades de relacionadas com a durabilidade**. 2003. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

RODRIGUES, Valéria Antonia Justino. **Valorização energética de lodo biológico da indústria de polpa celulósica através da briquetagem**. 2010. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica, contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SILVA, CLAUDINEI AUGUSTO. **Estudo técnico-econômico da compactação de resíduos madeireiros para fins energéticos**. 2007. (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

STRONG, A. B. **PLASTICS – Materials and Processing** – New Jersey: Prentice – Hall, 1996.

VALE, A.T.; GENTIL, L.V. **Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais**. Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III. Rio Branco: Suprema, 2008. pg.195-241.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da Biomassa Proveniente de Resíduos Agrícolas para geração de energia**. 56p. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

WANG, Duo et al. **Biochar production and applications in agro and forestry systems: A review.** Science of the Total Environment, [s. l.], v. 723, p. 137775, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137775>

WANG, Qi; WANG, Enlu. **Numerical investigation of the influence of particle shape, pretreatment temperature, and coal blending on biochar combustion in a blast furnace.** Fuel, [s. l.], v. 313, p. 123016, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236121028763>.