

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ

PEDRO OSWALDO MORELL

ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE PRODUÇÃO DE BRIQUETES COM
FINOS DE CARVÃO E RESÍDUOS DE CERVEJARIA E FECULARIA

TOLEDO – PR

2024

PEDRO OSWALDO MORELL

ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE PRODUÇÃO DE BRIQUETES COM
FINOS DE CARVÃO E RESÍDUOS DE CERVEJARIA E FECULARIA

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Ambiental (PPGETA), Setor Palotina, Universidade Federal do Paraná em parceria com Universidade Estadual do Oeste do Paraná, em cumprimento aos requisitos parciais para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e Tecnologia Ambiental, na área de concentração em Engenharia e Tecnologia de Recursos Naturais.

Orientador:

Prof. Dr. Edson Antônio da Silva

Coorientador:

Prof. Dr. Ricardo Sonsim de Oliveira

TOLEDO – PR

2024

Universidade Federal do Paraná. Sistemas de Bibliotecas.
Biblioteca UFPR Palotina.

M841 Morell, Pedro Oswaldo

Estudo da viabilidade técnica na produção de briquetes de
resíduos agroindustriais / Pedro Oswaldo Morell.
– Toledo, PR, 2025.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná,
Setor Palotina, PR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e
Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Edson Antônio da Silva.

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Sonsim de Oliveira.

1. Agroindústria. 2. Briquete. 3. Resíduos sólidos.
I. Silva, Edson Antônio da. II. Oliveira, Ricardo Sonsim de.
III. Universidade Federal do Paraná. IV. Título.

CDU 502



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR PALOTINA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA E
TECNOLOGIA AMBIENTAL - 40001016173P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **PEDRO OSWALDO MORELL** intitulada: **ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE PRODUÇÃO DE BRIQUETES COM FINOS DE CARVÃO E RESÍDUOS DE CERVEJARIA E FECULARIA**, sob orientação do Prof. Dr. EDSON ANTONIO DA SILVA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Palotina, 30 de Agosto de 2024.

Documento assinado digitalmente
EDSON ANTONIO DA SILVA
Data: 18/02/2025 10:21:14-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Assinatura Eletrônica
05/09/2024 09:35:53.0
EDSON ANTONIO DA SILVA
Presidente da Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
PLÍNIO RIBEIRO FAJARDO CAMPOS
Data: 18/02/2025 10:40:33-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Assinatura Eletrônica
05/09/2024 09:18:06.0
PLÍNIO RIBEIRO FAJARDO CAMPOS
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
04/09/2024 14:08:48.0
RAQUEL STROHER
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Documento assinado digitalmente
RAQUEL STROHER
Data: 20/02/2025 08:05:29-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Documento assinado digitalmente
MARIA LUIZA FERNANDES RODRIGUES
Data: 19/02/2025 22:56:06-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Assinatura Eletrônica
05/09/2024 23:49:59.0
MARIA LUIZA FERNANDES RODRIGUES
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
05/09/2024 08:49:52.0
SALAH DIN MAHMUD HASAN
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DO OESTE DO PARANÁ)

Documento assinado digitalmente
SALAH DIN MAHMUD HASAN
Data: 18/02/2025 10:52:25-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

RUA PIONEIRO, 2153 - Palotina - Paraná - Brasil
CEP 85950-000 - Tel: (44) 3211-8500 - E-mail: ppgeta@ufpr.br
Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.
Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 394143
Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://siga.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>
e insira o código 394143

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus pela capacidade concedida,
A minha família pelo apoio e, principalmente a minha mãe Marli, pela
dedicação.

AGRADECIMENTOS

Gratidão pela vida concedida por Deus e pela oportunidade e capacidade;

Gratidão a meus pais Osmar e Marli, por me ensinarem os caminhos corretos e justos;

Gratidão ao meu orientador, professor Dr. Edson Antônio da Silva, pelos ensinamentos, pelo apoio, pela preocupação comigo e com minha família, agradeço muito pela oportunidade. É uma pessoa especial, que além de um excelente profissional, é um ser humano com um coração generoso e gigante, Deus o abençoe grandemente;

Gratidão ao coorientador, professor Dr. Ricardo Sonsim de Oliveira, pela orientação;

Gratidão à UNIOESTE – Toledo-PR, FAG (Cascavel-PR), UFPR (Palotina-PR) e UTFPR (Medianeira-PR), pela disponibilidade em realizar as análises disponíveis na instituição;

Gratidão a todos os colegas, técnicos, colaboradores e professores da UNIOESTE de Toledo-PR pela ajuda e companheirismo em todos os momentos;

Gratidão à CAPES, pelo incentivo as pesquisas e pela concessão da bolsa de estudos.

EPÍGRAFE

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

O crescimento populacional e de alguns setores da indústria resultaram no aumento do consumo de energia em escala mundial, sendo assim importante buscar fontes alternativas de energias renováveis. Uma das fontes de energia renovável mais conhecida e usada é a biomassa, que pode ser obtida a partir de vários tipos de resíduos, principalmente da agroindústria. Trata-se da única fonte renovável com carbono, essencial para atender a diversos requisitos de combustíveis e bens de consumo. Neste sentido, este trabalho foi desenvolvido com objetivo de analisar a viabilidade técnica da reciclagem de resíduos sólidos das agroindústrias do Oeste Paranaense por meio da densificação da biomassa, tornando-se fonte de energia térmica, mitigando os riscos da destinação atual e reduzindo os custos operacionais de sua destinação. Foram selecionados os resíduos: finos de carvão, proveniente da queima de eucalipto; bagaço de mandioca, resíduo do beneficiamento da raiz da mandioca, e o bagaço de malte, resíduo da produção artesanal de cerveja. Os resíduos foram coletados nos municípios de Maripá e Nova Santa Rosa, no Oeste do Paraná, os quais foram caracterizados por meio das determinações de umidade, cinzas, proteínas, lipídios, carboidratos e granulometria. Foi utilizado um planejamento experimental 3^2 em blocos, para o desenvolvimento dos briquetes, variando-se as misturas em três níveis, empregando-se dois tipos de aglutinantes, sendo amido de milho e polvilho, além da utilização de duas temperaturas distintas 25 e 60 °C, resultando assim em quatro blocos. Para conhecer as características dos briquetes foram avaliados poder calorífico superior, resistência à compressão axial e densidade. Os briquetes apresentaram propriedades caloríficas adequadas para uso como combustível sólido, variando entre 16,629 e 27,446 MJ kg⁻¹, densidade variou entre 674 e 1036 kg m⁻³, resistência a compressão axial dos briquetes variou de 3 e 23,6 MPa. Após análise estatística dos resultados, foram selecionadas as variáveis bagaço de mandioca, bagaço de malte, aglutinante polvilho e 60 °C, sendo estas variáveis aplicadas ao planejamento experimental 2^2 para ajustar os níveis de melhor desempenho da resistência mecânica dos briquetes, obtendo-se uma superfície de resposta. Ao aplicar o caminho de máxima inclinação sobre a superfície de resposta, objetivando a otimização da resistência mecânica dos briquetes, obteve-se as seguintes condições: mistura de 77% de bagaço de mandioca, 23 % de bagaço de malte, temperatura de 44°C, concentração de aglutinante polvilho de 9 %, umidade 10 % e pressão de 9 toneladas, com resistência mecânica de 24,86 Mpa, poder calorífico de 17,6 MJ kg⁻¹ e densidade de 1095 kg m⁻³. Foi possível concluir neste trabalho que os resíduos agroindustriais como bagaço de mandioca e bagaço de malte podem ser empregados no processo de briquetagem, resultando em uma alternativa de biocombustível sólido de segunda geração, reduzindo os impactos ambientais destes resíduos, além de gerar energia térmica.

Palavras-chave: agroindústria; resíduos sólidos; briquete; energia.

ABSTRACT

Population growth and growth in some industrial sectors have resulted in increased energy consumption worldwide, making it important to seek alternative sources of renewable energy. One of the best-known and most widely used sources of renewable energy is biomass, which can be obtained from various types of waste, mainly from agroindustry. It is the only renewable source with carbon, essential to meet various requirements for fuels and consumer goods. In this sense, this work was developed with the objective of analyzing the technical feasibility of recycling solid waste from agroindustries in Western Paraná through the densification of biomass, becoming a source of thermal energy, mitigating the risks of its current disposal and reducing the operational costs of its disposal. The following wastes were selected: coal fines, from the burning of eucalyptus; cassava bagasse, a residue from the processing of cassava roots; and malt bagasse, a residue from the artisanal production of beer. The waste was collected in the cities of Maripá and Nova Santa Rosa, in western Paraná, and was characterized by determining moisture, ash, proteins, lipids, carbohydrates and particle size. A 32-block experimental design was used to develop the briquettes, varying the mixtures at three levels, using two types of binders, cornstarch and cassava starch, in addition to using two different temperatures (25 and 60 °C), resulting in four blocks. To determine the characteristics of the briquettes, their calorific value, axial compression strength and density were evaluated. The briquettes presented calorific properties suitable for use as solid fuel, ranging from 16.629 to 27.446 MJ kg⁻¹, density ranged from 674 to 1036 kg m⁻³, and axial compression strength of the briquettes ranged from 3 to 23.6 MPa. After statistical analysis of the results, the variables cassava bagasse, malt bagasse, starch binder and 60 °C were selected, and these variables were applied to experimental design 22 to adjust the best performance levels of the mechanical resistance of the briquettes, obtaining a response surface. When applying the path of maximum inclination on the response surface, aiming at optimizing the mechanical resistance of the briquettes, the following conditions were obtained: mixture of 77% cassava bagasse, 23% malt bagasse, temperature of 44 °C, starch binder concentration of 9%, humidity of 10% and pressure of 9 tons, with mechanical resistance of 24.86 MPa, calorific value of 17.6 MJ kg⁻¹ and density of 1095 kg m⁻³. It was possible to conclude in this work that agro-industrial waste such as cassava bagasse and malt bagasse can be used in the briquetting process, resulting in a second-generation solid biofuel alternative, reducing the environmental impacts of these wastes, in addition to generating thermal energy.

Keywords: agroindustry; solid waste; briquette; energy.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- Matérias-primas utilizadas no estudo: (a) finos de carvão, (b) bagaço de malte, (c) bagaço de mandioca.	42
FIGURA 2- Prensa hidráulica utilizada no processo de briquetagem.....	47
FIGURA 3- Molde cilíndrico e embolo utilizado na briquetagem.	48
FIGURA 4- Briquete resultante da mistura das matérias-primas.....	49
FIGURA 5- Efeitos da interação entre as variáveis aglutinante, temperatura e mistura para a resposta de resistência mecânica.	58
FIGURA 6- Gráfico de distribuição da RM entre blocos e tratamentos.	59
FIGURA 7- Gráfico de distribuição da RM do planejamento fatorial 2^2	62
FIGURA 8- Gráfico da superfície de resposta do planejamento fatorial 2^2	63
FIGURA 9- Curvas de nível da superfície de resposta do planejamento fatorial 2^2 . .	63
FIGURA 10- Gráfico de TGA dos materiais e do briquete otimizado.	67
FIGURA 11- Gráfico de DSC dos materiais e do briquete otimizado.	69
FIGURA 12- Estrutura molecular dos materiais e briquete otimizado.	70

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- Aglutinantes e temperaturas testadas para obtenção dos briquetes.....	47
TABELA 2- Composição das misturas para obtenção dos briquetes em cada bloco.	48
TABELA 3- Caracterização centesimal e granulometria das matérias-primas.	53
TABELA 4- Avaliação das propriedades físicas, mecânicas e energéticas dos briquetes do bloco 1, usando aglutinante amido e temperatura 25°C.....	54
TABELA 5- Avaliação das propriedades físicas, mecânicas e energéticas dos briquetes do bloco 2, usando aglutinante amido e temperatura 60°C.....	55
TABELA 6- Avaliação das propriedades físicas, mecânicas e energéticas dos briquetes do bloco 3, usando aglutinante polvilho, temperatura 25°C.....	55
TABELA 7- Avaliação das propriedades físicas, mecânicas e energéticas dos briquetes do bloco 4, usando aglutinante polvilho, temperatura 60°C.....	55
TABELA 8- ANOVA para a resposta RM ($\alpha = 0,05$).	58
TABELA 9- Melhores RM obtidos conforme Figura 5.....	58
TABELA 10- Melhores RM entre blocos e tratamentos.....	59
TABELA 11- Níveis do planejamento fatorial 2^2	60
TABELA 12- RM dos briquetes do planejamento fatorial 2^2	61
TABELA 13- ANOVA dos briquetes do planejamento fatorial 2^2	61
TABELA 14- Níveis para o deslocamento sobre a superfície.....	64
TABELA 15- RM dos briquetes após o deslocamento sobre a superfície de resposta.	65
TABELA 16- Caracterização elementar dos materiais e briquete otimizado.	72

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

(atm) - atmosfera (unidade de pressão).
(kgf) – Quilograma força (unidade de gravidade).
(mesh) - Número de Aberturas Presentes em uma Polegada Linear.
(MJ) – Mega Joule (unidade de trabalho ou energia).
(MPa) – Mega Pascal (unidade de pressão e tensão).
(p) – p valor.
AG – Aglutinante.
AGA – Aglutinante Amido.
AGP – Aglutinante Polvilho.
ANOVA – Análise de Variância.
ASTM – American Society for Testing and Materials.
BML – Bagaço de Malte.
BMM – Bagaço de Mandioca.
BSG – Brewer's Spent Grain.
DN – Densidade.
DSC – Calorimetria Exploratória Diferencial.
EDS – Espectrômetro de Energia Dispersiva.
F - Desvio Padrão.
FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura.
FCV – Finos de Carvão Vegetal.
GL – Grau de Liberdade.
ISO – Organização Internacional de Normalização.
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura.
MQ – Quadrados Médio.
NBR - Associação Brasileira De Normas Técnicas.
ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.
ONU – Organização das Nações Unidas.
PCI – Poder Calorífico Inferior.
PCS – Poder Calorífico Superior.
PROP – Proporção.
RM – Resistência Mecânica.

(SQ) – Soma dos Quadrados.

SSD – Silicon Drift Detector.

TG – Análise Termogravimétrica.

TGA – Análise Termogravimétrica.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	19
2.1. OBJETIVO GERAL	19
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1. ENERGIAS RENOVÁVEIS	20
3.2. RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS	22
3.2.1. Bagaço de Mandioca (<i>Manihot sp.</i>)	23
3.2.2. Bagaço de Malte (<i>Hordeum sp.</i>)	24
3.2.3. Finos de Carvão (<i>Eucalyptus sp.</i>)	26
3.3. BRIQUETAGEM	27
3.3.1. Principais Fatores que Afetam a Briquetagem	30
3.3.2. Aglutinante	33
3.3.3. Propriedades Importantes dos Briquetes	37
3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO DA LITERATURA	40
4. METODOLOGIA	42
4.1. MATÉRIAS-PRIMAS	42
4.1.1. Caracterização das Matérias-Primas	43
4.1.1.1. Teor de Umidade	43
4.1.1.2. Teor de Cinzas	44
4.1.1.3. Teor de Proteínas	44
4.1.1.4. Teor de Lipídeos	45
4.1.1.5. Teor de Carboidratos	45
4.1.1.6. Granulometria	46
4.1.2. Preparo das Matérias-Primas	46
4.2. PROCESSO DE BRIQUETAGEM	47
4.2.1. Caracterização dos Briquetes	49
4.2.1.1. Densidade	49
4.2.1.2. Resistência Mecânica	50
4.2.1.3. Poder Calorífico Superior	50
4.2.1.4. Análise Termogravimétrica	51

4.2.1.5. Calorimetria Exploratória Diferencial	52
4.2.1.6. Microscopia Eletrônica de Varredura	52
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS MATÉRIAS PRIMAS	53
5.2. CARACTERIZAÇÃO DOS BRIQUETES	54
5.3. EFEITO DAS VARIÁVEIS.....	57
5.4. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	60
5.5. CARACTERIZAÇÃO DO BRIQUETE OTIMIZADO.....	66
5.5.1. Propriedades Termogravimétricas	66
5.5.2. Propriedades Morfológicas e Composicionais.....	70
6. CONCLUSÕES	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
APÊNDICE 1	93
APÊNDICE 2.....	97

1. INTRODUÇÃO

A globalização vem causando importantes transformações sociais maximizada pelo crescimento populacional dos diversos países ao longo dos últimos anos, sendo que o crescimento econômico e social de um país está atrelado ao seu nível de consumo e demanda de energia (BREYER et al., 2017), sendo assim é importante a busca de novas fontes de energia.

Atualmente a maior disponibilidade de energia dos países está sendo suportada pela queima de combustíveis fósseis, como carvão e petróleo. Estima-se que o uso de combustíveis fósseis tem um efeito significativo na degradação ambiental ao longo prazo. As atuais políticas de transição energética não são suficientes para atender às demandas de sustentabilidade ambiental (ONIFADE et al., 2021).

Com isso, o uso de energias renováveis promove o desenvolvimento sustentável, por meio de tecnologias que possibilitem a eficiência energética. O desenvolvimento sustentável é buscado em muitos países, com a substituição dos hidrocarbonetos fósseis por fontes de energias renovável para suportar o crescimento industrial e doméstico (WU & LEE, 2020).

Uma das fontes de energia renovável mais conhecida e usada é a biomassa. Ela é a única fonte renovável com carbono fixo, essencial para atender a diversos requisitos de combustíveis e bens de consumo (ALARENAN et al., 2020).

A biomassa é uma fonte limpa, podendo ser obtida a partir de insumos de origem orgânica, como madeira, culturas anuais e resíduos agrícolas. Sua utilização está alinhada com as estratégias energéticas, com a utilização da biomassa de primeira e segunda geração em produção de energia renovável. Uma mudança no perfil de geração de energia para incineração de biomassa pode ajudar a reduzir as emissões gerais de gases do efeito estufa (MARTINEZ et al., 2020).

A biomassa, *in natura*, geralmente não é recomendada como fonte de energia devido às suas características, como: baixa densidade aparente, alto teor de umidade e baixa densidade energética, causando altos custos de transporte, armazenamento e manuseio. Para a viabilidade técnica de sua utilização são necessárias adaptações na cadeia de fornecimento, a fim de facilitar a seleção, homogeneização e armazenamento de biomassa, para garantir a disponibilidade de quantidades suficientes para sustentar o processo de produção (ROJAS et al., 2018).

A densificação da biomassa é um método eficiente, que mantém características desejáveis para os biocombustíveis sólidos, como maior densidade aparente e energética, dureza e resistência. A densificação da biomassa pode ser feita na forma de briquetes, pellets, cubos ou discos. Resíduos da agricultura, silvicultura, têxtil e os setores de alimentos podem ser usados para fabricar briquetes (NINO et al., 2020).

Neste trabalho, foram produzidos briquetes a partir de resíduos de carvão e agroindustriais como o bagaço de mandioca e o bagaço de malte. Os briquetes são combustíveis onde a conversão de energia ocorre por meio da queima direta e são utilizados para aquecimento e cocção, no uso doméstico ou industrial, com principal aplicação em câmaras de leito fixo, devido à sua estrutura física (KHLIFI et al., 2020).

No Brasil, os briquetes são usados como substitutos da lenha em padarias, pizzarias, estabelecimentos alimentícios e fábricas com forno a lenha, como as de tijolos vermelhos (MARREIRO et al., 2021).

As adequadas seleção e configuração das variáveis de processamento são fundamentais para a otimização da briquetagem. Parâmetros como pressão, temperatura, granulometria, tipo de aglutinante e características da biomassa escolhida têm grande influência na resistência à compressão, densidade e potencial energético dos briquetes (NAVALTA et al. 2019). A otimização da briquetagem proporciona o desenvolvimento de biocombustíveis de forma mais sustentável, reduzindo os impactos ambientais.

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) são uma agenda global adotada pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015, composta por 17 objetivos e 169 metas, que visam promover o desenvolvimento sustentável em diversas dimensões, como a erradicação da pobreza, a proteção do meio ambiente e a garantia da paz e da justiça para todos até 2030 (NAÇÕES UNIDAS, 2024).

A sustentabilidade e eficiência de recursos que enfatizem a sustentabilidade, o uso eficiente de recursos naturais e a promoção de energias renováveis, fazem parte da seleção de ODS direcionada para aqueles que apoiam a transição de práticas mais sustentáveis na geração de energia e na gestão de resíduos. O processo de densificação agrega valor a resíduos frequentemente subutilizados, contribuindo para a mitigação de problemas ambientais relacionados ao descarte inadequado e ausência de tratamento desses resíduos, promovendo sustentabilidade e responsabilidade ambiental. O aproveitamento de resíduos é um critério essencial

para a relevância dos ODS na abordagem de aproveitamento de resíduos. A metodologia empregada enfatiza a importância de utilizar os resíduos de biomassa de maneira sustentável, evitando a extração adicional de recursos naturais e promovendo uma economia circular (IMBERTI, 2024).

Devido a geração de diversos resíduos agroindustriais, principalmente os finos de carvão, bagaço de mandioca e bagaço de malte, os quais apresentam baixo aproveitamento, a briquetagem se mostra promissora, para a utilização de resíduos agroindustriais na produção de briquetes, a fim de gerar biocombustível, sendo uma fonte energética.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral contribuir com a sustentabilidade ambiental nas agroindústrias brasileiras, por meio da avaliação da viabilidade técnica do briquete produzido a partir de resíduos da indústria de carvão, fecularia e cervejaria para queima em queimadores ou fornos industriais em substituição a lenha, aumentando sua eficiência energética.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar se o carvão em consórcio com o bagaço de mandioca e bagaço de malte tem potencial de uso como fonte de energia térmica por meio da densificação na forma de briquetes;
- Avaliar o efeito da temperatura e do uso de amido e polvilho como aglutinantes na fabricação dos briquetes;
- Avaliar as respostas de saída densidade, resistência a compressão axial e poder calorífico superior, dos briquetes resultantes;
- Selecionar as variáveis mais significantes;
- Aplicar o planejamento experimental fatorial sobre as variáveis mais significantes;
- Realizar a caracterização térmica e morfológica dos briquetes obtidos;
- Otimizar a produção de briquetes, a fim de obter mais resultado de resistência mecânica;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. ENERGIAS RENOVÁVEIS

A população mundial está em constante crescimento aumentando a demanda por alimentos e energia. Segundo a ONU (2022), a população mundial em 2050 chegará próximo a 10 bilhões, representando um crescimento de 24,36% até 2050, este crescimento deve ocorrer principalmente nos países em desenvolvimento. Além disso, a ONU projeta que o crescimento da população mundial possa levar mais 2,5 bilhões de pessoas para áreas urbanizadas até 2050 e, esse processo de urbanização deverá ocorrer em conjunto com o crescimento da renda per capita e mudanças no comportamento de consumo da população mundial, elevando a demanda alimentar e energética.

No entanto, a expansão agrícola é bastante restrita. De acordo com a FAO (2019), a disponibilidade de novas áreas agrícolas está centrada em poucos países, aproximadamente 90% das terras para expansão agrícola estão na América Latina e na África. Países como a China e os EUA deixaram de ter novas áreas para exploração agrícola, pois já esgotaram suas fronteiras agrícolas. Na América Latina, o Brasil se destaca como um importante produtor mundial de alimentos e possui grande potencial para a ampliação da oferta, sendo um dos principais fornecedores para atender as demandas mundiais. Associado ao posicionamento como fornecedor global está a necessidade de uma gestão eficaz dos resíduos gerados pela atividade, principalmente quanto à destinação dos resíduos gerados durante o processo produtivo.

Os problemas ambientais da atualidade, causados em grande parte pelas emissões de Gases do Efeito Estufa, devido a queima de combustíveis fósseis, além da crescente demanda por energia, abrem espaço para a busca por fontes de energia renováveis e por combustíveis mais limpos, com a intenção de garantir o desenvolvimento econômico sem que ocorra agravamento dos impactos ambientais (ALI et al., 2019).

Do ponto de vista ambiental e econômico, a biomassa se destaca como uma alternativa de fonte de energia primária e renovável. A biomassa é um recurso obtido através da matéria orgânica e pode ser convertido em combustível gasoso, líquido ou

sólido, e seu emprego na produção de energia apresenta grande potencial de crescimento, uma vez que sua disponibilidade é abundante no país (EPE 2022).

Globalmente, a energia de biomassa é uma importante energia renovável, sendo uma importante ferramenta energético nacional, tanto para os países desenvolvidos como para os países em desenvolvimento, no sentido de alcançar energia sustentável para aplicações de aquecimento, reduzindo impacto ambiental, criando bioeconomias, reduzindo a dependência excessiva de combustíveis fósseis, melhorando a qualidade da vida rural e urbana e para a produção de vários biocombustíveis (HOANG, 2021).

A biomassa é reconhecida como uma fonte de energia verde na produção de biocombustíveis, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa geradas pelo consumo de combustíveis fósseis. A biomassa é utilizada para produção de diferentes biocombustíveis líquidos, como o biodiesel e o bioetanol, por meio do emprego de técnicas de conversão e extração bioquímica, além da produção de biocombustíveis sólidos, como pellets, briquetes ou toras os quais são usados em processos de conversão termoquímica, incluindo pirólise, combustão e gaseificação. Portanto, os recursos de biomassa provenientes de resíduos agrícolas, plantas e subprodutos agroalimentares são considerados importantes fontes de bioenergia. A biomassa ocupa o terceiro lugar no mapeamento energético em todo o mundo, depois do carvão e petróleo apenas (KHLIFI et al., 2020).

O termo biomassa se refere a todos os materiais biológicos derivados de organismos vivos, incluindo animais e plantas. No contexto da briquetagem de biomassa, um exemplo de a biomassa inclui uma ampla gama de materiais, como aparas de madeira provenientes de florestas operações, resíduos agrícolas de atividades de agro processamento, resíduos industriais, animais, e resíduos domésticos e municipais, a energia contida na biomassa pode ser liberada através de combustão direta ou convertido em outros biocombustíveis (SAHU, et al., 2014).

O uso predominante de fontes de biomassa vegetal pode ser atribuído à sua ampla disponibilidade em comparação com a biomassa derivada de animais. Além dos resíduos agroflorestais, utilização de resíduos urbanos e industriais para briquetagem tem crescido, devido ao aumento da migração rural urbana, resultando no aumento da geração de resíduos sólidos industriais. Os resíduos urbanos e industriais são empregados na briquetagem de materiais mistos, devido a

necessidade crescente de gerir eficazmente esses resíduos de forma sustentável (TUMULURU, et al., 2021).

3.2. RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

O beneficiamento e industrialização de alimentos na agroindústria gera grande quantidade de resíduo, conseqüentemente, o descarte desse resíduo no meio ambiente contribui para a contaminação do ecossistema. Com isso, a crescente preocupação com o meio ambiente incentiva a viabilização de projetos que levam à sustentabilidade do sistema de produção industrial.

A indústria de alimentos produz uma série de resíduos com alta capacidade de reutilização, com isto, minimiza o impacto ambiental desses tipos de indústria na região em que estão situadas e ainda agrega valor aos produtos do mercado (ALEXANDRE et al., 2013). Com relação aos resíduos agroindustriais, podemos citar o de mandioca, milho, soja, batata, dentre outros.

Os resíduos agroindustriais podem ser encontrados nos estados sólido, semissólido e líquido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição, assim também, como os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável, (ABNT 2004).

Os biocombustíveis são subdivididos em quatro gerações e classificados de acordo com a matéria-prima e processo de conversão. Os biocombustíveis de primeira geração são obtidos a partir de culturas alimentares, como oleaginosas e cana-de-açúcar para produção de biodiesel e bioetanol. Os biocombustíveis de segunda geração estão associados a utilização de resíduos de biomassa, com origem vegetal e a composição primária é lignina, hemicelulose e celulose. Na terceira geração utilizam-se as algas e microalgas com altos teores de açúcares para a produção de bioetanol. A quarta geração utiliza engenharia genética para modificar o metabolismo celular de algas e cianobactérias para aumentar a produção de biocombustíveis (DESOUKY et al. 2021).

No entanto, a produção de briquetes está associada a biocombustíveis de segunda geração, promovendo o reaproveitamento de resíduos agrícolas e florestais, como caule, casca, folhas, palha, madeira ou serragem de espécies como o eucalipto (*Eucalyptus* sp.) e pinheiro (*Pinus* sp.) (MORALES et al. 2020).

Diversos resíduos agrícolas podem ser utilizados, como por exemplo, cascas, espigas e palha de milho misturadas com outras biomassas, como casca de mandioca (*Manihot* sp.) e casca de dendê (*Elaeis* sp.) (WAHEED et al. 2020).

3.2.1. Bagaço de Mandioca (*Manihot* sp.)

Resíduos agrícolas correspondem entre 40 e 60% da planta, sendo estes resíduos gerados durante a colheita e processamento das culturas e, consistem em folhas, caules e raízes descartados. O custo para gerenciar esses resíduos é alto, o que aumenta o descarte inadequado e contribui para a poluição do meio ambiente (GO et al., 2019).

A mandioca gera uma grande quantidade de resíduos agrícolas, pois é uma cultura cuja raiz é utilizada para consumo humano e produção de amido. Após a retirada da raiz, parte do caule da mandioca é separado para uso no replantio e o restante é descartado e deixado no campo, além do bagaço de mandioca gerado ao final do processamento da raiz para obtenção do amido (LISSETH et al., 2019). Veiga et al., (2016) observaram que a geração de resíduos no cultivo e processamento da mandioca pode chegar 316 kg (massa seca) para cada tonelada raiz colhida.

O cultivo da mandioca é uma importante atividade econômica em diversos países tropicais, com destaque para o Brasil e a Tailândia. No Brasil, a produção de mandioca se concentra nos estados do Paraná e Mato Grosso do Sul, com algumas indústrias também em São Paulo, Santa Catarina, Minas Gerais e Ceará. No processamento da raiz da mandioca para obtenção de amido, além da extração do amido são gerados resíduos como a manipueira e o bagaço em volumes significativos. O bagaço apresenta características fibrosas, com teor de umidade frequentemente superior a 80 % (m/m) ao final do processo. Devido à grande capacidade de retenção de água do material fibroso-amiláceo, o processo de secagem e o transporte se tornam caros (ZENATTI et al., 2015).

Apesar do potencial energético dos resíduos de mandioca, algumas barreiras existem, tais como transporte, armazenamento e determinação da melhor maneira de queimar os resíduos, devido à baixa densidade, alta teor de umidade e formato irregular dos resíduos verdes. A densificação é uma importante alternativa para o consumo destes resíduos de mandioca para produção de briquetes (BAJWA et al., 2018).

Atualmente, bagaço de mandioca gerado no processamento da mandioca é mais comumente destinado a alimentação animal como fonte de fibras em substituição ao capim volumoso, porém pode ser parcialmente hidrolisado com a conversão do amido e da celulose em açúcares fermentescíveis para a produção de etanol ou de diversos outros bioprodutos. Os processos conhecidos para obtenção desses açúcares incluem o tratamento hidrolítico com ácidos ou com enzimas (FREITAS et al., 2017).

O bagaço de mandioca pode ser utilizado como substrato em processos microbiológicos e na obtenção de bandejas como suportes biodegradáveis para plantas, reduzindo assim o impacto ambiental dos plásticos comumente utilizados. Para ser possível a utilização de bagaço de mandioca como matéria-prima, faz-se necessária sua secagem, porém o método convencional consome muita energia resultando em aumento do custo do produto (PANDEY et al., 2000).

3.2.2. Bagaço de Malte (*Hordeum sp.*)

A cerveja, uma das bebidas mais produzidas e consumidas no mundo, caracteriza-se por ser uma bebida fermentada e de baixo teor alcoólico. Seu principal ingrediente, o malte de cevada, é um material rico em amido que fornece açúcares fermentescíveis que são substratos para as leveduras produzirem etanol. A cevada (*Hordeum sp.*) pertence à família das gramíneas e sua utilização é desde o Egito Antigo. Ela apresenta características próprias, as quais possibilitam seu cultivo em regiões onde a alcalinidade dos solos, geadas e secas dificultam o cultivo de outros cereais (AGEITEC 2017).

A venda de cerveja no Brasil ultrapassou 13 bilhões de litros em 2020, a média de consumo anual de cerveja por brasileiros é de aproximadamente 65 L por pessoa, segundo a Associação Brasileira de Supermercados (ALVES, 2023).

A produção de cerveja movimenta a economia, sustenta famílias e promove o desenvolvimento local, observa-se a relevância econômica e até mesmo social desta bebida, no entanto, o aumento na produção de cerveja por cervejarias de menor porte, gerou o aumento de um passivo ambiental, devido a geração de resíduos, que muitas vezes não tem um destino final correto (ROSA, 2018).

Um revés à alta produção é a grande quantidade de resíduos sólidos e líquidos gerados nas indústrias. O principal e mais abundante é o bagaço de malte, ou BSG

(sigla do inglês “brewer’s spent grain”), gerado na etapa de mosturação, correspondendo a 85% de todos os resíduos gerados. A composição do bagaço de malte é diversa, desde que é resultante da variedade de tipos comerciais e processos de fabricação de cerveja existentes. Em geral é composto por celulose (16,8% - 20,6%), hemiceluloses (18,4 - 28,4%), lignina (9,9 - 27,8%), proteínas (15,3 - 26,6%), extrativos (5,2 - 5,8%) e cinzas (2,7 - 4,6%), (QIN et al., 2018).

O bagaço de malte é o resíduo resultante do processo inicial da fabricação de cervejas, que provém do processo de obtenção do mosto. A malteação é um processo controlado de germinação da cevada, onde o grão é embebido em água e mantido a 10-12°C, produzindo um complexo de enzimas capazes de converter o amido do cereal em açúcares fermentescíveis, além de fornecer aminoácidos em quantidades adequadas e outros nutrientes para a ação da levedura, pela fervura do malte moído e dos adjuntos, que após a filtração é constituído basicamente pelas cascas da cevada malteada, sendo encontrado disponível o ano todo, em grandes quantidades e a um baixo custo (MASSARDI et al., 2020).

É quantitativamente o principal subproduto do processo cervejeiro, sendo gerado cerca de 14 a 20 kg a cada 100 L de cerveja produzida, sendo que este resíduo pode ser destinado a consumo animal, sendo que já existem estudos que avaliam a secagem e processamento para consumo humano (CORDEIRO et al., 2012).

Por muito tempo foi utilizado como insumo agrícola para compor a nutrição do solo, ou ainda para complementação da alimentação animal, introduzindo na produção de ração. Embora seja uma destinação ecologicamente viável, ainda sim está longe de ser a melhor utilização para o bagaço gerado. Estudos recentes, mostram que o aproveitamento dos resíduos de biomassa, utilizados na indústria, possuem alta aplicabilidade na produção de outros compostos com maior valor agregado, tornando um passivo ambiental em um ativo econômico (ALVES, 2023).

A composição química deste resíduo (bagaço de malte) possibilita a aplicação em diversos produtos de valor agregado, devido ao alto teor de fibras lignocelulósicas e proteínas, podendo ser utilizado para produção de etanol de segunda geração, carvão hidrotérmico, ácido lático, 5-hidroximetilfurfural, além de nutrição humana (MASSARDI et al., 2020).

3.2.3. Finos de Carvão (*Eucalyptus sp.*)

No Brasil, a utilização de madeira para a geração de energia é historicamente relacionada à produção de carvão vegetal, decorrente da demanda existente pelo produto junto ao setor siderúrgico. A transformação da madeira em carvão vegetal é obtida pela ação do calor por meio da pirólise, com o intuito de concentrar carbono e retirar o oxigênio (SILVA et al, 2014).

O Brasil é o maior produtor de carvão vegetal, contribuindo com cerca de 30 % de todo o carvão produzido no mundo, a produção anual de carvão é de aproximadamente 9 milhões de toneladas, sendo destaque na economia brasileira, principalmente, na economia do Estado de Minas Gerais, uma vez que o seu consumo representa 66,7% do total de carvão vegetal consumido no país carvão sendo utilizado na indústria siderúrgica, cerâmica, cimenteira e alimentos, além do setor doméstico para preparação de churrasco (RODRIGUES et al., 2017).

Um dos problemas associados à produção de carvão vegetal no Brasil, diz respeito à origem da matéria-prima, pois cerca de 50% da matéria-prima destinada à produção de carvão vegetal é oriunda de matas nativas. Por se tratar de um material muito friável, ou seja, passível de sofrer fragmentação ou esfarelamento durante sua manipulação, gera perdas consideráveis (25% são perdidos na forma de finos de carvão), os quais possuem uma granulometria abaixo de 9 mm, sendo empregados na produção de substratos para cultivos de flores, sendo que grande parte deste resíduo é descartado de forma inadequada no ambiente (SILVA et al, 2014).

A quantidade de resíduos sólidos, líquidos e gasosos tem crescido continuamente devido a ação antrópica e ao desenvolvimento social, científico e tecnológico. A disposição dos resíduos industriais e domésticos têm sido tema de grande discussão na comunidade acadêmica, devido aos riscos de poluição ambiental por eles causados (OLIVEIRA, 2017).

Os resíduos em condições favoráveis, podem contribuir de maneira significativa na geração de energia elétrica e térmica. As características físicas e químicas dos resíduos sólidos para o uso de energia alternativa são parâmetros que determinam seu comportamento frente a condições de combustão e pirólise (STOLARSKI et al., 2013).

Uma alternativa promissora para reduzir o impacto ambiental destes resíduos é a densificação em briquetes. Nesse contexto, a técnica de densificação pode

aumentar a densidade energética, resultando em diversos benefícios, como redução de custos de transporte e necessidade de espaço de armazenamento, além de uma alimentação mais uniforme em caldeiras. No entanto, a sustentabilidade da densificação também depende do consumo de energia, emissões e custos associados à própria densificação e aplicação de briquetes (SILVA et al., 2017).

3.3. BRIQUETAGEM

A briquetagem surgiu por uma necessidade energética do povo europeu, durante a primeira guerra mundial, sendo seu princípio baseado na compactação de resíduos sólidos, com objetivo de obter um combustível sólido com maior poder calorífico e resistência mecânica.

Os resíduos agroindustriais são fontes promissoras para a produção de biocombustíveis sólidos, podendo ser utilizados para cogeração de energia elétrica e térmica, suprimindo necessidades de diversas atividades e reduzindo grande parcela de impactos ambientais. Os biocombustíveis sólidos residuais são possíveis substitutos a lenha nos setores agropecuário e industrial, como consequência de um aumento do custo da lenha e de uma redução de custos dos biocombustíveis sólidos (NALEVAIKO et al., 2021).

A biomassa densificada, também chamada de briquete, é um exemplo de combustível sólido cuja conversão de energia é feita por combustão direta, podendo ser utilizada para uso doméstico ou industrial, podendo ser utilizada em câmaras de leito fixo, devido à sua estrutura física. Na Europa, países como Suécia, França, Áustria, Suíça e Alemanha utilizam sistemas de aquecimento de biomassa em pequena escala; no Brasil, os briquetes são utilizados como substitutos da lenha, porém, o uso de briquetes de biomassa para fins energéticos ainda não está totalmente difundido (KHLIFI et al., 2020).

Geralmente, os briquetes são produzidos por meio da combinação e compactação de biomassa lignocelulósica, sendo as matérias-primas de origem vegetal. A sua composição primária é lignina, hemicelulose e celulose, na forma de matéria-prima orgânica, como por exemplo, os resíduos da produção de biomassa agrícola, resíduos de biomassa industrial, resíduos de biomassa urbana e carvão. O processo de briquetagem resulta em um produto que tem uma densidade maior do que seus materiais *in naturas*, proporcionando uma relação espaço-peso superior à

da madeira cortada ou cavacos, tornando o transporte e a armazenagem mais eficientes (SAWADOGO et al., 2018).

Os pellets de biomassa são produtos do processo de densificação, e são relativamente menores em comparação com os briquetes. Eles geralmente têm formato cilíndrico com diâmetro entre 3 e 27 mm e comprimento entre 3 e 31 mm. Os briquetes de formato cilíndrico têm geralmente entre 18 e 55 mm de diâmetro e 10 e 100 mm de comprimento, porém, não existem padrões reconhecidos que distinguem pellets de biomassa e briquetes (GILVARI et al., 2019).

Para o processo de briquetagem, a biomassa passa por alguns pré-tratamentos, que podem variar de acordo com as características naturais do material e a disponibilidade de tecnologia, sendo realizado secagem ao sol em condições ambientes ou em estufas a fim de reduzir a umidade (HELWANI et al., 2020).

Os pré-tratamentos térmicos de carbonização e torrefação são empregados para aumentar as características energéticas do combustível, uma vez que o processo resulta no aumento a quantidade de carbono fixo da biomassa e na qualidade física dos briquetes, quanto à durabilidade, densidade e compressão, no entanto, estes procedimentos exigem um gasto extra de energia, pois necessitam de aquecimento em temperaturas que podem variar de 180 a 500°C (WAHEED & AKOGUN, 2020).

A moagem ou trituração da biomassa em moinhos de martelo e faca antes da classificação granulométrica, por meio de peneiras, auxilia na redução e homogeneização das partículas permitindo uma melhor compactação da matéria-prima, influenciando nas suas características físicas e mecânicas (FRANCIK et al., 2020). Dependendo da biomassa, não é necessário realizar tais processos, como por exemplo, a casca de arroz (*Oryza sp.*) *in natura*. Maia et al. (2017) estudaram este resíduo e verificaram que o teor de umidade estava adequado para briquetagem (10 %), bem como sua granulometria inicial.

A produção de briquetes pode ser realizada em processos automatizados de grande escala com maior controle das condições de processo, que normalmente visam atender o mercado de biocombustíveis, exigindo produção eficaz e melhor relação custo-benefício, ou manualmente por meio de prensas hidráulicas ou dispositivos mecânicos manuais. Os briquetes produzidos em equipamentos hidráulicos admitem teores de umidade superiores a 15% e possuem densidades unitárias que variam de 800 a 1000 kg m⁻³ (MORALES et al., 2020). Os briquetadores

manuais são geralmente mais simples de operar. Eles operam em pressões mais baixas e podem ter componentes de aquecimento, porém produzem briquetes com menor densidade (KPALO et al., 2020).

A briquetagem consiste em síntese na densificação de partículas soltas de material sólido em um combustível de alta densidade. A biomassa densificada na forma de briquetes pode assumir diferentes formas e tamanhos, incluindo cilíndrico, cúbico e retangular, com ou sem furo no centro (OBI et al., 2022).

Os parâmetros mais utilizados para a produção de briquetes são a temperatura de briquetagem, a proporção da mistura de biomassa, presença de ligante, tempo de prensagem dos briquetes durante sua produção, teor de umidade da matéria-prima, pressão de compactação e granulometria do material (MARREIRO et al., 2021). É importante que estes parâmetros operacionais sejam definidos, e a matéria-prima seja classificada de acordo com seu tamanho e distribuição.

Associação de diferentes matérias-primas permite o reaproveitamento energético em situações em que há excesso de resíduos, sendo a mistura de biomassas na produção de briquetes, fundamentada na busca pela relação entre qualidade, disponibilidade de insumos e custo-benefício. Estes resíduos possuem características físicas como densidade, granulometria e umidade distintas, além de características químicas e composição da celulose, hemicelulose e lignina da biomassa distintas (TUMULURU & FILLERUP 2020).

A restrição na briquetagem comercial está dentro do contexto de fornecimento sustentável de recursos de biomassa, a um preço rentável e volume, sendo influenciado por uma série de fatores, incluindo a estrutura da biomassa, colheita e a distribuição geográfica dispersa da biomassa, que dificulta a sua coleta, transporte e armazenamento em larga escala. Um sistema eficiente e uma cadeia de abastecimento de biomassa eficaz torna-se assim crítico para facilitar a produção sustentável de matérias-primas, pré-processamento de materiais e fornecimento para briquetagem comercial (NUNES, et al., 2021).

Chungcharoen et al. (2020), sugeriram o uso de castanhas de caju (*Anacardium sp.*) e areca (*Areca sp.*) de tamanhos pequenos na briquetagem, em uma proporção composta de 65 % a 25 %, respectivamente, para produzir briquetes de alta qualidade.

Obi (2015), sugere uma proporção ideal de mistura de 1:1 para briquetes compostos de casca de palmiste (*Elaeis sp.*) e serragem. Entretanto, o aumento da adição de casca de palmiste reduziu a qualidade dos briquetes.

Lubwama et al. (2020), demonstraram os benefícios da produção de briquete composto de cascas arroz, cascas de café (*Coffea sp.*) e cascas de amendoim (*Arachis sp.*) sobre briquetes de constituinte único. O estudo relatou melhor transferência de calor em briquetes compostos de casca de café e arroz sem ligantes quando colocados sequencialmente na composição do briquete.

3.3.1. Principais Fatores que Afetam a Briquetagem

Neste capítulo serão abordados os principais fatores que afetam a briquetagem. Diversos parâmetros são utilizados para atingir as características desejadas para o briquetes, que também variam de acordo com o processo produtivo aplicado.

Marreiro et al., (2021) observaram os parâmetros para produção dos briquetes, a granulometria foi a variável de processo mais frequente entre os pesquisadores analisado. Esta refere-se ao tamanho das partículas de biomassa para compor os briquetes, dando uniformidade. A pressão aplicada na produção dos briquetes também foi bastante explorada, sendo um dos principais parâmetros associados ao equipamento de briquetagem. A umidade inicial da matéria-prima foi a terceira variável com maior ocorrência entre as pesquisas. Vale a pena mencionar que a umidade na produção de briquetes é importante para ativar alguns ligantes, como amido, auxiliando no processo de densificação (KUMAR et al., 2020). Variáveis como temperatura, o tipo de biomassa, a velocidade de compactação e o tempo de resfriamento dos briquetes após sua produção, foram os parâmetros com menor frequência entre os estudos. Sendo, portanto, os parâmetros discutidos na sequência.

A seleção das matérias-primas utilizadas na fabricação dos briquetes também pode impactar diretamente nas suas propriedades mecânicas. Em alguns casos é necessário realizar o processo de trituração, o qual é realizado por meio de moinho de martelo ou facas para a redução e a homogeneização das partículas, permitindo uma melhor compactação da matéria-prima, influenciando suas características físicas e mecânicas (FRANCIK et al., 2020).

A mistura de mais materiais na produção de briquetes tem sido alvo de pesquisas que buscam encontrar a relação adequada entre qualidade, disponibilidade de insumos e custo-benefício. A associação de diferentes matérias-primas possibilita diferentes características físicas, como densidade, granulometria e umidade, além de modificar as características químicas como a composição da celulose, hemicelulose e lignina da biomassa (MARREIRO et al., 2021).

A combinação de materiais promove o reaproveitamento energético dos resíduos provenientes algumas culturas ou processos, trazendo benefícios ambientais e socioeconômicos, sendo necessário aplicar técnicas de processamento adequadas, pois as características de cada material influenciam no manuseio, na qualidade do produto e os custos com consumo de energia (MUAZU et al., 2015).

Conhecer o teor de cinzas de um combustível é essencial para avaliar sua qualidade, uma vez que, quando se trata de combustível, quanto menor o teor de cinzas, significa que há maior quantidade de material combustível para queima, já que esta é considerada um material inorgânico (DUCA et al., 2014).

Parâmetros como uniformidade e distribuição de partículas das matérias-primas afetam diretamente as propriedades físicas e mecânicas dos briquetes, quanto maior o tamanho das partículas, maior a energia necessária para adensar a biomassa. Uma distribuição homogênea das partículas durante a densificação aumenta a área de contato, permitindo alcançar maior resistência mecânica e menor abrasão durante o manejo e o transporte dos briquetes (FRANCIK et al., 2020).

O armazenamento, emissões de energia, o poder calorífico, a secagem e a durabilidade dos briquetes pode ser influenciada pelo tamanho das partículas. A distribuição de partículas, em seus diversos tamanhos, é uma característica importante do material de entrada no processo de briquetagem. Assim como o tamanho das partículas pode não ser uniforme, a sua distribuição dentro do briquete também não é. Normalmente, as partículas menores aglomeram-se no fundo dos briquetes, enquanto os maiores estão no meio (MARTINEZ et al., 2019).

A distribuição homogênea de tamanho das partículas durante a briquetagem pode garantir o maior contato entre as partículas de diferentes tamanhos trazendo maior resistência mecânica e menor abrasão durante o manuseio e transporte dos briquetes. Durante a compactação da biomassa temos uma diferença significativa entre a expansão volumétrica de partículas maiores e partículas menores. Os espaços

entre as partículas maiores são ocupados pelas menores, causando maior coesão entre elas e menor taxa de expansão, afetando a qualidade dos briquetes (RAMOS et al., 2020).

A utilização de temperaturas entre 120 e 150°C pode otimizar a densificação da biomassa, no entanto a utilização de temperaturas mais baixas, reduz o gasto energético para produção dos briquetes. O emprego pressão mais alta e biomassa com baixa granulometria, são parâmetros que viabilizam a redução da temperatura de briquetagem. O aumento da temperatura, em casos de biomassa com baixa umidade, causa um efeito de endurecimento dos briquetes e torna-os mais densos (KHLIFI et al., 2020).

O calor gerado com a temperatura na briquetagem é capaz de ativar os ligantes naturais da biomassa, como lipídios, lignina, amido e proteína, ou ligantes adicionados, por meio de forças de atração entre as partículas, em altas temperaturas ocorre a deformações plásticas de partículas termoplásticas, possibilitando a formação de permanentes ligações no material, o calor aplicado na produção dos briquetes é capaz de alterar suas propriedades físicas, mecânicas e energéticas. A temperatura tem influência sobre as características finais dos briquetes, no entanto, a variável é diretamente relacionada os recursos que o equipamento de briquetagem possui. Por esta razão, o tipo de máquina utilizada na densificação da biomassa pode ser uma limitação para a exploração desta variável (NAVALTA et al., 2019). A temperatura de briquetagem, de modo geral não deve exceder 300°C para evitar o risco de decomposição da biomassa, porém deve-se observar a temperatura máxima suportado pelos materiais da misturada (GROVER et al., 1996).

A pressão é um dos fatores mais importantes no processo de densificação da biomassa, sendo considerada alta quando igual ou superior a 100 MPa, intermediária para valores entre 5 e 100 Mpa e é considerada baixa quando é inferior a 5 Mpa. A pressão influencia na resistência à compressão, pois atua em nível molecular sobre os constituintes naturais da biomassa, como lipídios, lignina, amido e proteína (KPALO et al. 2020).

Segundo Nunes et al. (2019), o nível de pressão do processo de briquetagem normalmente não altera as características do material como valor calorífico, porém, tem grande influência nas propriedades físicas e mecânicas de briquetes, bem como no teor de umidade e cinzas.

O tempo de prensagem é importante parâmetro a ser observado, pois corresponde ao tempo em que a biomassa permanecerá no molde durante a compactação, a pressão e o tempo de compactação, são escolhidas de acordo com a configuração e a disponibilidade do equipamento de briquetagem, associado a outras variáveis, como a utilização de agente aglutinante e temperatura, determinam a densidade e resistência à compressão dos briquetes (GRANADA et al., 2020).

O tempo de compactação quando associado a outras variáveis, como a presença de aglutinante e as condições de pressão e temperatura, determinam a densidade e resistência à compressão dos briquetes, portanto, o tempo de prensagem não tem influência significativa na resistência, quando sob condições mais elevadas pressões. Desta forma, para que a qualidade dos briquetes seja preservada, o tempo de retenção pode ser reduzido e proporcionar uma maior taxa de produção (GWENZI et al., 2020).

O teor de umidade é outro parâmetro importante tanto para a produção quanto para qualidade do briquete, auxiliando na densificação mais suave da biomassa, reduzindo os riscos de trincas e quebras dos briquetes. A biomassa *in natura* possui alta umidade o que dificulta sua utilização como fonte de energia direta, alguns resíduos podem conter umidade aproximada de 40%, como madeira e lodo de esgoto, sendo necessário o processo de secagem do material ao sol, em fornos ou estufas para reduzir o teor de umidade (KUMAR et al., 2020).

Materiais muito secos demonstram uma interação fraca entre as partículas, embora uma grande quantidade de água promove conexões internas frágeis e menor durabilidade dos briquetes (MARREIRO et al., 2021)

Kumar et al. (2020) produziram briquetes com o teor de umidade da biomassa entre 10 e 12% e obtiveram briquetes mais estáveis, sendo mais densos e mais fortes possibilitando realizar a briquetagem com menor consumo de energia e com um mínimo de rachaduras e trincas. Quando produzidos com o maior teor de umidade sofreram influência negativa na densidade de partículas secas e elasticidade dos briquetes.

3.3.2. Aglutinante

A biomassa geralmente contém ligantes estruturais ou agentes estabilizadores que ocorrem naturalmente, como lignina e proteínas que são liberadas e ativadas

quando a biomassa é densificada em níveis relativamente altos de temperatura e pressão, melhorando a ligação das partículas de biomassa. Quando a biomassa não contém quantidade significativa de ligante natural ou devido às condições de densificação, ligantes adicionais podem ser necessários para atingir a dureza e durabilidade desejadas do briquete (OYELARAN et al., 2015)

Os ligantes podem ser amplamente divididos em ligantes orgânicos, inorgânicos e compostos, a escolha dos ligantes entre os vários tipos depende em grande parte de uma série de fatores, incluindo a força de ligação desejada, baixas emissões, o efeito no desempenho de combustão do briquete, respeito ao meio ambiente e sustentabilidade e disponibilidade econômica (KIVUMBI et al., 2021).

Os ligantes são empregados para melhorar a ligação entre as partículas de biomassa durante a densificação, porém, o mecanismo do processo de ligação é complexo e ainda não foi totalmente compreendido. Teorias tentam explicar a ligação de partículas em densificação de biomassa, incluindo forças de atração entre partículas de biomassa, adesão e forças de coesão, pontes sólidas e ligações mecânicas interligadas, forças interfaciais e pressão capilar. Foram abordadas tanto do ponto de vista mecânico quanto do ponto de vista químico, explicando assim a influência da biomassa estrutural e química no processo de ligação durante a densificação (IBITOYE et al., 2021).

A utilização de diferentes ligantes permite a produção de briquetes de diversas formas e tamanhos, influenciando a resistência a compressão, densidade, porosidade e outras características físicas (ARANSIOLA et al., 2019).

A presença de ligante é um fator relevante para a adesão das partículas, podendo ser adicionada ao processo ou por meio de sua própria estrutura com adição de calor e pressão durante a produção (FRANCIK et al., 2020).

Ligantes orgânicos geralmente têm boas propriedades de ligação, incluindo alta resistência ao impacto, alta resistência a água, porém altas temperaturas decompõem facilmente, tendo baixa resistência térmica. São caracterizados principalmente pela ampla disponibilidade, preço baixo e baixa temperatura de ignição (HAN et al., 2014). Existindo quatro principais tipos de ligantes orgânicos que incluem biomassa, piche de alcatrão e betume de petróleo, lignosulfonato, e ligantes poliméricos (resinas, polivinil e amido). Ligantes orgânicos podem ser divididos em ligantes hidrofóbicos

(asfalto e alcatrão de carvão) e ligantes hidrofílicos (biomassa) com base em sua reação à água (MIAO et al. 2019).

Ligantes inorgânicos possuem forte adesão, baixo custo e boa hidrofobicidade, porém, sua eficiência de combustão é menor devido ao seu valor calorífico limitado, e o teor de cinzas é frequentemente alto (CHUKWUNEKE et al., 2021). Podem ser classificados em três principais tipos, industrial (argila bentonita, cimento, silicato de sódio e cloreto de magnésio), civil (calcário e argila) e proteção ambiental (agentes dessulfurizantes, por exemplo, óxido de ferro, óxido de magnésio e óxido de cálcio), porém, seu uso é limitado na briquetagem (AFSAL et al., 2020).

Os ligantes composto compreendem a combinação de dois ou mais ligantes com o objetivo de aproveitar vantagem dos múltiplos benefícios de ligação oferecidos pelos diferentes ligantes, rendendo assim briquetes com alta resistência mecânica e estabilidade térmica. Por exemplo a combinação de amido e bentonita, melão e cal carboneto (DESHANNAVAR et al., 2018).

O emprego de aglutinantes na produção de briquetes, enriquece as propriedades físicas e otimiza os processos operacionais, o calor gerado durante a briquetagem é capaz de ativar os aglutinantes naturais da biomassa, como lipídios, lignina, amido e proteína, ou os aglutinantes adicionados à biomassa como melão, amido de milho, polvilho de mandioca, glicerol bruto e polpa de papel, por meio de forças de atração entre as partículas. A ligação entre partículas de matérias-primas sob pressão se dá pela formação de pontes sólidas, onde sua formação ocorre por reações químicas, endurecimento de aglutinantes, solidificação de compostos fundidos ou pela cristalização de alguns componentes, como lignina e proteínas. O aglutinante mais frequentemente utilizado é o amido na proporção de 3 ou 5%, alterando o aspecto de resistência dos briquetes (NAVALTA et al., 2019).

A umidade do aglutinante é um parâmetro importante, pois promove conexões de forças de Van Der Waals, que são forças de atração que atuam em moléculas como um aglutinante, esse fenômeno ocorre em sua maioria nos materiais compostos de produtos orgânicos, que, em quantidades ideais, promovem um aumento da área de contato entre as partículas de biomassa. A umidade auxilia ainda na densificação mais suave da biomassa, reduzindo os riscos de trincas e quebra dos briquetes. Para a produção de briquetes em máquinas de rolos, recomenda-se que a biomassa tenha de 10 a 20% de umidade, em máquinas extrusoras este parâmetro é mais crítico,

variando de 4 a 10%, prensas de pistão há uma tolerância entre 10 e 15%. Um valor superior a 15% pode ser permitido em prensas hidráulicas de pistão (NUREK et al., 2019).

Aransiola et al. (2019), relataram que briquetes produzidos com amido de milho obtiveram melhor teor de umidade, densidade e resistência à compressão em comparação com aqueles produzidos com amido de milho e gelatina. Lubwama et al., (2018), observaram que o amido de mandioca produzia briquetes com melhor propriedades físicas e caloríficas em comparação com o ligante de argila. Portanto, na seleção de ligantes para briquetagem comercial de biomassa, avaliando o impacto do tipo e quantidade do ligantes nas propriedades do briquete resultante é significativamente importante.

O amido é um pó branco extraído de diversas culturas, incluindo cereais, rizomas e raízes, na forma de grânulos semicristalinos, a aplicação de calor e água ao amido provoca a formação de ligações de hidrogênio intermoleculares entre os dois principais polissacarídeos a amilose e amilopectina (Al et al., 2018). Através da interrupção da estrutura granular das moléculas de amido, levando ao inchaço, hidratação e solubilização, resultando em uma solução viscosa chamada pasta de amido, que gelifica à medida que esfria, aumentando a resistência da pasta à deformação (OBI et al., 2022).

O amido possui excelentes propriedades químicas e estruturais, além do alto teor energético, sendo um importante agente ligante na densificação de biomassa e continua sendo o mais comum aglutinante de briquete na literatura, no entanto seu uso na briquetagem comercial tem sido limitado devido ao seu alto custo e baixa coqueificação (VELUSAMY et al., 2021).

Oyelaran et al., (2015), avaliaram o efeito da fécula de mandioca como aglutinante em briquetes de casca de amendoim, relataram melhorias nas taxas de queima, consumo específico de combustível e eficiência térmica dos briquetes. Shone et al., (2016), utilizaram fécula de mandioca na preparação de briquetes de folhas secas de teca e seringueira, recomendaram a proporção de 3:5, pois a biomassa foliar não adere bem à compactação com menor teor de ligante.

3.3.3. Propriedades Importantes dos Briquetes

A produção de briquetes geralmente é seguida de armazenamento, transporte, manuseio, e uso, sofrendo diferentes níveis de degradação durante este processamento devido à ação de forças de impacto, cisalhamento e compressão de diferentes equipamentos que atuam sobre o produto, bem como as influências de fatores ambientais, como umidade e chuva, podendo levar ao inchaço e perdas (SCHOTT et al., 2016). Alguns padrões são usados na avaliação da qualidade entre materiais, processos e produtos, que fornecem informações sobre o nível esperado de desempenho desde produtos até consumo final. A qualidade e adequação dos briquetes para uso energético são geralmente medidos por meio de algumas propriedades físicas e mecânicas. Importantes fatores de qualidade do briquete de biomassa incluem sua resistência a compressão, durabilidade, resistência ao impacto e penetração de água, os quais são influenciados pela densidade dos briquetes (ADELEKE et al., 2021).

Após o processo de briquetagem é importante conhecer as características físicas, mecânicas, térmicas e energéticas dos briquetes resultantes, por meio de parâmetros como poder calorífico, densidade e resistência a compressão axial, os briquetes devem ter alto teor de energia e carbono fixo e baixo teor de cinzas e matéria volátil. Esses parâmetros podem variar de acordo com diversos fatores, incluindo o processo de produção, tipo de matéria-prima utilizada, temperatura e pressão do processo (ANTMEN et al., 2019).

O Poder Calorífico dos combustíveis é definido como a quantidade de energia interna contida no combustível, sendo que quanto mais alto for o poder calorífico, maior será a energia contida. Essa energia liberada pode ser medida de duas maneiras, poder calorífico superior (PCS) ou poder calorífico inferior (PCI). O PCS indica quanto desse calor é produzido na presença de oxigênio, enquanto o PCI é obtido por meio de um cálculo baseado no PCS menos a umidade e o hidrogênio contido no material analisado (HELWANI et al., 2020).

O poder calorífico pode ser obtido por meio da combustão sob condições padrão de temperatura e pressão de um combustível, sendo quantificado em calor gerado pela combustão por meio de uma bomba calorimétrica adiabática (KHLIFI et al., 2020).

A densidade aparente dos briquetes pode ser expressa como densidade comprimida ou relaxada. A densidade comprimida é a densidade do briquete imediatamente após compactação enquanto a densidade relaxada representa a densidade medida após um certo período a compactação. Essas medidas de densidade tornaram-se um fator importante devido à possível expansão ou retração volumétrica dos briquetes nas direções axial e lateral. A densidade é geralmente medida como a razão entre a massa e o volume da amostra, que inclui o volume de poros existente. A massa do briquetes pode ser determinada usando uma balança eletrônica de laboratório e as dimensões medidas usando um paquímetro digital (DINESHA et al., 2019). Densidade dos briquetes deve, no entanto, ser considerada como uma propriedade dinâmica e não estática, uma vez que não depende apenas do material, mas também do arranjo dos briquetes (OBI et al., 2022).

A densidade está relacionada com a razão entre a energia produzida e o volume de material, esse parâmetro é medido pela razão entre a massa do briquete e seu volume. A densidade granular ou densidade real é medida no vácuo, desconsiderando a porosidade do material, no entanto a densidade aparente é determinada no ar e leva em consideração a porosidade entre as partículas do material, sendo uma das principais propriedades da avaliação da biomassa como combustível sólido (GILVARI et al., 2019).

A resistência à compressão simula a força compressiva máxima que um briquete pode suportar durante o transporte, manuseio e armazenamento. A resistência é definida como a força axial máxima que pode suportar até fratura ou ruptura, ou uma medida de sua força de ligação interna (KAMBO et al., 2014). Se a força for aplicada perpendicularmente o eixo do cilindro, a medição resultante é referida como resistência à tração. Bazargan et al., (2014), observaram que, em geral, a resistência do briquete é maior no cilindro em direção do eixo em comparação com a resistência do briquete quando medida perpendicular ao eixo cilíndrico.

A resistência a compressão axial é medida por meio da carga máxima de tensão que o briquete tem capacidade de resistir, antes de uma rachadura ou de sua quebra. Ela é medida em megapascal (MPa), e cada 1 MPa corresponde a uma resistência aproximada de 10 kgf cm^{-2} . A carga de fratura é registrada em uma curva tensão-deformação, este ensaio visa reproduzir a tensão de compressão sofrida

durante o transporte e o armazenamento em silos ou caixas, onde os briquetes são empilhados (MARTINEZ et al., 2019).

Diferentes equipamentos com princípios de funcionamento semelhantes podem ser usados para medir a resistência à compressão, a amostra é colocada entre duas placas horizontais e a amostra é comprimida a uma taxa constante até fratura ou quebra. A taxa de aplicação de pressão nas placas, entretanto, varia na literatura e isso potencialmente dificulta a comparação da resistência dos briquetes, a relação entre taxa de compressão e resistência à compressão/tração está faltando na literatura, sendo um dos parâmetros mais utilizados para avaliar a qualidade dos briquetes (AFRA et al., 2021).

As respostas aos parâmetros estão diretamente ligadas aos vários fatores do processo produtivo, incluindo a matéria-prima utilizada, a temperatura e a pressão do processo. Definir os parâmetros ideais para otimização energética da biomassa (FAIZAL et al., 2016).

É necessário um cuidado na produção dos briquetes com finalidade energética, pois pode conter agente contaminante, as cinzas produzidas por meio do processo de combustão podem liberar metais pesados no ambiente, como o cádmio e o chumbo. Ambientalmente, esse processo torna o material inviável, caso não haja a correta especificação de utilização no rótulo ou em norma própria (PEREIRA et al., 2009).

A análise termogravimétrica consiste em uma técnica destrutiva de uma amostra, em um equipamento especializado que pode operar tanto em atmosfera inerte quanto em atmosfera oxidante ou a combinação entre elas, dependendo das necessidades específicas da análise. O equipamento aquece a amostra a uma taxa constante predefinida pelo operador em função do tempo. À medida que a amostra é aquecida, ela perde massa, e essa perda de massa é constantemente monitorada por uma balança analítica de alta precisão. Ao final do processo, o equipamento fornece informações sobre a perda de massa em função da temperatura do sistema. A faixa de temperatura, dependendo do modelo do equipamento, pode chegar a cerca de 2000 °C. O porta amostra é feito de material inerte para evitar degradação durante a análise, e os cadinhos podem ser de diversos materiais, como alumínio, alumina, policarbonato de alumínio, platina, ouro, vidro, cobre ou materiais de alta resistência, dependendo das características da amostra e das condições específicas de operação, tais como temperatura máxima e velocidade de aquecimento (IMBERTI, 2024).

A modelagem e análise estatística dos experimentos é uma forma de identificar quais são os parâmetros do processo que resultam na otimização da qualidade dos briquetes, pois, algumas variáveis de entrada podem apresentar maior influência sobre as respostas. São vários os fatores que podem influenciar, como o tipo de máquina utilizada para briquetagem, a forma como os experimentos foram realizados, as matérias-primas escolhidas entre outros. Portanto é importante utilizar um planejamento de experimentos, delimitando modelos e análises estatísticas para avaliação das variáveis, uma vez que não há consenso sobre o caminho ideal para a produção de briquetes (MARREIRO et al., 2021).

A análise de variância (ANOVA) dos dados bem como os testes de comparação de médias são importantes ferramentas para a análise de dados de processo, assim como o planejamento experimental, como os modelos fatoriais e a metodologia de superfície de resposta. O uso de metodologias aplicadas à otimização de resultados, pode auxiliar na escolha ideal das condições do processo, reduzindo custos, manutenção e operação (MASULLO et al., 2018).

3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO DA LITERATURA

De um modo geral, a energia da biomassa continua a ser uma importante alternativa para satisfazer as necessidades energéticas para aquecimento rural na maioria dos países em desenvolvimento, principalmente devido aos benefícios por meio da promoção de atividades econômicas no meio rural, benefícios ambientais e maior independência energética, melhorando a utilização dos recursos de biomassa disponíveis localmente, contribuindo para a sustentabilidade de todos (OBI et al., 2022).

A biomassa tem alto potencial para produção de energia quando submetida a técnicas de briquetagem, promovendo uma destinação nobre para diversos materiais incluindo resíduos florestais, agrícolas ou urbanos (MARREIRO et al., 2021).

O briquete de biomassa é utilizado para aquecimento doméstico e geração de energia na Europa, América e algumas partes da Ásia, porém o uso ainda é limitado, o que pode estar ligado à falta de uma estrutura desenvolvida na cadeia de abastecimento para briquetes em indústrias agrícolas e florestais. Uma cadeia eficiente e estruturalmente desenvolvida é essencial para fornecer biomassa adequada e de forma sustentável para a produção e desenvolvimento de briquetes de biomassa (LIU et al., 2020).

A viabilidade financeira da briquetagem de biomassa depende em grande parte do custo da matéria-prima a qual é influenciada principalmente pela localização, tipo da biomassa e pela existência de redes eficientes de abastecimento, estrutura típica da cadeia de abastecimento compreende produtores/fornecedores de biomassa primária, agentes de compras, empresas de briquetes e consumidores do combustível briquete (SAHOO et al., 2019)

A falta de políticas públicas apropriadas para impulsionar o uso dos briquetes é outro fator que afeta a ampla disseminação do uso, destacando-se as incertezas políticas e regulamentares e elevados riscos de investimento, a adoção de combustíveis mais limpos pode exigir mais evidências de pesquisa sobre seus potenciais benefícios econômicos e ambientais, além de especificações técnicas e padronização, instalação e uso adequados de briquetadores e fogões, e potenciais benefícios ambientais e de saúde decorrentes do uso de briquetes (NGUYEN, et al. 2021).

Embora alguns países tenham adotado o uso de briquetes em escala industrial, seu uso em alguns países é limitado, a escala da utilização de briquetes é baseada em políticas que requerem atenção do governo as quais incluem a aplicação dos regulamentos florestais existentes, facilidade de criação de negócios de briquetes, isenções fiscais e criação de novos mercados para briquetes (OBI et al., 2022).

Outro limitante do desenvolvimento da indústria de briquetes de biomassa é a falta de tecnologia apropriada ao desenvolvimento e produção, máquinas de briquetagem de baixo custo, muitas vezes não têm capacidade para produção em escala comercial e pode não atender aos requisitos de qualidade para produção comercial de briquetes. Novas tecnologias continuam a ser uma estratégia eficaz para o rápido desenvolvimento da indústria do briquete de biomassa, além do desenvolvimento e adequação do mercado consumidor em termos de cultura, eficiência de queima e emissões. Podendo influenciar significativamente a ampla utilização de briquetes de biomassa (MUGABI et al., 2021).

A revisão dos trabalhos baseados na briquetagem, suas principais matérias-primas, variáveis estudadas e resultados obtidos, está apresentada na Tabela A1 em Apêndice 1. Mostrando a importância deste trabalho, uma vez que os resíduos estudados são abundantes nas agroindústrias da região, no entanto não são

empregados na produção de briquetes, os quais podem auxiliara a suprir a necessidade energética das agroindústrias.

4. METODOLOGIA

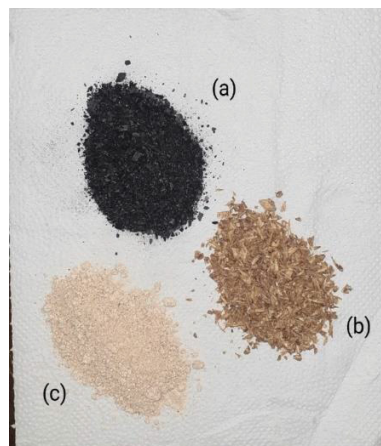
4.1. MATÉRIAS-PRIMAS

Os finos de carvão vegetal (FCV) foram adquiridos de uma carvoaria familiar, licenciada no município de Maripá-PR (24°27'28.5"S 53°52'56.4"W), sendo que o carvão foi produzido a partir de lenha de *Eucalyptus* sp. Os finos de carvão foram gerados nos fornos, após a retirada do carvão vegetal comercial, sendo separado das cinzas por meio de uma peneira, e posteriormente triturado em um moinho de facas ou martelos.

O bagaço de malte (BML) foi adquirido de uma cervejaria artesanal do município de Nova Santa Rosa-PR (24°28'31.6"S 53°57'24.7"W), o qual foi obtido durante o processo de mosturação da cevada.

O bagaço de mandioca (BMM) foi cedido por uma fecularia, localizada no município de Maripá-PR (24°27'02.3"S 53°50'04.3"W). O resíduo foi coletado ao final da linha de processamento da raiz da mandioca, para obtenção, purificação e beneficiamento do amido, atualmente o resíduo desta unidade é destinado ao consumo animal.

FIGURA 1- Matérias-primas utilizadas no estudo: (a) finos de carvão, (b) bagaço de malte, (c) bagaço de mandioca.



FONTE: O Autor (2024).

Os resíduos foram coletados e posteriormente secados em estufa a 105 °C com circulação de ar, conforme Figura 1. Após, foram acondicionados em sacos plásticos herméticos em local seco, arejado e ao abrigo da luz, a fim de conservar suas propriedades ao longo dos estudos.

4.1.1. Caracterização das Matérias-Primas

As matérias-primas foram submetidas a caracterização química centesimal, para avaliar seu potencial na produção de combustível, sendo determinados os teores de Umidade, Cinzas, Proteínas, Lipídios, Carboidratos e Granulometria. As análises foram realizadas em triplicata, conforme metodologias descritas a seguir.

4.1.1.1. Teor de Umidade

O teor de umidade das amostras foi determinado segundo a norma ASTM D3173-85 (ASTM, 1985). Inicialmente pesou-se cerca de 1 g da amostra em um cadinho de porcelana previamente preparado e com peso constante pré-determinado a 105°C. Em seguida o cadinho foi aquecido em estufa (*SOLIDSTEEL*) à 105°C durante uma hora. Na sequência o cadinho foi colocado em um dessecador por 15 minutos e pesado. Sendo o teor de umidade obtido em porcentagem (%), determinado a partir da Equação 1.

$$\% \text{ UMIDADE} = \frac{M - M_1}{M_1} * 100 \quad \text{Eq. (1).}$$

Em que:

M = a massa inicial em gramas (g) da amostra úmida.

M1 = a massa em gramas (g) da amostra após secagem em estufa.

4.1.1.2. Teor de Cinzas

Para determinar o teor de cinzas, adicionou-se cerca de 1 g da amostra em um cadinho de porcelana, previamente preparado e de massa conhecida. Na sequência o cadinho foi aquecido em mufla (VITCLAB) à 815°C durante 30 minutos, em seguida, o cadinho foi colocado em um dessecador por 1 hora e pesado para determinar o teor de cinzas (SÁNCHEZ et al., 2009).

O teor de cinzas (%) foi determinado a partir da Equação 2.

$$\% \text{ CINZAS} = Ma - \frac{Ma-Mb}{C} * 100 \quad \text{Eq. (2).}$$

Em que:

Ma. = a massa inicial do cadinho + amostra (g).

Mb. = a massa do cadinho + amostra após o aquecimento (g).

C = a massa da amostra (g).

4.1.1.3. Teor de Proteínas

A determinação do teor de proteínas foi realizada empregando-se o método proposto Kjeldahl (1883), o qual determina o N orgânico total, isto é, o N proteico e não proteico orgânico. O procedimento do método baseia-se no aquecimento da amostra com ácido sulfúrico para digestão até que o carbono e hidrogênio sejam oxidados. O nitrogênio da proteína é reduzido e transformado em sulfato de amônia. Adiciona-se hidróxido de sódio concentrado e aquece-se para a liberação da amônia dentro de um volume conhecido de uma solução de ácido bórico, formando borato de amônia, cuja concentração é determinada a partir da titulação com solução de ácido clorídrico padronizada. O teor de proteínas é determinado por meio de uma curva de calibração de N conhecido. Os cálculos do nitrogênio total e proteínas foram obtidos, respectivamente, a partir porcentagem das Equações 3 e 4.

$$\% \text{ Nitrogênio Total} = \frac{V * M * f * 0,014 * 100}{p} \quad \text{Eq. (3).}$$

$$\% \text{ Proteínas} = \% \text{ Nitrogênio Total} * F \quad \text{Eq. (4).}$$

Em que:

V = o volume (mL), de ácido clorídrico 0,1 mol L⁻¹ gasto na titulação.

M = a molaridade teórica da solução de ácido clorídrico.

p. = a massa da amostra em (g).

f. = o fator de correção da solução de ácido clorídrico.

F = o fator de conversão de nitrogênio em proteínas.

A porcentagem de proteína total foi obtida multiplicando-se o teor de nitrogênio pelo fator F que converte nitrogênio em proteínas. Para as amostras em análise foi utilizado F igual 6,25, para converter o teor de nitrogênio em proteínas.

4.1.1.4. Teor de Lipídeos

A determinação do teor de lipídio foi realizada empregando-se o método de Soxhlet, com *n*-hexano, o qual possui faixa de ebulição 68 a 70 °C (IUPAC, 1979). A amostra foi acondicionada em um cartucho de papel filtro em contato com o solvente condensado no sifão. Foi fixada a quantidade de 6 a 8 sifonagens por hora à temperatura constante e com fluxo de gotejamento entre 150 e 200 gotas por segundo. Foram pesados 5 g da amostra. As extrações foram realizadas em período de 6 horas.

Após o término do período de extração, foi colocada em placa previamente seca e pesada, a evaporação do solvente foi feita em estufa a 45°C e posterior pesagem a peso constante para determinação da massa lipídica da amostra. O teor de lipídio (%), foi determinado a partir da Equação 5.

$$\% \text{ LIPÍDIO} = \frac{Mp}{Ma} * 100 \quad \text{Eq. (5).}$$

Em que:

Mp. = a massa lipídica (g) da amostra retida na placa.

Ma. = a massa (g) inicial da amostra.

4.1.1.5. Teor de Carboidratos

O teor de carboidrato (%) foi determinado pela diferença entre 100 e a soma das porcentagens de umidade, cinzas, proteínas e lipídios, conforme Equação 6.

$$\% \text{ CARBOIDRATO} = 100 - UD - CZ - PR - LP \quad \text{Eq. (6).}$$

Onde:

UD = teor de umidade (%).

CZ = teor de cinzas (%).

PR = teor de proteínas (%).

LP = teor de lipídios (%).

4.1.1.6. Granulometria

Os materiais secos foram classificados por meio de peneiramento para a determinação da granulometria a fim de determinar o tamanho médio das partículas.

O peneiramento foi realizado a partir de cerca de 100 g da amostra que foi adicionada na primeira peneira (malha maior), sendo então submetida ao conjunto de vibrações de nível 5, por 2 minutos, utilizando as peneiras da série Tyler (*RETSCH*) de 10, 16, 30, 50 e 100 mesh. O ensaio foi realizado baseando-se na metodologia descrita na norma NBR 7217 (ABNT, 1987). A porcentagem de resíduo retido em cada uma das peneiras foi determinada a partir da Equação 7.

$$\% \text{ GRANULOMETRIA} = \frac{Mr}{Mt} * 100 \quad \text{Eq. (7).}$$

Em que:

Mr. = a massa em gramas do material retido na peneira.

Mt. = a massa total em gramas da amostra.

4.1.2. Preparo das Matérias-Primas

Os resíduos foram secos em estufa a 105°C (±2°C) até massa constante. A partir do material seco, foram determinadas as quantidades de água necessária para atingir a umidade desejada na briquetagem.

As matérias-primas foram submetidas a briquetagem com as mesmas distribuições granulométricas. Os resíduos, os aglutinantes e a água foram previamente pesados conforme os tratamentos de cada planejamento, misturados e homogeneizados durante um período de 3 minutos.

Na etapa de briquetagem foram avaliados os efeitos das seguintes variáveis: temperatura, tipo de aglutinante, concentração de mistura bagaço de mandioca, bagaço de malte e finos de carvão.

4.2. PROCESSO DE BRIQUETAGEM

A briquetagem foi realizada em escala laboratorial, nas dependências do Laboratório de Engenharia Química III, Bloco E4, da UNIOESTE, campus Toledo-PR, conforme Figura 2. Nesta etapa do trabalho utilizou-se uma prensa hidráulica manual (BOUVENAU, modelo *P15000*), com capacidade de 15 toneladas. Após testes preliminares, os ensaios foram conduzidos nas condições de pressão de 10 toneladas, o tempo de prensagem de 30 segundos, umidade 10% e concentração de aglutinante 5%.

Nos ensaios de briquetagem foram testados dois tipos de aglutinantes: o AGA (aglutinante amido) e o AGP (aglutinante polvilho). O efeito da temperatura foi avaliado conforme níveis especificados na Tabela 1.

Como variável resposta foram avaliados o poder calorífico e a resistência mecânica. Os efeitos das composições das misturas de FCV, BMM e BML foram avaliadas conforme Tabela 2. Assim, para cada aglutinante e temperatura foram testadas as 9 misturas, resultando em 36 ensaios, os quais foram realizados em duplicata, totalizando 72 ensaios.

Foi utilizado o software Statistica v. 14.0 para a realização da análise de variância (ANOVA) e teste de comparação das médias obtidas.

FIGURA 2- Prensa hidráulica utilizada no processo de briquetagem.



FONTE: O Autor (2024).

TABELA 1- Aglutinantes e temperaturas testadas para obtenção dos briquetes.

	Aglutinante	Temperatura
Bloco 1	Amido	25 °C

Bloco 2	Amido	60 °C
Bloco 3	Polvilho	25 °C
Bloco 4	Polvilho	60 °C

FONTE: O Autor (2024).

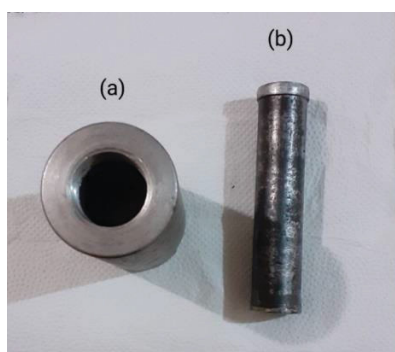
TABELA 2- Composição das misturas para obtenção dos briquetes em cada bloco.

	FCV	BMM	BML
Briquete 1 (M1)	25 (%)	75 (%)	0
Briquete 2 (M2)	50 (%)	50 (%)	0
Briquete 3 (M3)	75 (%)	25 (%)	0
Briquete 4 (M4)	0	25 (%)	75 (%)
Briquete 5 (M5)	0	50 (%)	50 (%)
Briquete 6 (M6)	0	75 (%)	25 (%)
Briquete 7 (M7)	25 (%)	0	75 (%)
Briquete 8 (M8)	50 (%)	0	50 (%)
Briquete 9 (M9)	75 (%)	0	25 (%)

LEGENDA: FCV (Finos de carvão vegetal), BMM (Bagaço de mandioca) e BML (Bagaço de malte).

FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 3- Molde cilíndrico e embolo utilizado na briquetagem.



LEGENDA: (a) molde, (b) embolo.

FONTE: O Autor (2024).

Na etapa de briquetagem, inicialmente as amostras foram colocadas em um molde cilíndrico de aço inoxidável, conforme ilustrado na Figura 3, com diâmetro interno de 27 mm, diâmetro externo de 51 mm e altura de 117 mm. Com o auxílio de um embolo de aço inoxidável, os resíduos foram comprimidos a uma pressão de 10

ton, por 30 segundos, sendo a área do cilindro corresponde a 5,7 cm², a pressão exercida foi de 1754 kgf cm⁻², ou seja 172 MPa.

4.2.1. Caracterização dos Briquetes

Os briquete resultantes, conforme ilustrado na Figura 4, foram caracterizados por meio da avaliação das suas propriedades mecânicas como densidade (DN) e resistência mecânica a compressão axial (RM), propriedades morfológicas e composicional por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectroscopia de dispersão de energia (EDS). Além da determinação das propriedades térmicas como poder calorífico superior (PCS), análise termogravimétrica diferencial (TGA) e calorimetria exploratória diferencial (DSC).

FIGURA 4- Briquete resultante da mistura das matérias-primas.



FONTE: O Autor (2024).

4.2.1.1. Densidade

A determinação da densidade do briquete foi realizada pela NBR 14984 adaptada (ABNT, 2003). O volume foi determinado medindo-se o diâmetro e a altura dos briquetes com paquímetro eletrônico (*KALA*), com sensibilidade de 0,01 mm. A massa de cada briquete foi determinada em balança analítica (*SHIMADZU* modelo *ATX224*), com sensibilidade de 0,1 mg, com 72 horas após a briquetagem. Análises realizadas no Laboratório de Engenharia Química da UNIOESTE, Toledo-PR.

4.2.1.2. Resistência Mecânica

A resistência mecânica a compressão axial (RM) foi determinada por meio da relação entre a área de cada briquete e sua resistência. O equipamento aplica uma força perpendicular ao comprimento do briquete por meio de um pistão, com velocidade de ensaio pré-estabelecida e determina a força da resistência desse material até a sua ruptura gerada por uma carga de tensão.

Utilizou-se uma máquina de testes universal, sendo o resultado de resistência à compressão determinado por um software acoplado ao equipamento. O procedimento de análise foi realizado de acordo com a metodologia NBR 5739, ensaio de compressão de corpo cilíndrico, uma vez que não se tem normas específicas para testes em briquetes dessa natureza (ABNT, 1994).

O resultado determina qual a carga máxima de resistência em função do tempo para ruptura do material. O software acoplado ao equipamento apresenta o resultado de resistência à compressão, determinando qual a carga máxima de resistência em função do tempo para a ruptura do briquete que foi submetido a uma força axial na velocidade de 5 mm min^{-1} . As análises foram realizadas em equipamento de teste universal (modelo *CONTENCO*), no Laboratório de Engenharia Civil da FAG, Cascavel- PR.

No entanto, esta norma é destinada para ensaios em argamassa e concreto, como a determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Portanto, como não existem normas específicas para os briquetes, é necessário realizar adaptações e comparar os resultados com outros trabalhos publicados devido à falta de normas específicas para briquetes (IMBERTI, 2024).

4.2.1.3. Poder Calorífico Superior

O poder calorífico superior (PCS) dos briquetes e suas matérias-primas foram determinados em bomba calorimétrica (marca *Combustion Clorimeter* e modelo *e2k*), sendo realizado no Laboratório de Engenharia Química da UNIOESTE, Toledo-PR. A combustão foi efetuada em excesso de O_2 e pressão de 30 atm, com utilização da norma ASTM D2015-66 (ASTM, 1973).

Adicionou-se 0,5 g da amostra no interior do cilindro de aço e, a uma pressão de oxigênio de 30 atm, que imediatamente é queimada. A quantidade de energia desprendida nesse processo foi determinada no equipamento. Para a calibração do calorímetro utilizou-se ácido benzoico, seguindo a norma ASTM D240-02 (ASTM, 2007).

A amostra foi colocada em um cadinho, sendo um fio de algodão amarrado ao fio condutor e colocado em contato com a amostra para que inicie a combustão, sendo o conjunto montado e por se tratar de um recipiente adiabático, é essencial garantir a vedação para que a pressão interna seja mantida e não ocorram perdas indesejadas de calor e massa. Em seguida, o calorímetro foi acoplado no cabeçote da bomba calorimétrica. A programação automática consisti na injeção de oxigênio a fim de retirar todo o ar atmosférico do recipiente contendo a amostra, mantendo a atmosfera interna com 100 % de gás oxigênio sob pressão de 30 atm.

Em seguida, a chave de ignição foi acionada automaticamente, elevando-se a temperatura instantaneamente até atingir a temperatura máxima. Após a estabilização da temperatura, o equipamento fez as leituras e em seguida apresentou os resultados da análise na tela. Ao final, todo o conjunto móvel foi removido, a pressão interna do vaso é aliviada e o calorímetro é desmontado peça por peça, e preparado para a próxima amostra (IMBERTI, 2024).

4.2.1.4. Análise Termogravimétrica

Na análise termogravimétrica (TGA) foi realizada em um equipamento, inicialmente uma massa conhecida do briquete padrão, foi colocada individualmente em um cadinho de platina e exposto ao fluxo de gás de arraste. A análise foi realizada utilizando nitrogênio com fluxo de 30 mL min^{-1} . Os termogramas foram obtidos na faixa de temperatura entre 25 e 900°C , com taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$. Assim, as curvas de perda de massa são registradas pelo software específico do equipamento, para posterior análise. As análises foram realizadas utilizando o equipamento da marca (SHIMADZU, modelo DTG - 60AH) na Central Analítica da UNIOESTE, campus Toledo-PR.

4.2.1.5. Calorimetria Exploratória Diferencial

A análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC) foi realizada para verificar quais os eventos entálpicos que ocorreram a partir do aquecimento da amostra. Para realização dessa análise foi utilizado a razão de aquecimento de $20^{\circ}\text{C min}^{-1}$, fluxo de nitrogênio de 20 mL min^{-1} , de 50 a 550°C , com porta amostras de platina aberto. Sendo as análises realizadas utilizando o equipamento (*STA 6000 PERKIN ELMER*), na Central Analítica da UNIOESTE, campus Toledo-PR.

4.2.1.6. Microscopia Eletrônica de Varredura

A análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV), com EDS foi operada com feixe de 15 kV, fonte de filamento de tungstênio, detector de elétrons retroespalhados com câmara de vácuo, que apresenta magnificação máxima de 30000x. O EDS tem detector de silício tipo SDD de 30 mm^2 e resolução 161 eV (Cu- $K\alpha$), com analisador multicanal 2048 canais (10 eV canal^{-1}). Os componentes principais analisados foram: C, O, Mg, K, Ca, Zn, P, Si, N, S, Na, Cl, cujos resultados foram gerados em imagens de pontos quantitativos.

As análises foram realizadas em um equipamento MEV da marca (*HITACHI TM3000*), operando com EDS da Oxford, modelo *SwiftED3000*, no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da UFPR, campus Palotina-PR.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS MATÉRIAS PRIMAS

As matérias-primas utilizadas na produção dos briquetes foram caracterizadas pela composição centesimal e a granulometria, por meio das determinações de umidade, cinzas, proteínas, lipídios, carboidratos e granulometria, cujo resultados são apresentados na Tabela 3.

TABELA 3- Caracterização centesimal e granulometria das matérias-primas.

	FCV	BMM	BML
Umidade (%)	-	87,34 ±0,05	69,80 ±0,09
Cinzas (%)	57,03 ±0,05	4,68 ±0,09	5,11 ±0,08
Proteínas (%)	-	1,82 ±0,04	19,77 ±0,06
Lipídios (%)	-	4,04 ±0,08	4,88 ±0,09
Carboidratos (%)	-	2,10 ±0,03	0,43 ±0,02
Granulometria (%)	30 ±0,02 *	46 ±0,07 *	89 ±0,08 **

LEGENDA: (*) granulometria principal 0,42 mm, (**) granulometria principal 1,40 mm.

FCV (Finos de carvão vegetal), BMM (Bagaço de mandioca) e BML (Bagaço de malte).

FONTE: O Autor (2024).

Os resultados obtidos para bagaço de mandioca foram semelhantes aos obtidos por Pattiya et al. (2010), que relataram valores de 83 % para umidade e 3,7 % para o teor de cinzas. Nalevaiko et al. (2020) obtiveram um teor de umidade de 90,41 % e 1,44% de cinzas. Silva (2018), caracterizou o bagaço de malte e obteve teor de umidade de 76%, cinzas de 3,35 %, proteínas de 32,07 %, lipídios de 11,84 % e a granulometria ficou acima de 2 mm, sendo que o bagaço de malte pode apresentar variações nos teores dependendo da receita empregada no processo de malteação.

A caracterização físico-química é importante para avaliar a condição das matérias-primas in natura, e obter uma projeção das características físico-químicas dos briquetes. Sendo que o teor de umidade e granulometria influenciam na resistência mecânica do briquete.

5.2. CARACTERIZAÇÃO DOS BRIQUETES

Os briquetes, produzidos a partir das condições definidas no planejamento experimental em blocos e tratamentos foram submetidos a análise de PCS (poder calorífico), DN (densidade), e RM (resistência mecânica), cujos resultados são apresentados nas Tabelas 4, 5, 6 e 7, respectivamente, cujos resultados valores correspondem às médias com os seus desvios padrões.

TABELA 4- Avaliação das propriedades físicas, mecânicas e energéticas dos briquetes do bloco 1, usando aglutinante amido e temperatura 25°C.

	PCS (MJ Kg ⁻¹)	DN (kg m ⁻³)	RM (MPa)
1P1	19,466 ±0,31	960 ±0,05	22,1 ±0,65
2P1	23,071 ±0,03	798 ±0,04	3 ±0,22
3P1	0	0	0
4P1	18,168 ±0,49	783 ±0,16	13 ±0,37
5P1	17,398 ±0,27	896 ±0,33	12,2 ±0,58
6P1	16,629 ±0,56	986 ±0,07	22,1 ±0,31
7P1	21,773 ±0,11	800 ±0,09	8,1 ±0,02
8P1	24,610 ±0,48	730 ±0,34	5,9 ±0,21
9P1	0	0	0

LEGENDA: PCS (Poder calorífico), DN (Densidade), RM (Resistência mecânica) e 0 (não formou).

FONTE: O Autor (2024).

TABELA 5- Avaliação das propriedades físicas, mecânicas e energéticas dos briquetes do bloco 2, usando aglutinante amido e temperatura 60°C.

	PCS (MJ Kg ⁻¹)	DN (kg m ⁻³)	RM (MPa)
1P2	19,460 ±0,8	832 ±0,07	6,5 ±0,21
2P2	23,079 ±0,57	910 ±0,31	8,4 ±0,27
3P2	26,673 ±0,71	814 ±0,05	4,6 ±0,05
4P2	18,162 ±0,06	930 ±0,04	12,6 ±0,27
5P2	17,391 ±0,43	1036 ±0,22	16,6 ±0,09
6P2	16,620 ±0,09	938 ±0,06	10,1 ±0,57
7P2	21,779 ±0,47	921 ±0,35	15,2 ±0,18
8P2	24,615 ±0,49	865 ±0,09	7,8 ±0,36
9P2	27,446 ±0,52	773 ±0,07	3,5 ±0,17

LEGENDA: PCS (Poder calorífico), DN (Densidade) e RM (Resistência mecânica).

FONTE: O Autor (2024).

TABELA 6- Avaliação das propriedades físicas, mecânicas e energéticas dos briquetes do bloco 3, usando aglutinante polvilho, temperatura 25°C.

	PCS (MJ Kg ⁻¹)	DN (kg m ⁻³)	RM (MPa)
1P3	19,460 ±0,05	888 ±0,21	9 ±0,45
2P3	23,065 ±0,41	817 ±0,45	4 ±0,21
3P3	0	0	0
4P3	18,162 ±0,62	775 ±0,07	11 ±0,08
5P3	17,392 ±0,28	850 ±0,19	9,2 ±0,65
6P3	16,623 ±0,17	967 ±0,32	16,2 ±0,18
7P3	21,767 ±0,03	705 ±0,29	7,7 ±0,29
8P3	24,604 ±0,19	674 ±0,11	4,1 ±0,15
9P3	0	0	0

LEGENDA: PCS (Poder calorífico), DN (Densidade), RM (Resistência mecânica) e 0 (não formou).

FONTE: O Autor (2024).

TABELA 7- Avaliação das propriedades físicas, mecânicas e energéticas dos briquetes do bloco 4, usando aglutinante polvilho, temperatura 60°C.

	PCS (MJ Kg ⁻¹)	DN (kg m ⁻³)	RM (MPa)
1P4	19,465 ±0,29	986 ±0,41	15,2 ±0,48

2P4	23,061 $\pm$ 0,51	935 $\pm$ 0,04	7,2 $\pm$ 0,25
3P4	26,671 $\pm$ 0,07	791 $\pm$ 0,26	4,2 $\pm$ 0,39
4P4	18,168 $\pm$ 0,09	977 $\pm$ 0,33	13 $\pm$ 0,56
5P4	17,397 $\pm$ 0,42	1030 $\pm$ 0,03	17,6 $\pm$ 0,35
6P4	16,629 $\pm$ 0,06	1031 $\pm$ 0,27	23,6 $\pm$ 0,25
7P4	21,761 $\pm$ 0,38	852 $\pm$ 0,19	8,9 $\pm$ 0,34
8P4	24,609 $\pm$ 0,11	861 $\pm$ 0,29	9,1 $\pm$ 0,05
9P4	27,440 $\pm$ 0,18	766 $\pm$ 0,07	4,1 $\pm$ 0,16

LEGENDA: PCS (Poder calorífico), DN (Densidade) e RM (Resistência mecânica).

FONTE: O Autor (2024).

A composição da biomassa interfere no poder calorífico, alto teor de carbono aumenta o poder calorífico, para ser utilizada como combustível, a biomassa deve ter poder calorífico a 13 MJ kg⁻¹, (KIJO et al., 2016).

Segundo a ISO 17225-7:2021, recomenda-se que o requisito mínimo de viabilidade técnica para o uso de combustível sólido seja de 14,5 MJ kg⁻¹. Assim todos os briquetes obtidos neste trabalho possuem propriedades caloríficas adequadas para uso como combustível sólido, variando entre 16,620 e 27,446 MJ kg⁻¹, sendo o maior poder calorífico obtido no briquete 9P4.

Uma importante propriedade avaliada para que o briquete possa ser utilizado como combustível sólido é a densidade. Khlifi et al. (2020) encontraram uma densidade de 1200 kg m⁻³, obtida em prensa hidráulica, à pressão de 150 MPa e aquecimento à temperatura de 38°C. Os resultados de densidade obtidos nos ensaios deste trabalho variaram entre 674 e 1036 kg m⁻³, sendo a maior densidade obtida no briquete 5P2.

RM é considerada uma das análises mais relevantes na identificação da viabilidade técnica de briquetes, pois determina a qualidade e viabilidade para transporte e estocagem. A literatura recomenda uma resistência mecânica mínima de 2,56 MPa (OKOT et al. 2019). Neste trabalho, a variação da resistência mecânica dos briquetes resultantes foi entre 3 MPa e 23,6 MPa, sendo a maior resistência mecânica atribuída ao briquete 6P4.

Oliveira (2017) avaliou a potencialidade da produção de briquetes de lodo de esgoto sanitário e finos de carvão vegetal para o uso como combustível, sendo a melhor condição de mistura que proporcionou a produção do briquete com maior PCS

foi de 85% de lodo de esgoto sanitário, 10% finos de carvão, 2,50% de umidade, 7,50% de aditivo e 8,75 ton de pressão, além de um PCS de 15,566 MJ kg⁻¹, foi capaz de suportar RM de 41,19 MPa com uma DN de 1311 Kg m⁻³.

Nalevaiko et al. (2020) avaliaram as características físico-químicas de briquetes produzidos a partir do bagaço da cana-de-açúcar, bagaço de mandioca e cama de aviário. A mistura com melhor eficiência energética foi 42,5 % de bagaço de cana, 15 % de bagaço de mandioca e 42,5 % cama de aviário, com PCS de 16,41 MJ kg⁻¹ e o menor teor de cinzas, de 7,96 %, e melhor relação C/H, porcentagem de hidrogênio e de carbono, sendo assim o de maior potencial energético de queima.

Silva (2018) avaliou a viabilidade técnica da produção de briquetes a partir do bagaço de malte da indústria cervejeira artesanal, obtendo PCS de 20,31 MJ kg⁻¹, DN de 1190 Kg m⁻³ e RM de 3,47 MPa. A granulometria não interferiu de maneira significativa em relação a densidade energética, em contrapartida afetou a RM.

Por meio dos resultados obtidos é possível observar, que os briquetes produzidos com a mistura das matérias-primas finos de carvão, bagaço de mandioca e bagaço de malte apresentam características promissoras para utilização como combustível sólido.

5.3. EFEITO DAS VARIÁVEIS

A influência das variáveis aglutinante e temperatura e a composição das misturas, sobre as respostas obtidas de densidade (DN), poder calorífico (PCS) e resistência mecânica (RM), foram verificadas aplicando-se análise de variância ANOVA conforme Tabela 8.

A análise de variância permite determinar quais variáveis são significativas sobre RM na produção do briquete mais resistente a choques mecânicos. Verifica-se que todas as variáveis foram significativas ($p < 0.05$), indicando que influenciam significativamente as respostas, inclusive a interações das variáveis duas a duas e a interação tripla. Isso permite fazer comparações das médias obtidas para RM.

O gráfico da Figura 5, associado a tabela da ANOVA indica que os melhores resultados de RM média foram obtidos conforme as condições mostradas na Tabela 9. Como se pode observar, o melhor resultado de RM = 23,65 Mpa, foi obtido na condição do aglutinante polvilho à 60°C com a mistura M6, contendo 75% bagaço mandioca e 25% bagaço de malte.

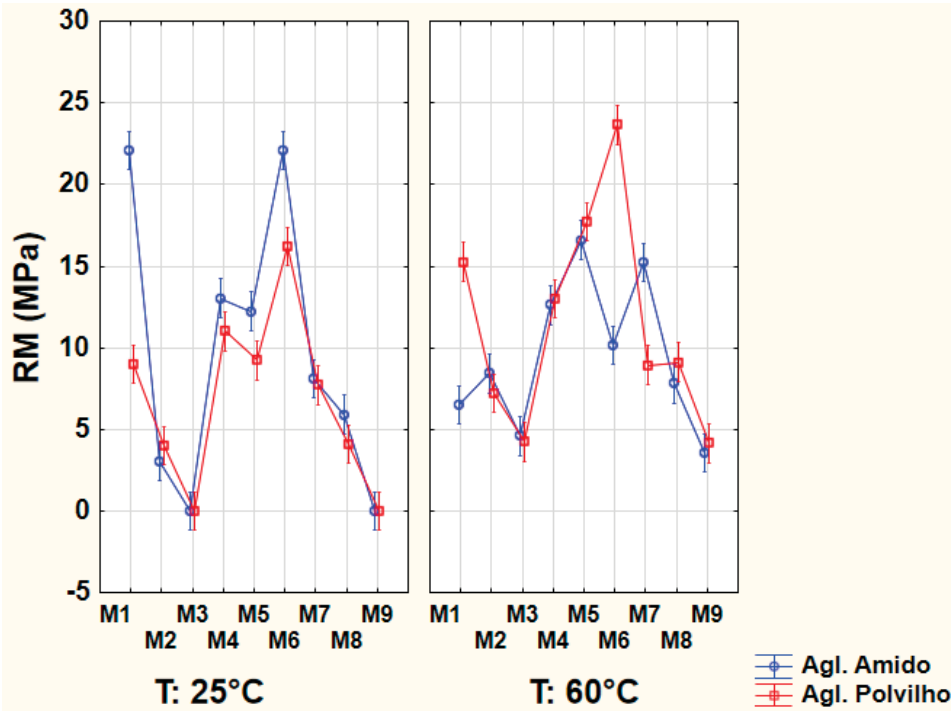
TABELA 8- ANOVA para a resposta RM ($\alpha = 0,05$).

Efeito	SQ	GL	MQ	F	p
Intercepto	6286,04	1	6286,045	9323,782	0,000000
Aglutinante	2,96	1	2,965	4,398	0,043057
Mistura	1981,40	8	247,676	367,365	0,000000
T	93,09	1	93,098	138,087	0,000000
Ag*Mistura	61,12	8	7,640	11,333	0,000000
Ag*T	103,07	1	103,076	152,888	0,000000
Mistura*T	209,26	8	26,158	38,799	0,000000
Ag*Mistura*T	360,29	8	45,037	66,801	0,000000
Resíduo	24,27	36	0,674		

LEGENDA: $R^2 = 0,991$ e $R^2_{ajustado} = 0,983$.

FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 5- Efeitos da interação entre as variáveis aglutinante, temperatura e mistura para a resposta de resistência mecânica.



FONTE: O Autor (2024).

TABELA 9- Melhores RM obtidos conforme Figura 5

Aglutinante	Temperatura (°C)	Mistura	RM média (Mpa)
Amido	25 ±1	M6	22,10 ±0,31
Amido	25 ±1	M1	22,10 ±0,65

Polvilho	60 ±1	M6	23,65 ±0,25
----------	-------	----	-------------

LEGENDA: M1 (25% finos de carvão e 75% bagaço mandioca) e M6 (75% bagaço mandioca e 25% bagaço de malte).

FONTE: O Autor (2024).

Os melhores resultados ($RM_{média} = 22,1$ e $23,65$ MPa) foram obtidos de forma homogênea pelo teste de Tukey para grupos homogêneos conforme Tabela A2 em Apêndice 2, para a letra sobrescrita “o”, ou seja, para as condições B1/M6, B1/M1 e B4/M6, conforme descrição na Tabela 10 abaixo.

TABELA 10- Melhores RM entre blocos e tratamentos.

BLOCO	TRATAMENTO	RM (Mpa)
B1	M6	22,10 ±0,31
B1	M1	22,10 ±0,65
B4	M6	23,65 ±0,25

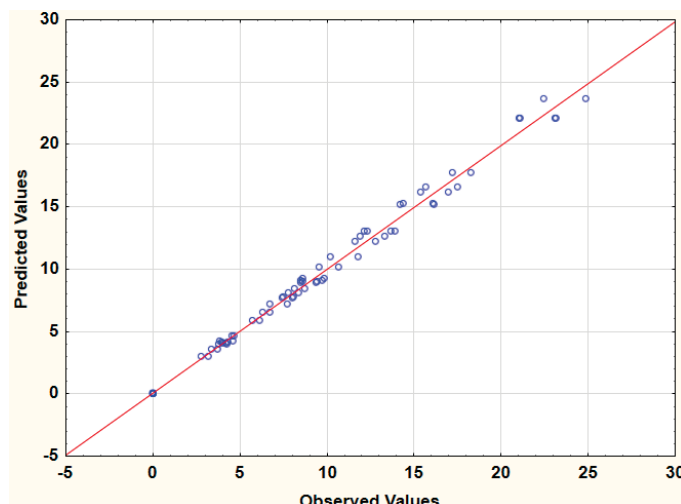
LEGENDA: B1 (amido, 25°C), B4 (polvilho, 60°C), M1 (25% finos de carvão e 75% bagaço mandioca) e M6 (75% bagaço mandioca e 25% bagaço de malte).

FONTE: O Autor (2024).

Por meio do teste de Tukey é possível comparar entre si os resultados das médias de RM obtidas em todos os 36 ensaios. Os melhores resultados ($RM_{média} = 22,1$ e $23,65$ MPa) foram obtidos de forma homogênea pelo teste de Tukey para grupos homogêneos conforme Tabela A2 (vide Apêndice 2), para a letra sobrescrita “o”, ou seja, para as condições descritas na Tabela 9.

O gráfico da Figura 6, abaixo mostra que os valores de RM apresentam bom ajuste entre os resultados observados e os resultados preditos, o que contribui, junto com os valores de R^2 (Tabela 8) para a validação do estudo.

FIGURA 6- Gráfico de distribuição da RM entre blocos e tratamentos.



FONTE: O Autor (2024).

5.4. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

As variáveis Temperatura e Proporção de mistura (%) do bagaço de mandioca (BMM) em relação ao bagaço de malte (BML) foram submetidas a um novo planejamento experimental (do tipo 2^2), visando determinar outros níveis para as mesmas que resultem no aumento da RM.

As variáveis temperatura (T) e proporção de mistura do bagaço de mandioca em relação ao de malte (Prop) estão apresentadas na Tabela 11, sendo as demais variáveis fixas: pressão 9 ton, concentração do aglutinante polvilho 9% e umidade 10%.

Na Tabela 12 são apresentados os resultados de RM obtidos para cada um dos briquetes gerados a partir da matriz do planejamento fatorial 2^2 . A maior RM foi alcançada pelo briquete 3, alcançando RM de 23,74 Mpa por meio da combinação de menor temperatura 48 °C e maior proporção de bagaço de mandioca (77%) em relação a proporção de bagaço de malte (33%).

TABELA 11- Níveis do planejamento fatorial 2^2 .

Variável	Níveis		
	-1	0	+1
T (°C)	48	56	64
Prop (%)	49	63	77

FONTE: O Autor (2024).

TABELA 12- RM dos briquetes do planejamento fatorial 2².

BRIQUETE	T (°C)	Prop (%)	RM (Mpa)
1	-1 (48)	-1 (49)	19,62
2	1 (64)	-1 (49)	15,59
3	-1 (48)	1 (77)	23,74
4	1 (64)	1 (77)	18,13
5	0 (56)	0 (63)	19,81
6	0 (56)	0 (63)	19,64
7	0 (56)	0 (63)	19,31
8	0 (56)	0 (63)	19,86

LEGENDA: Prop (Proporção de bagaço de mandioca em relação ao bagaço de malte).

FONTE: O Autor (2024).

A influência das proporções de misturas de BMM e BML e a variação da temperatura, sobre as respostas obtidas de RM, foram analisados por meio da ANOVA conforme Tabela 13, onde as variáveis são significativas ($p < 0,05$). No caso da interação entre as duas variáveis (1 x 2), no nível de significância ($\alpha = 0,05$) a interação é praticamente significativa e, por cautela não deve ser desconsiderada.

Segundo a ANOVA, não se verifica falta de ajuste para o modelo, pois esta não é significativa ($p > 0,05$) e os coeficientes de determinação R^2 e $R^2_{ajustado}$ apresentam valores elevados e muito próximos. O gráfico da Figura 7 mostra uma boa concordância entre os valores observados e preditos da RM.

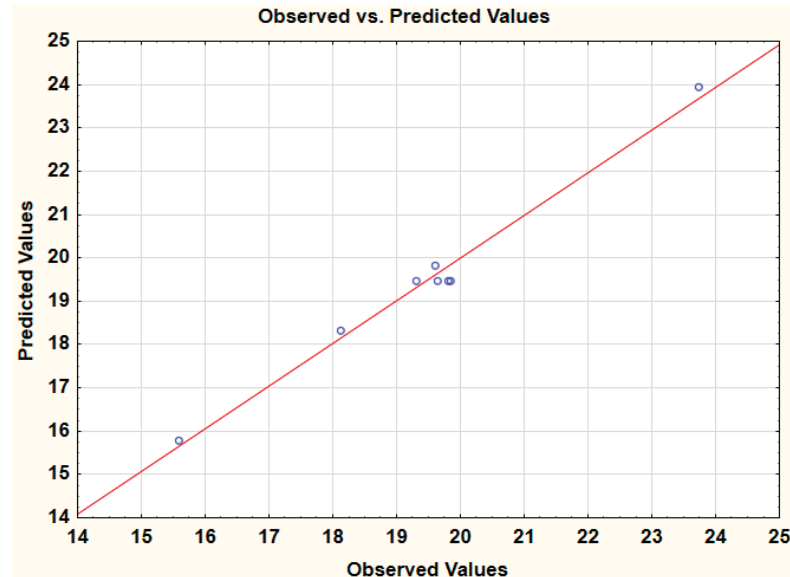
TABELA 13- ANOVA dos briquetes do planejamento fatorial 2².

EFEITO	SQ	GL	MQ	F	p
(1) T1	23,23240	1	23,23240	376,1317	0,000299
(2) Prop 1	11,08890	1	11,08890	179,5289	0,000899
1 X 2	0,62410	1	0,62410	10,1042	0,050144
Falta de ajuste	0,29645	1	0,29645	4,7995	0,116170
Erro puro	0,18530	3	0,06177		
Total	35,42715	7			

LEGENDA: $R^2 = 0,986$ e $R^2_{ajustado} = 0,976$.

FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 7- Gráfico de distribuição da RM do planejamento fatorial 2².



FONTE: O Autor (2024).

O modelo de regressão de 1^a ordem para os valores reais é obtido pela Equação 8, e a superfície de resposta correspondente é apresentada na Figura 8.

$$RM = 16,40 - 0,08 * T + 0,32 * Prop - 0,003 * T * Prop \quad \text{Eq. (8).}$$

Onde :

T = temperatura.

Prop = proporção de mistura.

Já o modelo de regressão de 1^a ordem para os valores codificados (-1 e +1) é apresentada pela Equação 9, expressa abaixo:

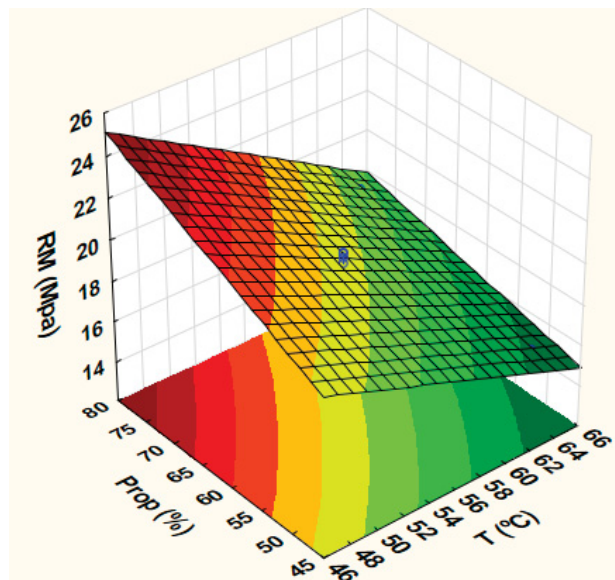
$$RM = 19,46 - 2,41 * T + 1,66 * Prop - 0,39 * T * Prop \quad \text{Eq. (9).}$$

Pela superfície de resposta, verifica-se aumento na RM para maiores valores de proporção de BMM em relação ao BML e para menores temperaturas. Assim sendo, foi realizado o procedimento de Caminho de Máxima Inclinação, conforme sugerido por Barros Neto et al. (2010). Segundo os autores, o caminho de máxima inclinação saindo do ponto central do planejamento (Figura 9) pode ser determinado algebricamente a partir dos coeficientes do modelo. Para se alcançar a máxima

inclinação, deve-se fazer deslocamentos ao longo dos eixos das variáveis X2 e X1 na proporção dos seus coeficientes, ou seja, b_2/b_1 .

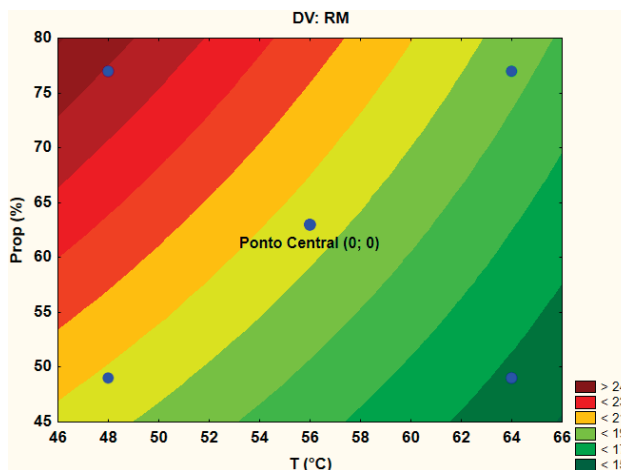
A relação dos coeficientes obtidos para as variáveis (Eq. 9) em seus valores codificados ($b_1 = -2,41$ e $b_2 = 1,66$), $T/Prop = -2,41/1,66 = -1,45$ é obtida, indicando que para aumentar 1 unidade de Prop deve-se diminuir 1,45 unidades de T. Assim, para andar na superfície em busca do ponto ótimo (ou de máxima inclinação) deve-se trabalhar nos níveis codificados e reais, conforme Tabela 14.

FIGURA 8- Gráfico da superfície de resposta do planejamento fatorial 2^2 .



FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 9- Curvas de nível da superfície de resposta do planejamento fatorial 2^2 .



FONTE: O Autor (2024).

TABELA 14- Níveis para o deslocamento sobre a superfície.

T (x1)	Prop (x2)	Prop (%)	T (°C)
codificado	codificado	real	real
0	0	63	56
-1,45	1	77	44,4
-2,90	2	91	32,8
-4,35	3	105	21,2

FONTE: O Autor (2024).

Para obter-se os valores reais a partir dos codificados, usou-se as equações (10) e (11) respectivamente, considerando-se os pontos centrais e os gradientes estabelecidos na Tabela 12.

$$x2 = (Prop - 63) / 14 \quad \text{ou} \quad Prop = 14 * X2 + 63 \quad \text{Eq. (10).}$$

$$X1 = (T - 56) / 8 \quad \text{ou} \quad T = 8 * X1 + 56 \quad \text{Eq. (11).}$$

Onde :

X1 = temperatura (valor codificado).

X2 = proporção de mistura (valor codificado).

T = temperatura (valor real, °C).

Prop = proporção de mistura (valor real, %).

A Tabela 15, apresenta os resultados de RM obtidos a partir dos níveis estabelecidos para se alcançar a máxima inclinação sobre a superfície de resposta, a fim de alcançar um ponto de máximo de RM para os briquetes produzidos a partir das

misturas de BMM e BML. Observa-se que foi alcançado o pico da RM = 24,86 Mpa para 44°C e mistura de 77% de BMM com 23% de BML, o qual representa a máxima inclinação, sendo, portanto, considerado ponto ótimo do planejamento. Esse ponto, considerado ótimo, foi submetido a análise de PCS apresentando 17,6 MJ Kg⁻¹, além de apresentar DN de 1095 Kg m⁻³.

TABELA 15- RM dos briquetes após o deslocamento sobre a superfície de resposta.

Ensaio	T (*C)	Prop (%)	RM (Mpa)
1	56	63	19,51
2	44	77	24,86
3	33	91	21,05
4	21	105	16,21

FONTE: O Autor (2024).

Observa-se que foi alcançado o pico da RM = 24,86 Mpa para 44 °C e 77 % de BMM com 23 % de BML, o qual representa a máxima inclinação, sendo, portanto, considerado ponto ótimo do planejamento. O qual foi submetido a análise de PCS apresentando 17,6 MJ Kg⁻¹, além de apresentar DN de 1095 Kg m⁻³.

De acordo com Teixeira et al. (2010), os briquetes devem apresentar resistência mecânica superior a 7 MPa, para que possam ser manipulados e armazenados sem a ocorrência de fragmentações significativas. Kunh (2022) observou RM 27,59 MPa e PCS de 19,04 MJ Kg⁻¹ para briquetes de lodo de abatedouro de aves (15%) em mistura com serragem (85%). Ao adicionar proporções de umidade e aglutinante, observou que estas influenciaram significativamente nas variáveis aumentando o RM e reduzindo o PCS.

Conforme Vasconcelos (2017), o PCS de 17,6 MJ Kg⁻¹ encontrado, equivale com o PCS da madeira do Eucalipto 17,514 MJ Kg⁻¹, Marmeleiro 18,046 MJ Kg⁻¹ e Ipê Roxo 17,311 MJ Kg⁻¹, e de espécies da Caatinga, como madeira do Pereiro 16,995 MJ Kg⁻¹ e da Jurema Preta 18,753 MJ Kg⁻¹. Silva (2023), avaliou o PCS para briquetes produzidos com três biomassas sem aglutinante, o briquete de bagaço de cana-de-açúcar obteve o maior PCS de 18,839 MJ Kg⁻¹, seguido pelo briquete de sabugo de milho 18,261 MJ Kg⁻¹ e posteriormente pelo mesocarpo de coco 17,768 MJ Kg⁻¹. Juppa et al., (2024), avaliou o PCS de pellets produzidos com mistura de 78 % capim BRS kurumi + 20 % lodo flotado + 2 % bagaço de mandioca, obtendo PCS de 18,35 MJ.kg⁻¹

¹. Segundo recomendado pela ISO 17225-7 (2021), o PCS do briquete deve ser $\geq 14,5$ MJ kg⁻¹. Kusumavati et al., (2024), avaliaram briquetes de casca de mandioca com aglutinante amido e PCS de 22,33 MJ kg⁻¹, enquanto Berlian et al., (2023), observaram PCS de 11,21 MJ kg⁻¹, em briquetes de casca de mandioca com aglutinante tapioca.

Juppa (2024), avaliou a densidade a granel de pellets produzidos com lodo flotado observando DN de 473 Kg m⁻³, Capim BRS Kurumi DN de 525,36 Kg m⁻³, 78 % Capim BRS Kurumi + 20 % Lodo Flotado + 2 % Bagaço de Mandioca DN de 508,02 Kg m⁻³, sendo que maiores valores de densidade a granel, equivale ao aumento das suas densidades energéticas, uma vez que quanto maior for a densidade a granel dos pellets mais elevada é sua densidade energética, levando em consideração seu poder calorífico superior.

A empresa Copagril juntamente com a Carnot Bioenergia, estão comercializando pellets de madeiras, os quais apresentam teor de umidade abaixo de 10%, teor de cinzas inferior a 0,7%, PCS de 17,0 MJ.kg⁻¹, DN entre 600 e 750 Kg m⁻³. Destinados ao consumo industrial e doméstico como em caldeira, secadores de cereais, trocadores de calor, pizzarias, padarias, granjas de aves e suínos, aquecedores de água, cozinhas industriais, hotéis, lavanderias e lareiras. Sendo a queima de pellets gerando um ciclo neutro de emissões de CO₂, uma vez que as emissões durante a queima destes é equivalente ao CO₂ sequestrado pelas arvores durante o crescimento por meio da fotossíntese, o qual pode ser correlacionado com a queima dos briquetes de resíduos agroindustriais.

5.5. CARACTERIZAÇÃO DO BRIQUETE OTIMIZADO

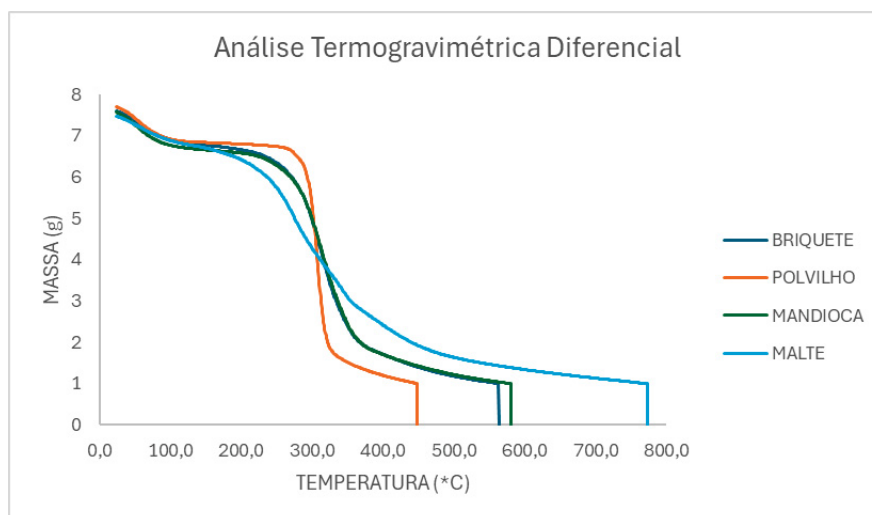
5.5.1. Propriedades Termogravimétricas

O teste do comportamento termogravimétrico é importante para a definição dos parâmetros de combustão, permitindo um melhor entendimento das temperaturas inicial e final de degradação dos materiais (LUBWAMA et al., 2020).

A água livre presente nas amostras é liberada a partir do início do aquecimento, sendo acentuada a 100°C, no entanto, a água intrinsecamente ligada a estrutura, ocorreu em uma faixa de temperatura em torno de 100 a 250 °C. A degradação da celulose e da hemicelulose ocorre em uma faixa de temperatura ampla, geralmente entre 200 e 350°C, sendo a degradação da hemicelulose em torno de 210°C, enquanto a

degradação da celulose pode se estender até a temperatura de 400°C. A lignina é mais resistente e geralmente requer temperaturas mais elevadas para degradação, podendo alcançar temperaturas de 700°C (YANG et al., 2007).

FIGURA 10- Gráfico de TGA dos materiais e do briquete otimizado.



FONTE: O Autor (2024).

As curvas de TG que corresponde a degradação da massa em razão da temperatura dos materiais AGP, BMM, BML e do briquete otimizado, obtidas sob atmosfera de nitrogênio, são mostradas na Figura 10, apresentando três eventos térmicos de degradação.

O primeiro evento térmico, variando de 70 a 150°C para os materiais e para o briquete otimizado, está relacionado ao processo de desidratação (NAQVI et al., 2019).

O segundo evento térmico corresponde à liberação de materiais voláteis, ocorrendo em temperaturas entre 220 e 450°C para o briquete otimizado e o BMM que apresentam comportamento semelhante, no entanto o AGP tem uma faixa de liberação de materiais voláteis mais rápida entre as temperaturas de aproximadamente 280 e 350°C, enquanto o BML tem a liberação de materiais voláteis mais lenta entre as temperaturas de 220 e 500°C. Para os materiais AGP, BMM, BML e o briquete otimizado, este segundo evento térmico corresponde à degradação da hemicelulose e da celulose, enquanto a lignina pode continuar sua decomposição até aproximadamente 800°C (WANG et al., 2019).

O terceiro evento térmico, foi observado na faixa de temperatura entre 400 e 800°C, estando relacionado à combustão do carbono fixo, associado a degradação de materiais orgânicos biodegradáveis e não biodegradáveis presentes na estrutura dos materiais. Portanto, a perda de massa está relacionada ao carbono fixo pode ter ocorrido com a liberação de voláteis no terceiro evento térmico na curva (ESPUELAS et al., 2020).

Como esperado, os eventos térmicos são semelhantes para os materiais AGP, BMM, BML e o briquete otimizado, uma vez que não foram observadas diferenças notáveis no processo de combustão dos materiais precursores e do briquete otimizado. Samomssa et al., (2021), avaliaram a degradação de TG para casca de mandioca e observou primeiro pico de temperatura em 85°C com perda de 6,5% da massa correspondente a desidratação, segundo pico de temperatura em 291°C, com perda de 41,6 % correspondente a degradação da hemicelulose, terceiro pico de temperatura em 416°C, com perda de 19,4% devido a degradação da celulose, e a degradação completa ocorreu em 447°C, com perda de 19,4% de massa devido a degradação da lignina, não sendo mais observado perda de massa posteriormente.

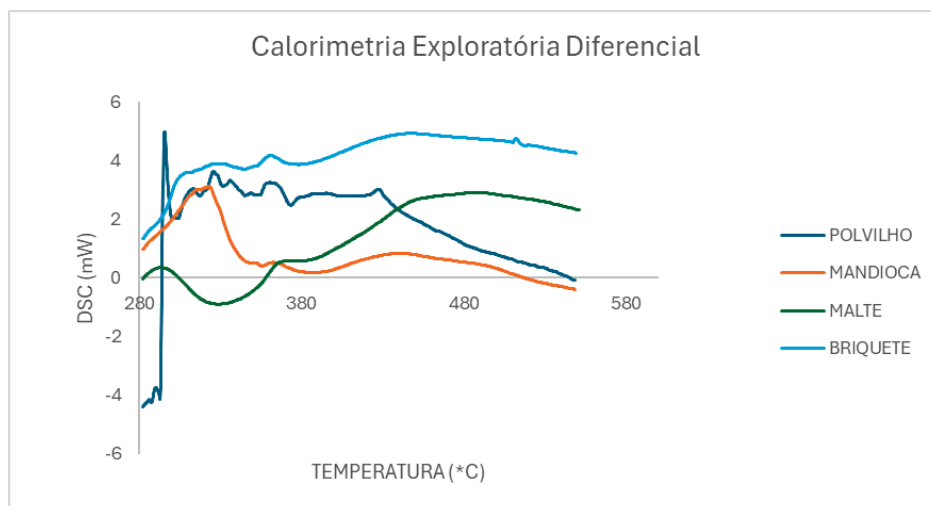
Kunh (2022), utilizou uma mistura de lodo centrifugado de abatedouro de aves e serragem da indústria moveleira, na produção de briquetes, sendo a que serragem apresentou comportamento semelhante ao observado na degradação de BMM e BML.

Silva (2023), realizou estudo de briquetes produzidos com bagaço de cana, mesocarpo de coco e sabugo de milho. Em análise termogravimétrica do bagaço de cana, observou-se que a umidade presente, representa a curva que se forma até os 100 ± 5 °C, o que condiz com a determinação do teor de umidade do material. A degradação do bagaço de cana ocorre de maneira mais acentuada a partir dos 250 °C até aproximadamente os 380°C. Observou ainda que aos 400°C, a degradação da biomassa atinge cerca de 75 %, e com aproximadamente 650°C estabiliza, apresentando 99,3 % de degradação. Enquanto o sabugo de milho, atinge sua estabilização de massa, após 800°C, sendo aproximadamente 100°C a mais que as amostras de mesocarpo de coco, e 200°C a mais que a amostra de bagaço de cana-de-açúcar.

A Figura 11 demonstra as curvas de DSC para o briquete otimizado e suas matérias-primas AGP, BMM e BML, em um fluxo de nitrogênio, com análise na faixa

de temperatura de 280 a 550°C, indicando os processos de decomposição por meio dos eventos exotérmicos.

FIGURA 11- Gráfico de DSC dos materiais e do briquete otimizado.



FONTE: O Autor (2024).

Analisando-se a Figura 11, é possível identificar que o AGP apresenta um pico exotérmico na temperatura próxima aos 300°C, além de pelo menos mais três eventos exotérmicos até a sua decomposição próxima aos 550°C. No entanto, o BMM apresentou um pico de decomposição exotérmica na temperatura de 300 a 350°C, além de um segundo evento exotérmico na temperatura de 450°C, tendo sua decomposição na temperatura de 530 °C.

Já o BML apresentou um evento exotérmico a 380°C, tendo uma curva de decomposição na faixa de temperatura de 450 a 500°C, porém não foi possível observar a decomposição total nesta faixa de temperatura analisada. E como esperado, o briquete apresentou uma combinação de perfis dos materiais precursores, apresentando uma curva de decomposição na temperatura de 300°C, um segundo evento exotérmico na temperatura de 350°C, e uma terceira curva de decomposição na faixa de temperatura de 400 a 450°C, não sendo possível sua decomposição total nesta faixa de temperatura analisada.

Kunh (2022), avaliou o DCS do lodo centrifugado de abatedouro de aves e da serragem da indústria moveleira, além do briquete produzido, observando pelo menos um evento exotérmico no lodo na temperatura de 527°C, dois eventos exotérmicos na serragem nas temperaturas de 360 e 472°C, e três eventos exotérmicos no briquete

nas temperaturas de 355°C, 468°C e 483°C, onde como esperado o briquete apresentou uma combinação de perfis das matérias-primas.

Os eventos exotérmicos observados para os materiais AGP, BMM, BML e do briquete otimizado estão associados à decomposição de celulose, hemiceluloses e lignina, estando relacionados com as reações de combustão e liberação de energia, sendo que cada material possui uma característica específica e uma temperatura de ignição, que pode interferir na queima, isto devido à estabilidade química do combustível (VELUSAMY et al., 2021).

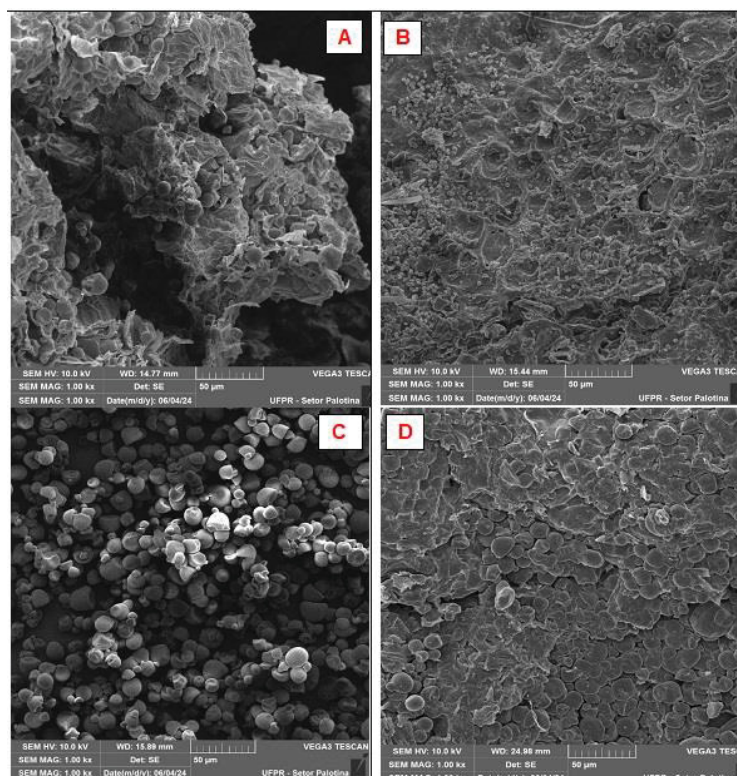
5.5.2. Propriedades Morfológicas e Composicionais

Por meio da microscopia eletrônica de varredura é possível visualizar se as estruturas da superfície foram alteradas na conversão das matérias-primas em briquete (JIN et al., 2016).

Na Figura 12, é apresentada a estrutura morfológica dos materiais AGP, BMM, BML e do briquete otimizado, sendo possível observar com ampliação de 1.000x, uma maior homogeneidade morfológica na superfície do briquete em relação a morfologia apresentada pelos materiais. A morfologia do briquete mudou em função da composição química que resulta na formação de estruturas espaciais diferentes, além da superfície organizacional apresentar maior homogeneidade, possivelmente pelo fato da estrutura sofrer um efeito mecânico de pressão durante a produção. Estas diferenças nas propriedades mecânicas estão relacionadas com as propriedades morfológicas do material (DIAZ et al., 2011).

A imagem da Figura 12 (a) mostra uma morfologia e uma distribuição irregular, no entanto, a imagem 12 (b) demonstra uma morfologia e distribuição mais regular; na imagem 12 (c) é observado uma morfologia uniforme na forma de grânulos típicos de uma pó; por fim na imagem 12 (d) é possível observar uma estrutura morfológica mais plana e uniforme, possivelmente devido ao briquete ser submetido a 9 ton de pressão, durante a sua produção, fator este que pode ser responsável pelo aspecto mais liso em sua superfície.

FIGURA 12- Estrutura molecular dos materiais e briquete otimizado.



LEGENDA: A (bagaço de mandioca), B (bagaço de malte), C (polvilho) e D (briquete).

FONTE: O Autor (2024).

Muazu et al., (2015), verificaram em suas análises de MEV, uma diferença na microestrutura de briquetes produzidos a partir da casca de arroz e espiga de milho. Oliveira (2017), observou em seu estudo que o briquete apresentou uma textura mais plana e superfície lisa em relação aos finos de carvão vegetal e ao lodo de esgoto.

Waheed et al., (2023), realizaram MEV de briquetes compostos de palha de milho, casca de mandioca e serragem, observaram que a ligação dos polímeros foi aprimorada na briquetagem, isso através da superfície lisa, integridade estrutural melhorada, apresentando lacunas fechadas, sem vazios dentro e entre as partículas. A mistura de matéria-prima e ligante na briquetagem é refletido através do empilhamento de algumas das partículas misturadas, auxiliando no fluxo do ligante através do aumento das forças adesivas entre as partículas.

Como o equipamento de MEV possui um espectrofotômetro de energia dispersiva (EDS), na Tabela 16 é apresentado quantitativamente a presença de elementos químicos predominantes na composição em cada um dos materiais AGP, BMM, BML e do briquete otimizado.

TABELA 16- Caracterização elementar dos materiais e briquete otimizado.

Elemento	BMM (%)	BML (%)	AGP (%)	Briquete (%)
C	73,65	56,22	76,78	61,04
O	25,17	24,52	23,16	35,49
Mg	0,37	1,51	-	0,69
K	0,11	0,73	-	0,53
Ca	0,42	0,60	-	1,13
Zn	0,28	0,16	-	0,88
P	-	2,70	-	-
Si	-	0,14	-	-
N	-	12,11	-	-
S	-	1,23	-	-
Na	-	-	0,05	-
Cl	-	0,08	-	0,24

LEGENDA: BMM (Bagaço de mandioca), BML (Bagaço de malte), AGP (Aglutinante polvilho)

FONTE: O Autor (2024).

É possível observar que os materiais são constituídos principalmente pelos elementos carbono e oxigênio, isto devido a sua formação lignocelulósica da biomassa. O briquete apresenta uma concentração intermediária de carbono em relação aos seus constituintes, no entanto houve um incremento na proporção de oxigênio em relação aos seus constituintes. Demais elementos apresentaram baixas concentrações. No entanto, não se observou a presença de metais pesados na composição dos materiais e do briquete otimizado.

As concentrações de magnésio, potássio e silício, podem estar associadas à presença mais significativa de quartzo e argilominerais, uma vez que os materiais AGP, BMM e BML são resíduos oriundos do setor agroindustrial (PINHEIRO, 2007).

Samomssa et al. (2021), observaram a presença de Zn, Fe, Ti, Ca e K na casca de mandioca, sendo K e Ca, encontrados em maiores quantidades, 51 ppm e 33 ppm respectivamente, no entanto não são tóxicos, durante a combustão resultam na forma de cinzas, enquanto isso, Zn volatiliza, resfria e condensa para formar aerossóis.

Waheed et al. (2023), analisaram briquetes formados com palha de milho, casca de mandioca e serragem e, observaram que as principais composições minerais inorgânicas dos briquetes são Si, Ca e K.

Kunh (2022), observou a presença de metais em briquetes produzidos com lodo de abatedouro de aves e serragem, sendo detectados por espectroscopia de absorção atômica, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Na, Zn, com quantidades de metais pesados dentro dos parâmetros internacionais da Comissão Europeia (EU, 2004).

Portanto os briquetes produzidos a partir dos resíduos agroindustriais como bagaço de mandioca e bagaço de malte não apresentam metais pesados ou materiais tóxicos em sua composição, podendo ser empregados na queima em caldeiras e fornos sem risco de contaminação.

6. CONCLUSÕES

As matérias-primas, finos de carvão vegetal, bagaço de mandioca e bagaço de malte, apresentam características físico-químicas e granulométricas importantes para a produção de briquetes, uma vez que, foi observado granulometria principal acima de 0,42 mm para os finos de carvão vegetal e bagaço de mandioca, e granulometria principal acima de 1,40 mm para o bagaço de malte, o que favorece a compactação das misturas. O alto teor de umidade do bagaço de mandioca e bagaço de malte, acima de 69 %, implica no maior gasto energético para secagem e aproveitamento dos materiais na briquetagem, no entanto o teor de cinzas mais baixo destes materiais em comparação com o teor de cinzas dos finos de carvão vegetal de 57%, condiciona uma melhor performance na combustão dos briquetes e maior ganho energético.

Na avaliação das propriedades dos briquetes, por meio das principais análises de resistência mecânica, densidade e poder calorífico, verificou-se o potencial do uso do bagaço de mandioca e bagaço de malte como fontes de energia térmica em processos de combustão, uma vez que a resistência mecânica dos briquetes

proporciona maior qualidade no transporte, por meio da resistência a trincas e rachaduras durante o seu manuseio, a densidade elevada, efetiva o transporte uma vez que otimiza o espaço ocupado pelos briquetes, e poder calorífico proporciona bom desempenho energético na combustão.

As propriedades químicas, térmicas, morfológicas e mecânica, mostram que o briquete de bagaço de mandioca composto por bagaço de malte e aglutinante polvilho, em proporções corretas, podem ser utilizados para produção de energia.

Os resultados mais promissores foram encontrados para a mistura de 77 % em massa de bagaço de mandioca e 23 % bagaço de malte, na produção de briquetes. Constatou-se também que o tratamento com melhores condições para atender o objetivo deste trabalho, foi alcançado com 9% de aglutinante polvilho e temperatura de 44 °C, para o qual os parâmetros de resistência mecânica atingiram 24,86 Mpa, um poder calorífico de 17,6 MJ kg⁻¹ e densidade de 1095 kg m⁻³.

A utilização do bagaço de mandioca e bagaço de malte como fonte de energia, altera o status desses resíduos de passivo ambiental para ativo ambiental, tendo em vista que além de ser mais uma alternativa para a disposição destes resíduos, potencialmente poluidores, permitindo a redução de custos com a aquisição de biomassa na geração de energia térmica.

A viabilidade técnica do briquete pode ser confirmada por meio dos resultados, no entanto, mais estudos são necessários para comprovar a viabilidade econômica do uso de briquetes de bagaço de mandioca e bagaço de malte para produção de energia e analisar os gases gerados na combustão.

Portanto briquetes produzidos com resíduos agroindustriais como bagaço de mandioca e bagaço de malte são uma fonte de biocombustível sólido de segunda geração promissora, sendo tecnicamente viável, por meio do processo de briquetagem, podendo ser empregados na queima em caldeiras e fornos para a geração de energia térmica e elétrica nas agroindústrias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADELEKE, A. ODUSOTE, J. IKUBANNI, P. LASODE, O. MALATHI, M. PASAWAN, D. Physical and mechanical characteristics of composite briquette from coal and pretreated wood fines. *Int. J. Coal Sci. Technol.* 8, 1088–1098, 2021.

AFRA, E. ABYAZ, A. SARAHEYAN, A. The production of bagasse biofuel briquettes and the evaluation of natural binders (Infc, nfc, and lignin) effects on their technical parameters. *J. Clean. Prod.* 278, 123543, 2021.

AFSAL, A. DAVID, R. BAIJU, V. SUHAIL, N.M. PARVATHY, U. RAKHI, R. Experimental investigations on combustion characteristics of fuel briquettes made from vegetable market waste and saw dust. *Mater. Today Proc.* 33, 3826–3831, 2020.

AGÊNCIA EMBRAPA DE INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA. **Cevada**. Disponível em http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/tecnologia_de_alimentos/arvore/CONT000girlw_nqt02wx5ok05vadr12ap522l.html

AHMAD, S. WINARSO, K. YUSRON, R. AMAR, S. Optimization of calorific value in briquette made of coconut shell and cassava peel by varying of mass fraction and drying temperature, **E3S Web of Conferences**, 499, 01009, 2024.

AI, Y. JANE, J.L. Understanding starch structure and functionality. In *Starch in Food*; **Elsevier**: Amsterdam, The Netherlands, pp. 151–178, 2018.

ALARENAN, S. GASIM, A.A. HUNT, L.C. Modelling industrial energy demand in Saudi Arabia. **Energy Economics**, v. 85, p. 1-10, 2020.

ALEXANDRE, H.V. SILVA, F.L.H. GOMES, J.P. SILVA, O.S. CARVALHO, J.P.D. LIMA, E.E. Cinética de Secagem do Resíduo de Abacaxi Enriquecido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.17, n.6, p.640–646, 2013.

ALI, N.U. NINA, P.M. TARLUE, P.J.V. NAKANWAGI, R. KUTIOTE, J.O.E. NUR, A.A. CHANDA, P. Assessment of biomass briquette use as alternative source of renewable energy in kampala district. **African Journal of Environment and Natural Science Research**. V.2 p.68-76, 2019.

ALVES, J.N. Caracterização físico-química do bagaço de malte: abordagem experimental e suas possibilidades de aproveitamento, Universidade Estadual Do Rio Grande Do Sul, Porte Alegre, **TCC**, 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D240-02**. Standard test method for heat for combustion of liquid hydrocarbon fuels by bomb calorimeter. Annual Book of ASTM Standards., Philadelphia, PA, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3173-85**. Standard Test of Humidity. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, PA, 1985.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2015-66**. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, PA, 1973.

ANTMEN, Z.F. Exploitation of peanut and hazelnut shells as agricultural industrial wastes for solid biofuel production. **Fresenius Environmental Bulletin**, v. 28, p. 2340-2347, 2019.

ARANSIOLA, E. OYEWUSI, T. OSUNBITAN, J. Effect of binder type, binder concentration and compacting pressure on some physical properties of carbonized corncob briquette. **Energy Reports**, v. 5, p. 909-918, 2019.

ARANSIOLA, E. OYEWUSI, T. OSUNBITAN, J. OGUNJIMI, L. Effect of binder type, binder concentration and compacting pressure on some physical properties of carbonized corncob briquette. **Energy Rep.** 5, 909–918, 2019.

ARAÚJO, S. BOAS, M.A.V. NEIVA, D.M. CARNEIRO, A.D.C. VITAL, B. BREGUEZ, M. PEREIRA, H. Effect of a mild torrefaction for production of eucalypt wood briquettes under different compression pressures. **Biomass-Bioenergy**, 90, 181–186, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR10.004**. Classificação de Resíduos, Rio de Janeiro, ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14984**: Determinação da densidade aparente de cavacos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 4p.1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 3p, 1987.

BAJWA, D.S. PETERSON, T. SHARMA, N. SHOJAEIARANI, J. BAJWA, S.G. A review of densified solid biomass for energy production, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 96, 296-305, 2018.

BARROS NETO, B. SCARMINIO, I.S. BRUNS, R.E. Como fazer experimentos. Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. 4^a. Ed. Porto Alegre: **Bookman**. 2010.

BAZARGAN, A. ROUGH, S.L. MCKAY, G. Fine tuning of process parameters for improving briquette production from palm kernel shell gasification waste. **Environ. Technol.** 39, 931–938, 2017.

BAZARGAN, A. ROUGH, S.L. MCKAY, G. Compaction of palm kernel shell biochars for application as solid fuel. **Biomass Bioenergy**, 70, 489–497, 2014.

BERLIAN, R.I. MEILYADI, L.A.D. BAHTIAR, B. Pemanfaatan limbah kulit singkong dan sekam padi dalam pembuatan biobriket dengan perekat tapioka sebagai bahan alternatif biomassa. **Komunikasi Fisika Indonesia**, Vol 20, Issue 1, 1-8, 2023.

BREYER, C. HEINONEN, S. RUOTSALAINEN, J. New consciousness: A societal and energetic vision for rebalancing humankind within the limits of planet Earth. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 114, p. 7-15, 2017.

CHUNGCHAROEN, T. SRISANG, N. Preparation and characterization of fuel briquettes made from dual agricultural waste: Cashew nut shells and areca nuts. **J. Clean. Prod.** 256, 120-434, 2020.

CHUKWUNEKE, J. UMEJI, A. OBIKA, E. FAKIYESI, O. Optimization of composite briquette made from sawdust/rice husk using starch and clay binder. **Int. J. Integr. Eng.** 13, 208–216, 2021.

DESHANNAVAR, U.B. HEGDE, P.G. DHALAYAT, Z. PATIL, V. GAVAS, S. Production and characterization of agro-based briquettes and estimation of calorific value by

regression analysis: An energy application. Mater. Sci. **Energy Technol.** 1, 175–181, 2018.

DESOUKY, M.G. KHALIL, M.A. BINDARY, A.A. BINDARY, M.A. Biological, Biochemical and Thermochemical Techniques for Biofuel Production: An Updated Review. **Biointerface Res. Appl. Chem.** 12, 3034–3054, 2021.

DIAZ, C.B. BARRERA, G.M. GENCEL, O. MARTÍNEZ, L.A.B. BROSTOW, W. Processed wastewater sludge for improvement of mechanical properties of concretes. **Journal of hazardous materials**, v. 192, n. 1, p. 108-115, 2011.

DINESHA, P. KUMAR, S. ROSEN, M.A. Biomass briquettes as an alternative fuel: A comprehensive review. **Energy Technol.** 7, 1801011, 2019.

DUCA, D. RIVA, G. PEDRETTI, E.F. TOSCANO, G. Wood pellet quality with respect to EN 14961-2 standard and certifications. **Fuel**, v. 135, p. 9-14, 2014.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Estudos da demanda de energia**. 2016. Disponível em: <<https://bit.ly/2WT6c03>>.

EUROPEAN COMMISSION. Heavy metals and organic compounds from wastes used as organic fertilisers. Compost quality definition, **Legislation and standards**. Annex 2. July, 2004.

ESPUELAS, S. MARCELINO, S. ECHEVERRÍA, A.M. CASTILLO, J.M. SECO, A. Low energy spent coffee grounds briquetting with organic binders for biomass fuel manufacturing. **Fuel**, v. 278, p. 118310, 2020.

FAIZAL, H.M. RAHMAN, M.R.A. LATIFF, Z. Review on densification of palm residues as a technique for biomass energy. **Jurnal Teknologi**, v. 78, p. 9-18, 2016.

FAO. Industrial Charcoal Making, **FAO Forestry Paper No. 63**. Mechanical Wood Products Branch. Forest Industries Division. FAO Forestry Department, 1985.

FRANCIK, S. KNAPCZYK, A. KNAPCZYK, A. FRANCIK, R. Decision Support System for the Production of Miscanthus and Willow Briquettes. **Energies**, v. 13, p. 1364, 2020.

FREITAS, A. C. OLIVEIRA, F. NETO, P. O. Estudo da hidrólise ácida e enzimática do amido da farinha de mandioca. **57º Congresso Brasileiro de Química**. 2017

GALVANI, F. GAERTNER, E. Adequação da Metodologia Kjeldahl para determinação de Nitrogênio Total e Proteína Bruta, **EMBRAPA**, Corumbá MS, 2006.

GARRIDO, M.A. CONESA, J.A. GARCIA, M.D. Characterization and Production of Fuel Briquettes Made from Biomass and Plastic Wastes. **Energies** 10, 850, 2017.

GILVARI, H. JONG, W.D. SCHOTT, D.L. Quality parameters relevant for densification of bio-materials: Measuring methods and affecting factors-A review. **Biomass & Bioenergy**, v. 120, p. 117-134, 2019.

GO, A.W. CONAG, A.T. IGDON, R.M.B. TOLEDO, A.S. MALILA, J.S. Potentials of agricultural and agro-industrial crop residues for the displacement of fossil fuels: a Philippine context, **Energy Strateg.** Rev. 23, 100-113, 2019.

GRANADO, M.P.P. GADELHA, A.M.T. RODRIGUES, D.S. ANTONIO, G.C. ANDREA CONTI, A.C. Effect of torrefaction on the properties of briquettes produced from agricultural waste. **Bioresource Technology Reports**, 21, 101340, 2023.

GRANADO, M.P.P. SUHOGUSOFF, Y.V.M. SANTOS, L.R.O. YAMAJI, F.M. DE CONTI, A.C. Effects of pressure densification on strength and properties of cassava waste briquettes. **Renewable Energy**, v. 167, p. 306-312, 2021.

GROVER, P.D. MISHRA, S.K. Biomass Briquetting: Technology and Practices. In Regional Wood Energy Development Program in Asia, Field Document No. 46; Food and **Agriculture Organization of the United Nations**: Bangkok, Thailand, p. 46, 1996.

GWENZI, W. NCUBE, R.S. RUKUNI, T. Development, properties and potential applications of high-energy fuel briquettes incorporating coal dust, biowastes and post-consumer plastics. *SN Appl. Sci.* 2, 1–14, 2020.

HAN, H. DUAN, D. YUAN, P. Binders and bonding mechanism for rhf briquette made from blast furnace dust. *ISIJ Int.* 54, 1781–1789, 2014.

HELWANI, Z. RAMLI, M. RUSYANA, A. MARLINA, M. FATRA, W. IDROES, G.M. SUHENDRA, R. ASHWIE, V. MAHLIA, T.M.I. IDROES, R. Alternative Briquette Material Made from Palm Stem Biomass Mediated by Glycerol Crude of Biodiesel Byproducts as a Natural Adhesive. *Processes*, v. 8, p. 777, 2020.

HOANG, A.T. 2-methylfuran (mf) as a potential biofuel: A thorough review on the production pathway from biomass, Combustion progress, and application in engines. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 148, 111265, 2021.

IBITOYE, S.E. JEN, T.C. MAHAMOOD, R.M. AKINLABI, E.T. Densification of agro-residues for sustainable energy generation: No overview. *Bioresour. Bioprocess.* 8, 1–19, 2021.

IMBERTI, R.M. Potencialidades dos resíduos agroindustriais para geração de energia por meio de briquetes de serragem e óleo de frango. Instituto Latino-Americano De Tecnologia, Infraestrutura E Território, Foz do Iguaçu-PR, **TESE**, 2024.

ISO - International Organization for Standardization. **ISO 17225-7**. Solid Biofuels-Fuel Specifications and Classes. Part 7: Graded Non-woody Briquettes. Geneva, Switzerland, 2021.

IUPAC - International Union of Pure and Applied Chemistry; Standard methods for the analysis of oils, fats and derivatives, Pergamon Press: **Oxford**, 6 ed., 1979.

JIN, J. LI, Y. ZHANG, J. WU, S. CAO, Y. LIANG, P. ZHANG, J. WONG, M.H. SHAN, S. CHRISTIE, P. Influence of pyrolysis temperature on properties and environmental safety of heavy metals in biochars derived from municipal sewage sludge. **Journal of Hazardous Materials**, v.320, p.417-426, 2016.

JUNIOR, C.R.S. LIMA, P.A.F. LOPES, D.M.M. BARBOSA, P.V.G. CONEGLIAN, A. ALMEIDA, R.D.A. Characterization of biomass, charcoal and briquette of *Phyllostachys aurea* Carr. ex A. & C. **Riviere. Sci. For.** 45, 619–628, 2017.

KAMBO, H.S. DUTTA, A. Strength, storage, and combustion characteristics of densified lignocellulosic biomass produced via torrefaction and hydrothermal carbonization. **Appl. Energy**, 135, 182–191, 2014.

KHLIFI, S. LAJILI, M. BELGHITH, S. MEZLINI, S. TABET, F. JEGUIRIM, M. Briquettes production from olive mill waste under optimal temperature and pressure conditions: physico-chemical and mechanical characterizations. **Energies**, v. 13, p. 1214, 2020.

KIJO, K.A. SRODA, K. KOSOWSKA, G.M. MUSIAŁ, T. WOLSKI, K. Combustion of pelleted sewage sludge with reference to coal and biomass. **Fuel**, v. 170, p. 141-160, 2016.

KIVUMBI, B. JANDE, Y.A. KIRABIRA, J.B. KIVEVELE, T.T. Production of carbonized briquettes from charcoal fines using African elemi (*Canarium schweinfurthii*) resin as an organic binder. In *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*; Taylor Francis: **Abingdon-on-Thames**, UK, pp. 1–17, 2021.

KPALO, S.Y. ZAINUDDIN, M.F. MANAF, L.A. ROSLAN, A.M. A Review of Technical and Economic Aspects of Biomass Briquetting. **Sustainability**, v. 12, p. 4609, 2020.

KPALO, S.Y. ZAINUDDIN, M.F. MANAF, L.A. ROSLAN, A.M. Production and Characterization of Hybrid Briquettes from Corncobs and Oil Palm Trunk Bark under a Low Pressure, Densification Technique. **Sustainability**, v. 12, p. 2468, 2020.

KUMAR, R. CHANDRASHEKAR, N. Production and characterization of briquettes from invasive forest weeds: Lantana camara and Prosopis juliflora. J. Indian Acad. **Wood Sci.** 17, 158–164, 2020.

KUNH, S.S. Viabilidade técnica e econômica da produção de briquetes de lodo do tratamento primário de efluente avícola e serragem, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, **TESE**, 2022.

KUSUMAWATI, N.P. PRANOWO, D. SISWANTO, D. ANGGAYASTI, W.L. A feasibility study of bio-briquettes production from the skin and epidermis layer of cassava (Manihot esculenta) as an alternative energy. **Jurnal Penelitian Pendidikan IPA**, Volume 10, Issue 6, 3090-3097, 2024.

LISSETH, C. MARTINEZ, M. PATRÍCIA, E. ROCHA, A. DE CASSIA, A. CARNEIRO, O. JOSE, F. GOMES, B. APARECIDA, L. BATALHA, R. VAKKILAINEN, E. CARDOSO, M. Characterization of residual biomasses from the coffee production chain and assessment the potential for energy purposes, **Biomass Bioenergy** 120, 68-76, 2019.

LIU, L. WANG, D. GAO, L. DUAN, R. Distributed heating/centralized monitoring mode of biomass briquette fuel in chinese northern rural areas. Renew. **Energy**, 147, 1221–1230, 2020.

LUBWAMA, M. YIGA, V.A. MUHAIRWE, F. KIHEDU, J. Physical and combustion properties of agricultural residue bio-char biocomposite briquettes as sustainable domestic energy sources. Renew. **Energy**, 148, 1002–1016, 2020.

LUBWAMA, M. YIGA, V.A. Characteristics of briquettes developed from rice and coffee husks for domestic cooking applications in Uganda. Renew. **Energy**, 118, 43–55, 2018.

JUPPA, A.M.R. ANDRIOLA, M.P. LIMA, V.O.D. SANTOS, A.B. OLIVEIRA, L.C. OLIVEIRA, A.F. Pellets produzidos a partir da biomassa de capim elefante BRS

Kurumi, lodo flotado e bagaço de mandioca. **Latin American Journal of Energy Research**. v. 11, n. 1, pp. 209-217, 2024.

MAIA, B.G.D.O. DE OLIVEIRA, A.P.N. DE OLIVEIRA, T.M.N. MARANGONI, C. SOUZA, O. SELLIN, N. Characterization and production of banana crop and rice processing waste briquettes. *Environ. Prog. Sustain. Energy* 37, 1266–1273, 2017.

MAIA, B.G.O. SOUZA, O. MARANGONI, C. HOTZA, D. DE OLIVEIRA, A.P.N. SELLIN, N. Production and characterization of fuel briquettes from banana leaves waste. *Chem. Eng. Trans.* 37, 439–444, 2014.

MARREIRO, H.M.P. PERUCHI, R.S. LOPES, R.M.B.P. ANDERSEN, S.L.F. ELIZIÁRIO, S.A. ROTELLA JUNIOR, P. Empirical Studies on Biomass Briquette Production: A Literature Review. **Energies**, v. 14, p. 8320, 2021.

MARTINEZ, J.F.G. GOMEZ, L.M.T. GUZMAN, M.F.S. Energy from biomass: alternative for the reduction of atmospheric emissions. **Revista Digital Lampsakos**, v. 2145, p. 70-78, 2020.

MARTINEZ, C.L.M. SERMYAGINA, E. CARNEIRO, A.D.C.O. VAKKILAINEN, E. CARDOSO, M. Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil. **Biomass & Bioenergy**, v. 123, p. 70-77, 2019.

MASSARDI, M.M. MASSANI, R.M. SILVA, D.J. Caracterização Química do Bagaço de Malte e Avaliação do seu Potencial para Obtenção de Produtos de Valor Agregado. **The Jornal of Engineering and Exact Scienc**, 06. 01, 2020.

MASULLO, L.S. ALES, L.S. QUADROS, T.M.C. SILVA, D. DE PÁDUA, F.A. YAMAJI, F.M. Use of Blends Containing Different Proportions of Straw and Sugarcane Bagasse for the Production of Briquettes. **Rev. Virtual Quím.** 10, 641–654, 2018.

MIAO, Z. ZHANG, P. LI, M. WAN, Y. MENG, X. Briquette preparation with biomass binder. In *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*; Taylor Francis: **Abingdon-on-Thames**, UK, pp. 1–11, 2019.

MORALES, M.M. RUÍZ, G.V. LÓPEZ, S.L.B. RUTIAGA, Q.J.G. Exploitation of Wood Waste of *Pinus* spp for Briquette Production: A Case Study in the Community of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. **Appl. Sci.** 10, 29-33, 2020.

MUAZU, R.I. STEGEMANN, J.A. Effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and corn cobs. *Fuel Process. Technol.* 133, 137–145, 2015.

MUGABI, P. KISAKYE, D. Status of production, distribution and determinants of biomass briquette acceptability in Kampala city, uganda. **Maderas Ciencia Tecnol.** Source, 23, 4067, 2021.

NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 10 Julho. 2024.

NAQVI, S.R. HAMEED, Z. TARIQ, R. SYED, A. ALI, T.I. NIAZI, M.B.K. NOOR, T. HUSSAIN, A. IQBAL, N. SHAHBAZ, M. Synergistic effect on co-pyrolysis of rice husk and sewage sludge by thermal behavior, kinetics, thermodynamic parameters and artificial neural network. **Waste Management**, v. 85, p. 131-140, 2019.

NALEVAIKO, J.Z. CREMONEZ, P.A. TELEKEN, J.G. Utilização de subprodutos agroindustriais na produção de briquetes. **Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas** (Tupã), v. 15, n. 1, p. 1-26, 2021.

NAVALTA, C.J.L.G. BANAAG, K.G.C. RABOY, V.A.O. VÁ, A.W. CABATINGAN, L.K. JU, Y.H. Solid fuel from Co-briquetting of sugarcane bagasse and rice bran. **Renewable Energy**, v. 147, p. 1941-1958, 2019.

NGUYEN, X.P. LE, N.D. PHAM, V.V. HUYNH, T.T. DONG, V.H. HOANG, A.T. Mission, challenges, and prospects of renewable energy development in vietnam. **Energy Source Part A Recover. Util. Environ. Effects**, 2021.

NINO, A. ARZOLA, N. ARAQUE, O. Experimental Study on the Mechanical Properties of Biomass Briquettes from a Mixture of Rice Husk and Pine Sawdust. **Energies**, v. 13, p. 1-20, 2020.

NUNES, L.J. MATIAS, J.C. LOUREIRO, L.M. SÁ, L.C. SILVA, H.F. RODRIGUES, A.M. CAUSER, T.P. DEVALLANCE, D.B. CIOLKOSZ, D.E. Evaluation of the potential of agricultural waste recovery: Energy densification as a factor for residual biomass logistics optimization. **Appl. Sci.** 11, 20. 2021.

NUNES, E.Z. DE ANDRADE, A.M. JÚNIOR, A.F.D. Production of briquettes using coconut and eucalyptus wastes. **Rev. Bras. Eng. Agrícola Ambiente**. 23, 883–888, 2019.

NUREK, T. GENDEK, A. ROMAN, K. DĄBROWSKA, M. The effect of temperature and moisture on the chosen parameters of briquettes made of shredded logging residues. **Biomass & Bioenergy**, v. 130, p. 105368, 2019.

NWABUE, F. UNAH, U. ITUMOH, E. Production and characterization of smokeless bio-coal briquettes incorporating plastic waste materials. *Environ. Technol. Innov.* 8, 233–245, 2017.

OBI, O.F. PECENKA, R. CLIFFORD, M.J. A Review of Biomass Briquette Binders and Quality Parameters, **Energies** 15, 2426, 2022.

OBI, O.F. Evaluation of the physical properties of composite briquette of sawdust and palm kernel shell. *Biomass Convers. Biorefin*, 5, 271–277. 2015.

OKOT, D.K, BILSBORROW, P.E, PHAN, A.N. Briquetting characteristics of bean straw-maize cob blend. **Biomass & Bioenergy**, v. 126, p. 150-158, 2019.

OLIVEIRA, R.S. Produção de briquetes a partir do lodo de esgoto sanitário e finos de carvão vegetal para geração de energia por combustão, Tese de Doutorado em Eng. Química, **Unioeste**, Toledo, 2017.

OLIVEIRA, R.S. PALÁCIO, S.M. DA SILVA, E.A. MARIANI, F.Q. REINEHR, T.O. Briquettes production for use as power source for combustion using charcoal thin waste and sanitary sewage sludge. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 10778–10785, 2017.

ONIFADE, S.T. ALOLA, A.A. ERDOGAN, S. ACET, H. Environmental aspect of energy transition and urbanization in the OPEC member states. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 17158–17169, 2021.

ONU <https://www.un.org/development/desa/dspd/wpcontent/uploads/sites/22/2021/05/World-Social-Report-2021>.

OYELARAN, O.A. BOLAJI, B.O. WAHEED, M.A. ADEKUNLE, M.F. Performance evaluation of the effect of binder on groundnut shell briquette. **Appl. Sci. Eng. Prog.** 8, 11–19, 2015.

PADILLA, E.R.D. PIRES, I.C.S.A. YAMAJI, F.M. FANDIÑO, J.M.M. Production and Physical-Mechanical Characterization of Briquettes from Coconut Fiber and Sugarcane Straw. **Rev. Virtual Quím.** 8, 1334–1346, 2016.

PANDEY, A. SOCCOL, C.R. NIGAM, P. SOCCOL, V.T. VANDENBERGHE, L.P.S. MOHAN, R. Biotechnological potential of agro-industrial residues. II: cassava bagasse. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 74, p. 81-87, 2000.

PATTIYA, A. TITILOYE J.O. BRIDGWATER, A.V. Evaluation of catalytic pyrolysis of cassava rhizome by principal component analysis. **Fuel**, v. 89, p. 244-253, 2010.

PEREIRA, F.A. CARNEIRO, A.C.O. VITAL, B.R. DELLA LÚCIA, R.M. PATRÍCIO JÚNIOR, W. BIANCHE, J.J. Propriedades físico-químicas de briquetes aglutinados com adesivo de silicato de sódio. **Floresta e Ambiente**. v.16, n.1, p.23-29, 2009.

PINHEIRO, C.H R. Zn, Ni, Cr, Cu, Fe e S em lodo de esgoto: comportamento químico, adsorção e proposta de tratamento. Universidade de São Paulo, São Paulo, **TESE** 131, 52 p., 2007.

QIN, F. JOHANSEN, A.Z. MUSSATTO, S.I. Evaluation of different pretreatment strategies for protein extraction from brewer's spent grains. **Industrial Crops and Products**, v. 125, n. p. 443–453, 2018.

RAMOS, P.M. GIL, J.G. GARCÍA, D.G OTERINO, J.A.C. On the Physicochemical Characteristics and Applications of an “Undesirable” Pyrenean Thorny Cushion Dwarf: *Echinospartum horridum* (Vahl) Roth. **Plants** 9, 1180, 2020.

RASLA, V.L. Characterization of the woody cutting waste briquettes containing absorbed glycerol. **Biomass-Bioenergy**, 45, 144–151, 2012.

RODRIGUES, G.S. HELMER, L.J. DEVENS, M.C.M. FONSECA, P. R. F. SIMONELLI, G. Produção de briquetes para queima utilizando finos da produção de carvão vegetal e glicerina, **HOLOS**, 33, 01, 2017.

ROJAS, C. CEA, M. DIAZ, F.R. Physical, Chemical and Mechanical Characterization of a Prototype Insulating Material Based on Eucalyptus Bark Fiber. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, p. 2441-2446, 2018.

ROSA, W. S. Impacto ambiental na produção da cerveja artesanal: análise da geração de resíduos. **Siepex** - Cachoeira do Sul, 2018.

SAHOO, K. BILEK, E. BERGMAN, R. MANI, S. Techno-economic analysis of producing solid biofuels and biochar from forest residues using portable systems. **Appl. Energy**, 235, 578–590, 2019.

SAHU, S.G. CHAKRABORTY, N. SARKAR, P. Coal–biomass co-combustion: An overview. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 39, 575–586. 2014.

SAMOMSSA, I. NONO, Y.J. GETA CARAC, G. GURAU, G. DINICA, M.R. KAMGA, R. Optimization of fuel briquette production from cassava peels, plantain peels and corn cobs. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23, 1905–1917, 2021.

SÁNCHEZ, M.E. MENÉNDEZ, J.A. DOMÍNGUEZ, A. PIS, J.J. MARTÍNEZ, O. CALVO, L.F. BERNAD, P.L. Effect of pyrolysis temperature on the composition of the oils obtained from sewage sludge. *Biomass and Bioenergy*, v.33, p.933-940, 2009.

SAWADOGO, M. TANO, S. SIDIBÉ, S. Cleaner production in Burkina Faso: Case study of fuel briquettes made from cashew industry waste. *Journal of Cleaner Production*, v. 195, p. 1047-1056, 2018.

SCHOTT, D. TANS, R. DAFNOMILIS, G. HANCOCK, V. LODEWIJKS, G. Assessing a durability test for wood pellets by discrete element simulation. *FME Trans.* 44, 279–284, 2016.

SHONE, C. JOTHI, T. Preparation of gasification feedstock from leafy biomass. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23, 9364–9372, 2016.

SILVA, A.L.P. Estudo comparativo do poder calorífico dos briquetes de biomassa: bagaço de cana, mesocarpo de coco e sabugo de milho, com adição de aglutinantes residuais. Universidade Federal Da Paraíba, João Pessoa, **TCC**, 2023.

SILVA, J.W.F. CARNEIRO, R.A.F. LOPES, J.M. Briquette residual biomass: technical feasibility for the production of briquettes in the golden microregion. *Brazilian magazine of renewable energies*, v. 6, n. 4, p. 624-646, 2017.

SILVA, D.A.L. CARDOSO, E.A.C. VARANDA, L.D. CHRISTOFORO, A.L. MALINOVSKI, R. A. Análise de viabilidade econômica de três sistemas produtivos de

carvão vegetal por diferentes métodos. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 38, n. 1, p. 185-193, 2014.

SOARES, L. DE S. Utilização de Resíduos de Borra de Café e Serragem na Moldagem de Briquetes e Avaliação de Propriedades. **Rev. Matéria**, v. 20, n. 2, p. 550–560, 2015.

STOLARSKI, M.J. SZCZUKOWSKI, S. TWORKOWSKI, J. KRZYŻANIAK, M. GULCZYNSKI, P. MLECZEK, M. Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass. **Renewable energy**, v.57, p.20-26, 2013.

TAQUIDIR, J.U. Utilização de resíduos de coco seco carbonizados para a produção de briquetes, Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane, Maputo, Moçambique, **TCC**, 2024.

TEIXEIRA, S.R. PENA, A.F.V. MIGUEL, A.G. Briquetting of charcoal from sugarcane bagasse fly ash (scbfa) as an alternative fuel. **Waste Management**, v. 30, p. 804-807, 2010.

THORESON, C.P. WEBSTER, K.E. DARR, M.J. KAPLER, E.J. Investigation of Process Variables in the Densification of Corn Stover Briquettes. **Energies** 7, 4019–4032, 2014.

TUMULURU, J.S. FILLERUP, E. Briquetting characteristics of woody and herbaceous biomass blends: Impact on physical properties, chemical composition, and calorific value. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 14, p. 1105-1124, 2020.

TUMULURU, J.S. YANCEY, N.A. KANE, J.J. Pilot-scale grinding and briquetting studies on variable moisture content municipal solid waste bales—impact on physical properties, chemical composition, and calorific value. **Waste Manag.** 125, 316–327, 2021.

VASCONCELOS, R.B. Análise Imediata e Avaliação do Poder Calorífico das Espécies: EUCALIPTO (*Eucalyptus globulus*), MARMELEIRO (*Croton sonderianus*) e IPÊ ROXO (*Handroanthus impetiginosus*). Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, **TCC**, 2017.

VEIGA, J.P.S. VALLE, T.L. FELTRAN, J.C. BIZZO, W.A. Characterization and productivity of cassava waste and its use as an energy source, **Renew. Energy** 93, 691-699, 2016.

VELUSAMY, S. SUBBAIYAN, A. THANGAM, R.S. Combustion characteristics of briquette fuels from sorghum panicle–pearl millets using cassava starch binder. Environ. **Sci. Pollut. Res.** 28, 21471–21485, 2021.

WAHEED, M.A. AKOGUN, O.A. ENWEREMADU, C.C. Influence of feedstock mixtures on the fuel characteristics of blended cornhusk, cassava peels, and sawdust briquettes. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 13, 16211–16226, 2023.

WAHEED, M.A. AKOGUN, O.A. Quality enhancement of fuel briquette from cornhusk and cassava peel blends for cofiring in coal thermal plant. **Int. J. Energy Res.** 45, 1867–1878, 2020.

WANG, T. HOU, H. YE, Y. LI, J. XU, Y. Combustion behavior of refuse-derived fuel produced from sewage sludge and rice husk/wood sawdust using thermogravimetric and mass spectrometric analyses. **Journal of Cleaner Production**, v. 222, p. 1-11, 2019.

WU, L.X. LEE, S.J. A Deep Learning-Based Strategy to the Energy Management-Advice for Time-of-Use Rate of Household Electricity Consumption. **Journal of Internet Technology**, v. 21, p. 305-311, 2020.

YANG, H. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, n. 12–13, p. 1781–1788, 2007.

ZANATTA, E.R. Estudo Cinético da Pirolise das biomassas: Bagaço de mandioca, Casca de soja e Bagaço de Cana. Tese de Doutorado em Eng. Química, **Unioeste**. Toledo, 2012.

ZENATTI, D.C. COSTA, A.A. HERMES, E. VILVERT, R.M. DIAS, L.C. Quantificação de açúcares redutores em hidrolisado do bagaço da mandioca para uso na produção de metano. **Revista gestão e sustentabilidade ambiental**. Florianópolis, n. p.616-627, 2015.

APÊNDICE 1

TABELA A1- Revisão de trabalhos da literatura.

REFERÊNCIA	MATÉRIA-PRIMA	VARIÁVEIS DA BRIQUETAGEM	RESULTADOS
Kusumawati et al., 2024.	Casca de mandioca.	Aglutinante amido de mandioca (5, 10, 15, 20%), pressão (20 a 30 Mpa), granulometria (mistura), temperatura (pirolise).	Poder calorífico de 22,33 MJ kg ⁻¹ .
Juppa et al., 2024	Capim elefante, lodo flotado e bagaço de mandioca.	Prensa peletizadora com matriz de orifícios de abertura de 6 mm, % de biomassa, aglutinante.	Densidade 473,0 kg m ⁻³ , poder calorífico de 18,35 MJ kg ⁻¹ .
Imbert 2024.	Serragem e óleo de frango.	Granulometria, pressão, % de biomassa.	Poder calorífico de 23,02 MJ kg ⁻¹ , resistência mecânica acima de 3 MPa.
Taquidir 2024.	Carvão do mesocarpo e endocarpo de coco seco,	Pressão (10 Mpa), temperatura (150 °C), aglutinante (películas de castanha de caju e resíduos do processamento de algodão), % de biomassa, umidade (8 a 10,86%), granulometria (< 1 mm).	Densidade do endocarpo 1180 kg m ⁻³ e do mesocarpo 970 kg m ⁻³ , poder calorífico do endocarpo 26,16 MJ kg ⁻¹ e do mesocarpo de coco seco 24,87 MJ kg ⁻¹ . Índice de combustão endocarpo 0,66 e mesocarpo 0,61, emissões de monóxido de carbono 70 ppm.
Ahmad et al., 2024.	Casca de coco e casca de mandioca.	Pressão (2 ton), % de biomassa (75/25%, 70/30%, 65/35%), temperatura de secagem (150, 200, 250 °C)	Poder calorífico de 27,97 MJ kg ⁻¹ .
Waheed et al., 2023.	Palha de milho, casca de mandioca e serragem.	Aglutinante (amido 20%), % de biomassa (70/30, 50/50 e 30/70%), Pressão (15 Mpa, Temperatura (ambiente).	Poder calorífico da casca de mandioca foi de 12,8 MJ kg ⁻¹ , e 14 MJ kg ⁻¹ do briquete de casca de mandioca com serragem.
Silva 2023.	Bagaço de cana, mesocarpo de coco e sabugo de milho.	Aglutinante, temperatura (120 °C), pressão (6000 kgf),	Poder calorífico de 18,8 MJ kg ⁻¹ , densidade de 1000 kg m ⁻³ .
Granado et al., 2023.	Resíduo de rizoma de mandioca.	Pressão (10 Mpa), temperatura (120 °C), tempo de prensagem 5 min, torrefação a 250 °C.	Densidade de 1270 kg m ⁻³ , poder calorífico de 19,2 MJ kg ⁻¹ . Após torrefação densidade foi de 810 kg m ⁻³ , poder calorífico de 21,12 MJ kg ⁻¹ .

REFERÊNCIA	MATÉRIA-PRIMA	VARIÁVEIS DA BRIQUETAGEM	RESULTADOS
Kunh 2022.	Lodo de abatedouro de aves e serragem.	Granulometria, umidade (0, 6 e 12%), aglutinante (0, 7,5 e 15%), % de biomassa, pressão (10 ton), tempo de prensagem (60 s).	Resistência mecânica de 18,38 a 27,59 MPa, poder calorífico entre 19,04 e 21,66 MJ kg ⁻¹ , densidade de 1374,15 kg m ⁻³ , presença de metais.
Samomssa et al., 2021.	Casca de mandioca, casca de banana e espiga de milho.	Pressão (10 Mpa), umidade (12%), temperatura (70 °C), % de biomassa.	Resistência mecânica de 2,99 Mpa, poder calorífico de 16 MJ kg ⁻¹ .
Granado et al., 2021.	Resíduos de mandioca.	Pressão (102, 153, 204 Mpa), tempo de prensagem (0, 60, 120s), granulometria (>1,19 mm) e umidade.	Densidade de 918 kg m ⁻³ , densidade energética de 15,7 GJ m ⁻³ , resistência à compressão de 1,29 MPa, poder calorífico de 17,12 MJ kg ⁻¹ .
Nalevaiko et al., 2021.	Bagaço de cana, bagaço de mandioca e cama de aviário.	Granulometria (mistura), prensa de rosca, % de biomassa (30/5/65, 42,5/15/42,5 e 65/5/30%).	Poder calorífico da amostra de bagaço de mandioca foi 18,69 MJ kg ⁻¹ , enquanto o PCS dos briquetes foi de 13,88, 16,41 e 16,85 MJ kg ⁻¹ .
Kpalo et al., 2020.	Espigas de milho e casca do tronco do dendezeiro.	Temperatura, pressão, granulometria, % de biomassa, aglutinante e umidade (9,27%).	Densidade de 380 a 400 kg m ⁻³ e resistência a compressão de 18,47 a 21,75 MPa e poder calorífico de 16,54 a 16,91 MJ kg ⁻¹ .
Khlifi et al., 2020.	Resíduo de azeitona.	Temperatura, pressão (150 Mpa), tempo de prensagem, aglutinante (15%) e granulometria.	Densidade de 204 a 303 kg m ⁻³ , poder calorífico de 16,92 MJ kg ⁻¹ .
Chungcharoen et al., 2020.	Cascas de castanha de caju e noz de areca.	Velocidade de compressão, umidade, aglutinante (10%), granulometria (4,76 mm) e % de biomassa.	Poder calorífico de 18,9 a 21 MJ kg ⁻¹ .
Kumar et al., 2020.	<i>Lantana camara</i> e <i>Prosopis juliflora</i> .	Granulometria (mistura), tipo de biomassa e umidade (10 a 12%).	Densidade de 1200 kg m ⁻³ .
Helwani et al., 2020.	Caule de palmeira.	Pressão (11 e 12 Mpa), tempo de prensagem, aglutinante (40 a 47%), granulometria (0,125 a 0,149 mm).	Poder calorífico de 306 MJ kg ⁻¹ , resistência mecânica de 0,986 MPa.
Morales et al., 2020.	Resíduos de madeira de <i>Pinus</i> spp.	Granulometria (mistura), e aglutinante.	Poder calorífico de 17,0 a 18,3 MJ kg ⁻¹ e densidade de 930 a 1240 kg m ⁻³ .

REFERÊNCIA	MATÉRIA-PRIMA	VARIÁVEIS DA BRIQUETAGEM	RESULTADOS
Waheed et al., 2020.	Casca de milho e casca de mandioca.	Pressão, tempo de prensagem, granulometria (<1.18 mm), % de biomassa (90/10%) e aglutinante.	Poder calorífico de 19,31 MJ kg ⁻¹ , densidade de 590 kg m ⁻³ , resistência a compressão de 1,2 MPa.
Gwenzi et al., 2020.	Pó de carvão, serragem e resíduos plásticos.	Granulometria, % de biomassa e aglutinante (25%).	Poder calorífico de 26,5 a 33,8 MJ kg ⁻¹ , densidade de 1100 a 1300 kg m ⁻³ e resistência à compressão, abaixo de 1 MPa.
Martinez et al., 2019.	Resíduos de pé de café e de pinheiro.	Pressão, temperatura, tempo de prensagem, granulometria (mistura), % de biomassa, tipo de biomassa e umidade.	Densidade de 1107 a 1163 kg m ⁻³ , e resistência mecânica de 40,6 a 55,7 MPa.
Masullo et al., 2018.	Bagaço de cana de açúcar e palha.	Tempo de prensagem, granulometria (mistura), % de biomassa e umidade.	Briquetes com maior quantidade de bagaço de cana apresentaram maior resistência à compressão e menor geração de finos, teor de umidade de 11 a 12%.
Maia et al., 2017.	Folhas de bananeira e casca de arroz.	Pressão, tempo de prensagem, umidade, granulometria (mistura) e tipo de biomassa.	Resistência à compressão de 19,8 MPa e o poder calorífico de 18,1 MJ kg ⁻¹ .
Bazargan et al., 2017.	Casca de palmiste biochars.	Velocidade de compressão, pressão (40 a 60 Mpa), tempo de prensagem e aglutinante (3 a 5%).	Poder calorífico de 31,29 a 1,44 MJ kg ⁻¹ .
Junior et al. 2017.	<i>Phyllostachys aurea</i>	Temperatura, pressão (13,7 Mpa), tempo de prensagem, granulometria e umidade.	Densidade energética de 21,47 GJ m ⁻³ .
Garrido et al., 2017.	Serragem, tronco de tamareira e resíduos plásticos.	Temperatura (120 a 130°C), pressão (44 Mpa), tempo de prensagem, granulometria e % de biomassa.	Briquetes produzidos a 130 °C apresentaram densidade de 1190 kg m ⁻³ .
Oliveira et al., 2017.	Finos de carvão e resíduo de esgoto sanitário.	Pressão, granulometria (mistura), % de biomassa, aglutinante e umidade.	Poder calorífico de 17,47 MJ kg ⁻¹ , resistência a compressão de 41,19 MPa e densidade de 913 kg m ⁻³ .
Nwabue et al., 2017.	Resíduos plásticos, serragem, casca de milho e carvão sub-betuminoso.	Granulometria, % de biomassa, aglutinante (10%) e umidade (10,6%)	Poder calorífico de 13,8 a 21,45 MJ kg ⁻¹ e resistência à compressão de 4,61 MPa.
Padilla et al., 2016.	Fibra de coco e palha de cana de açúcar.	Pressão (14 a 122,3 Mpa), tempo de prensagem, granulometria (mistura), % de biomassa e umidade.	Resistência a compressão de 0,37 MPa e poder calorífico de 18,24 MJ kg ⁻¹ ,

REFERÊNCIA	MATÉRIA-PRIMA	VARIÁVEIS DA BRIQUETAGEM	RESULTADOS
Araújo et al., 2016.	Madeira de <i>Eucalyptus</i> spp. E <i>Eucalyptus grandis</i> .	Pressão, tempo de prensagem, temperatura, granulometria (0,42 mm), tipo de biomassa e umidade (10,5 a 12,8%).	Densidade de 1140 a 1060 kg m ⁻³ e densidade energética de 24,79 e 21,70 GJ m ⁻³ .
Maia et al., 2014.	Resíduos de folhas de bananeira	Pressão, granulometria (2,5 mm) e umidade.	Densidade de 999 e 1000 kg m ⁻³ e resistência à compressão de 5,3 MPa.
Thoreson et al., 2014.	Palha de milho.	Pressão, granulometria (40 a 42 mm) e umidade (8,3%).	Densidade de 470 e 190 kg m ⁻³ .
Rasla 2012.	Resíduos de madeira.	Pressão, temperatura, granulometria, aglutinante (10%) e umidade.	Densidade de 798 kg m ⁻³ , resistência a compressão de 9,1 Mpa e poder calorífico de 17,1 MJ kg ⁻¹ .

FONTE: O Autor (2024).

APÊNDICE 2

TABELA A2- Teste de Tukey para grupos homogêneos.

Cell No.	Tukey HSD test; variable RM (TRES VAR. TRES RESPOSTAS) Homogenous Groups, alpha = ,05000 (Non-Exhaustive Search) Error: Between MS = ,67419, df = 36,000																		
	AGLUTINANTE	MISTURA	T (°C)	RM Mean	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
23	PO	M3	25	0,00000	a														
5	AM	M3	25	0,00000	a														
17	AM	M9	25	0,00000	a														
35	PO	M9	25	0,00000	a														
3	AM	M2	25	3,00000	a	b													
18	AM	M9	60	3,53500		b	c												
21	PO	M2	25	4,01500		b	c	d											
33	PO	M8	25	4,10500		b	c	d											
36	PO	M9	60	4,14500		b	c	d											
24	PO	M3	60	4,23000		b	c	d											
6	AM	M3	60	4,60000		b	c	d	e										
15	AM	M8	25	5,91000		b	c	d	e	f									
2	AM	M1	60	6,50000			c	d	e	f									
22	PO	M2	60	7,20500				d	e	f	g								
31	PO	M7	25	7,70500					e	f	g	h							
16	AM	M8	60	7,79600					e	f	g	h							
13	AM	M7	25	8,10000						f	g	h							
4	AM	M2	60	8,42500						f	g	h							
32	PO	M7	60	8,93500						f	g	h	i						
19	PO	M1	25	9,01500						f	g	h	i						
34	PO	M8	60	9,11500						f	g	h	i						
27	PO	M5	25	9,22500						f	g	h	i	j					
12	AM	M6	60	10,13000							g	h	i	j	k				
25	PO	M4	25	11,00000								h	i	j	k				
9	AM	M5	25	12,22000									i	j	k	l			
8	AM	M4	60	12,60000										j	k	l			
26	PO	M4	60	13,00500											k	l	m		
7	AM	M4	25	13,02500											k	l	m		
14	AM	M7	60	15,20000												l	m	n	
20	PO	M1	60	15,25000												l	m	n	
29	PO	M6	25	16,20000													m	n	
10	AM	M5	60	16,60000														n	
28	PO	M5	60	17,73000														n	
11	AM	M6	25	22,10000															o
1	AM	M1	25	22,10000															o
30	PO	M6	60	23,65500															o

FONTE: O Autor (2024).