



UFPB

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

GILVAN FIGUEIREDO MACIEL FILHO

**PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DE BIOCOMBUSTÍVEL
SÓLIDO A PARTIR DE RESÍDUOS ORGÂNICOS PROVENIENTES DE
INDÚSTRIA DE REVESTIMENTOS**

JOÃO PESSOA – PB

2023

GILVAN FIGUEIREDO MACIEL FILHO

**PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DE BIOCOMBUSTÍVEL
SÓLIDO A PARTIR DE RESÍDUOS ORGÂNICOS PROVENIENTES DE
INDÚSTRIA DE REVESTIMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Coordenação do curso
Engenharia Química da Universidade
Federal da Paraíba, como requisito
parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Sharline
Florentino de Melo Santos

JOÃO PESSOA – PB

2023

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

F481p Filho, Gilvan Figueiredo Maciel.
PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DE BIOCOMBUSTÍVEL
SÓLIDO A PARTIR DE RESÍDUOS ORGÂNICOS PROVENIENTES DE
INDÚSTRIA DE REVESTIMENTOS / Gilvan Figueiredo Maciel
Filho. - João Pessoa, 2023.
45 f. : il.

Orientação: Sharline Florentino de Melo Santos.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Combustíveis; Energia; Sustentabilidade. I.
Santos, Sharline Florentino de Melo. II. Título.

UFPB/BSCT

CDU 66.01(043.2)

GILVAN FIGUEIREDO MACIEL FILHO

**PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DE BIOCOMBUSTÍVEL
SÓLIDO A PARTIR DE RESÍDUOS ORGÂNICOS PROVENIENTES DE
INDÚSTRIA DE REVESTIMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Coordenação do curso
Engenharia Química da Universidade
Federal da Paraíba, como requisito
parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em 07 de junho de 2023.

BANCA EXAMINADORA



Prof.ª Dr.ª Sharline Florentino de Melo Santos – Orientadora
Centro de Tecnologia – Universidade Federal da Paraíba



Prof.ª Dr.ª Marta Célia Dantas Silva
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Universidade Federal da Paraíba



Prof.ª Dr.ª Silvia Layara Floriani Andersen
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Universidade Federal da Paraíba

AGRADECIMENTOS

Grato a Deus pela chance de recomeçar e pela maravilha que é viver.

Se hoje cheguei até aqui, foi pela dedicação e empenho dos meus pais, Valmira e Gilvan, que abdicaram de muita coisa nessa vida para que eu não precisasse abdicar de mais nada e pelo apoio incondicional da minha irmã, Marinna. Tudo o que eu faço é para encher vocês de orgulho.

O meu mais sincero sentimento de gratidão para a minha orientadora Dr^a. Sharline Florentino, por ser o exemplo perfeito da docência, sua influência guia a minha jornada.

Aos meus grandes amigos: Raquel, João Pedro, Netto, Alisson, Jéssica, Laurindo e Victoria por todos os momentos em que acreditaram no meu potencial, incentivaram o meu crescimento e celebraram minhas conquistas. A presença de cada um é o mais perfeito significado de companheirismo.

Aos meus colegas de curso: Silas, Maria Eduarda, Fernanda, Ana Vithoria, Brenna, Lucas e Beliza por todo conhecimento, bons momentos e risadas compartilhados. Essa caminhada se tornou mais divertida ao lado de vocês.

Gratidão aos meus irmãos em Cristo: Ádylla, Allyne, João Batista e Luanne, por mudar os rumos da minha vida para melhor e por rezarem pelo meu bem e felicidade.

Pelos amigos que fiz nessa cidade maravilhosa: Arthur, Giulia, Flaviano, Luanna e Felipe, sou grato pela companhia nos mais diversos momentos ao longo da minha estadia aqui. E também pelos amigos de longa data que sempre me motivaram: Myllenne, Renê, Isis e Alice, mesmo distantes vocês estão sempre comigo.

Para todos os técnicos dos laboratórios da UFPB: Jhonatas, Joelma, Breno, Rafael, Débora e Fabiana, que se mostraram disponíveis e solícitos e para a professora Roberlúcia Araújo pelo suporte na pesquisa.

Por fim, agradeço ao Grupo Elizabeth por fornecer a matéria prima para a pesquisa. Um agradecimento especial para Roxana Sousa e Antônio Ventin pelo incentivo para o desenvolvimento da pesquisa.

RESUMO

Com a capacidade produtiva do país crescendo exponencialmente nos últimos anos, urge de encontrar formas sustentáveis de produzir, visto que grande parte das empresas do Brasil utilizam combustíveis fósseis para geração de energia. O estudo acerca da utilização de fontes renováveis como uma alternativa sustentável para substituição desses combustíveis é amplo e entrega tanto soluções para problemas socioambientais como oportunidade de negócio e redução de custos de produção. O presente trabalho teve como objetivo aproveitar resíduos gerados por uma indústria de revestimentos, como madeira de palletização, papelão e bagaço de cana de açúcar, para produção de biocombustível sólido através do processo de briquetagem. Os resíduos foram divididos em cinco formulações e submetidos a compactação, nas condições 5 ton por 10 minutos em prensa hidráulica. Após a produção dos briquetes foram realizadas análises mecânicas e imediatas com o intuito de caracterizar o biocombustível obtido para determinar sua viabilidade energética. Quanto ao poder calorífico encontrou-se valor de 19,94 MJ/kg, 17,56 MJ/kg, 18,62 MJ/kg, respectivamente para as formulações 1, 2 e 3 caracterizadas granulometricamente e 19,14 MJ/kg e 18,64 MJ/kg para as duas formulações sem tratamento para reduzir o tamanho das partículas. De modo geral, os cinco briquetes caracterizados se mostraram potenciais geradores de energia, de diferentes formas. A formulação 1 obteve os melhores resultados levando em consideração as análises realizadas, apresentando potencial de utilização em processos térmicos de conversão de energia, mostrando que existe potencial energético através do reaproveitamento de resíduos orgânicos industriais através da produção de biocombustível sólido.

Palavras-chave: Combustíveis; Energia; Sustentabilidade.

ABSTRACT

With the country's productive capacity growing exponentially in the past years, urge to find sustainable ways of producing, since most industries in Brazil use fossil fuels for power generation. Studies on the use of renewable sources as a sustainable alternative to replace these fuels is broad and delivers solutions to the socio-environmental problems as it shows business opportunities and reduction of production costs. The present work aimed to reuse residues generated by a brown ware industry, such as pallet wood, cardboard and sugarcane bagasse, for the production of solid biofuel through the briquetting process. The residues were divided into five formulations and subjected to compression, under the pressing conditions at 5 ton for 10 minutes in a hydraulic press. After the production of the briquettes, mechanical and immediate analyzes were realized in order to characterize the biofuel obtained to determine their energy viability. As to the Higher Calorific Value of 19,94 MJ/kg, 17,56 MJ/kg, 18,62 MJ/kg were found, respectively for the granulometrically characterized formulations 1, 2 and 3, 19,14 MJ/kg and 18,64 MJ/kg for the two formulations without treatment to reduce their particles sizes. In general, the five characterized briquettes proved to be potential energy generators, in different applications. The briquette 1 obtained the best results taking into account the analyzes, showing potential for use in thermal energy conversion processes, showcasing that there is energetic potential through to reuse of industrial organic residues for solid fuels production.

Key Words: Solid fuels; Energy; Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Madeira de pallet antes e após serragem com 2 granulometrias.....	21
Figura 2 - Papelão antes da trituração e mistura com água usada como ligante.	22
Figura 3 - Bagaço de cana antes e após trituração.....	22
Figura 4 - Molde cilíndrico e discos confeccionados.	23
Figura 5 - Prensa hidráulica.....	24
Figura 6 - Método estereométrico para determinação de densidade	25
Figura 7 - Ensaio de resistência à compressão.	26
Figura 8 - Ensaio para determinar teor de umidade.....	27
Figura 9 - Calorímetro IKA C-200	29
Figura 10 - Briquetes produzidos correspondendo a cada formulação.	30
Figura 11– Valores correspondentes a expansividade dos briquetes produzidos.....	31
Figura 12 - Ensaio de resistência à compressão.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Detalhamento experimental.....	23
Tabela 2 - Teste de resistência à compressão dos briquetes.....	33
Tabela 3 - Densidade aparente.....	34
Tabela 4 - Caracterização do teor de umidades dos briquetes.....	35
Tabela 5 - Valores das cinzas	35
Tabela 6 - Valores de cinzas da literatura.....	36
Tabela 7 - Teor de voláteis	37
Tabela 8 - Teor de Carbono Fixo.....	38
Tabela 9 - Poder Calorífico Superior de cada formulação	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 BIOMASSA	14
3.2 BIOCOMBUSTÍVEL SÓLIDO	15
3.3 BRIQUETAGEM E PELETIZAÇÃO	16
3.4 CARACTERIZAÇÃO DO BRIQUETE DE BIOMASSA	17
4. METODOLOGIA	21
4.1 OBTENÇÃO E PREPARAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA	21
4.2 PRODUÇÃO DOS BRIQUETES	22
4.3 AVALIAÇÃO DOS BRIQUETES	24
4.3.1 Densidade	24
4.3.2 Análises mecânicas	25
4.3.3 Análise Imediata	26
4.3.4 Poder Calorífico	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1 PRODUÇÃO DOS BRIQUETES	30
5.2 ANÁLISES MECÂNICAS	31
5.2.1 Teste de expansão	31
5.2.2 Resistência à compressão	32
5.3 DENSIDADE APARENTE	34
5.4 ANÁLISE IMEDIATA	34
5.4.1 Teor de Umidade	34
5.4.2 Teor de Cinzas	35
5.4.3 Teor de Voláteis	37
5.4.4 Carbono Fixo	38
5.5 CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA	38
5.5.1 Poder Calorífico	38
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente é a principal causa da urgência em buscar alternativas sustentáveis para adaptar o modo de produzir levando em consideração a sustentabilidade socioeconômica e energética do país, utilizando fontes de energia que reduzam a emissão de gases poluentes, contaminação da água e coloque em risco a saúde da população.

De acordo o Relatório de Lacuna de Produção de 2020, desenvolvido por renomadas organizações de pesquisa e pela ONU, é possível visualizar um cenário delicado no futuro se a indústria continuar utilizando combustíveis fósseis nos níveis atuais, cooperando para piorar a situação da crise climática no mundo. Segundo Inger Andersen, diretora executiva do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), “investir em energia e infraestrutura de baixo carbono será bom para empregos, para economias, para a saúde e para a qualidade do ar”.

Historicamente a biomassa foi considerada um combustível inferior e poucas vezes incluída nas estatísticas energéticas oficiais. Graças ao crescente reconhecimento dos benefícios ambientais e ao aperfeiçoamento de tecnologias, a biomassa apresenta-se como uma alternativa energética para atender a demanda mundial de energia. (ANDRADE e BIGATON, 2016)

Devido à capacidade de renovabilidade da biomassa, por conta do ciclo do carbono, acredita-se que a combustão de biocombustíveis não contribui para o efeito estufa, graças à conversão neutra de CO₂. (FIGUEIREDO, 2018).

Uma alternativa para o aproveitamento desse potencial energético da biomassa é a produção de briquetes e pellets. O processo de briquetagem consiste na compactação a elevadas pressões e temperatura, densificando os resíduos (ANDRADE e BIGATON, 2016).

A produção de briquetes torna-se uma alternativa energética muito atrativa e com grande potencial de aceitação, já que é considerado um excelente substituto da lenha, que consiste na compactação dos mais diversos resíduos (SOUZA et al., 2018).

Segundo Nakashima et al. (2014), “Qualquer resíduo vegetal, a exemplo, do papel celulose, bagaço de cana de açúcar, podas de árvores, cascas e/ou vagem de vegetais entre

outros, podem ser compactados, desde que se determinem e mantenham as condições apropriadas de umidade e granulometria destes materiais”.

Este presente trabalho estuda a produção de biocombustível sólido utilizando resíduos orgânicos de uma indústria cerâmica localizada no estado da Paraíba e avalia o seu potencial energético, a fim de apresentar uma alternativa energética para a geração de calor a nível industrial.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o potencial energético do biocombustível sólido produzido a partir de matéria prima orgânica obtida em indústria de revestimentos, sendo eles madeira de pallet, papelão e bagaço de cana de açúcar a fim de encontrar uma nova funcionalidade para os resíduos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Produzir briquetes a partir dos resíduos orgânicos obtidos da indústria de revestimentos;
- Analisar os parâmetros físico-químicos do briquete produzido;
- Caracterizar os briquetes quanto a suas características mecânicas;
- Determinar o Poder Calorífico Superior de cada formulação de briquete produzida.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 BIOMASSA

Do ponto de vista energético a biomassa é toda matéria orgânica, seja de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada na produção de energia (ANEEL, 2012). Apesar do reconhecimento do seu potencial energético, a biomassa sempre esteve em segundo plano quando o assunto é energia, devido à dificuldade em medir, quantificar e manusear, visto que se trata de uma fonte de energia dispersa e seu uso ineficiente gera pouca energia útil (ANDRADE e BIGATON, 2016).

A utilização de combustíveis fósseis para a geração de energia está diretamente atrelada ao aprimoramento de processos industriais e o desenvolvimento da sociedade, devido a um aumento sistemático da demanda de energia, a comunidade mundial começou a perceber os impactos de um consumo descontrolado destes recursos. Foi constatado que a grande maioria dos insumos energéticos utilizados na produção de energia em grande escala possui reservas finitas (CARDOSO, 2012).

A utilização da biomassa tem como grandes vantagens seu aproveitamento direto por meio da combustão em fornos, caldeiras e também a redução de impactos socioambientais. Como desvantagens, seu aproveitamento apresenta eficiência reduzida, contudo estão sendo pesquisados aperfeiçoamentos das tecnologias de conversão (CARDOSO, 2012).

O Brasil é o 3º maior gerador de energia renovável do mundo, dados de um estudo realizado pela Agência Internacional de Energia – IEA (2019), e desponta como a nação com o maior potencial de produção bioenergética. No ranking, que considera a capacidade instalada em GW, o país fica somente atrás da China e dos Estados Unidos.

Segundo a EPE (Empresa de Pesquisa Energética), vinculada ao Ministério de Minas e Energia, entre as vantagens competitivas da matriz energética brasileira se destacam a abundância de biodiversidade e de recursos naturais, potencial de energia renovável não aproveitado e setores com alta competitividade como o agropecuário e a indústria de insumos básicos.

Para a produção de biocombustível sólido adensados, briquete, os tipos de biomassa podem ser de resíduos de colheitas (bagaço de cana, palha de milho), madeira

de lei (álamo alpino e álamo), madeira de conífera (pinheiro e abeto), resíduos celulósicos (lodo de papel e papel reciclado, jornais etc.), biomassas herbáceas (feno de alfafa, caníço-malhado etc.) e resíduos sólidos municipais (poda de árvores). (FIGUEIREDO, 2018).

3.2 BIOCOMBUSTÍVEL SÓLIDO

O adensamento de materiais para produção de combustível não é recente. Em 1848 o norte-americano William Easby patenteou, nos Estados Unidos um método de conversão de carvão miúdo em torrões sólidos, através de pressão. Com isso, um material que não possuía praticamente nenhum valor passou a ter inúmeros usos como combustível, movendo desde navios a vapor a fornos para preparação de alimentos (GENTIL, 2008).

Por oferecerem uma queima rápida e uniforme, os biocombustíveis sólidos adensados são usados para queima em abatedouros, cerâmicas, cervejarias, destilarias, fecularias, hospitais, hotéis/motéis, indústria de balas, indústria de óleo de soja, indústria de papel, indústria de refrigerantes, laticínios, lavanderias, metalúrgicas, panificadoras, pizzarias, residências e tinturarias (GENTIL, 2008).

Além do menor preço relativo (mais energia concentrada num mesmo espaço ocupado por lenha) as outras vantagens dos biocombustíveis sólidos adensados para quem os compra são: uniformidade de temperatura e pressão de vapor, proporcionando um melhor acabamento nos produtos cozidos nos fornos; elevação rápida da temperatura, contribuindo para uma maior eficiência nos processos produtivos; redução de mão-de-obra para carga e descarga; padronização dos tamanhos, permitindo um melhor aproveitamento dos espaços tanto para transporte quanto para armazenamento, além de facilitar a acomodação do produto em containers para exportação (TAVARES, 2013).

O mercado para os biocombustíveis sólidos tem foco na produção de *pellets* e dos briquetes, com os mais diversos tipos de matérias primas e com as mais diversas características, devido ao fato de que no Brasil não existe uma regulamentação ou norma técnica sobre a produção de biocombustíveis sólidos como *pellets* e briquetes, então a produção leva em consideração as especificidades do comprador.

3.3 BRIQUETAGEM E PELETIZAÇÃO

Apesar de existir registros da atividade de briquetagem no Brasil desde os anos 40 do século passado, o briquete ainda é um produto emergente, pouco demandado e conhecido no Brasil, onde sequer se tem o registro exato do número de usinas de briquetagem em operação (TAVARES, 2013).

A produção de pellets no Brasil ocorre desde 2012. A primeira planta brasileira foi instalada em 1994, na cidade de Negrinhos, em Santa Catarina. Trata-se da fábrica Battistela, que existe até hoje produzindo pellets de madeira (OLIVEIRA, 2012).

Dias (2002) estabelece uma correlação entre o maior uso de *pellets* ou de briquetes ao grau de desenvolvimento dos países. Segundo ele, os briquetes são mais usados em países em desenvolvimento, como o Brasil, onde predominam os fornos mais rústicos e, por isso, menos eficientes. Já os *pellets* seriam mais usados nos países desenvolvidos, nos quais o seu uso é automatizado, inclusive nas residências.

Os *pellets* e os briquetes são as formas mais refinadas de biomassa sólida. Ambos podem ser produzidos a partir da compactação (adensamento) de qualquer matéria orgânica animal e vegetal, tanto para fins energéticos como alimentares, um bom exemplo de *pellet* alimentar são as rações para animais (TAVARES, 2013). A diferença básica entre os dois biocombustíveis é a aparência e o processo de produção, determinados pelo fim a que se destinam os dois tipos de combustível.

O processo de produção de *pellets* e de briquetes é praticamente igual, mudando apenas os equipamentos que fazem a compactação e adensamento da matéria-prima. O adensamento ligno-celulósico para produção de *pellets* é feita na peletizadora, por extrusão contínua numa matriz de furos, já a compactação do briquete é feito na briquetadeira, equipada com pistão mecânico.

Atualmente a competitividade dos briquetes ou *pellets* no mercado é função da relação preço e Poder Calorífico. Quem compra biocombustível sólido compra na verdade energia, de acordo com a utilidade do biocombustível. (EMBRAPA, 2012).

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO BRIQUETE DE BIOMASSA

As propriedades mensuradas estão ligadas com a efetividade do processo de compactação e com as características para utilização dos produtos. O biocombustível deve suportar a carga de transporte, armazenamento e queima.

No Brasil ainda não existe uma norma técnica que padronize a produção de biocombustíveis sólidos, porém Segundo a EMBRAPA um bom briquete ou *pellet* também deve ser resistente à abrasão, à penetração de água e a ciclos de aumento e diminuição de temperatura, bem como apresentar elevado poder calorífico, e parâmetro como cinzas e umidade dentro dos padrões da literatura.

3.4.1 Densidade

Densidade é um parâmetro importante na compactação: quanto maior a densidade, maior a razão energia/volume. Somado a isso, produtos de alta densidade são desejáveis em termos de transporte, armazenamento e manuseio (EMBRAPA, 2012).

A densidade é um parâmetro que vai afetar diretamente no forma da embalagem, acondicionamento e empilhamento. Densidade baixa tem efeito negativo sobre a densidade energética da pilha ou aglomerado e, por conseguinte, também sobre os custos de transporte e da capacidade de armazenamento, tanto para o produtor do briquete ou do *pellet* como para o consumidor final (EMBRAPA, 2012).

3.4.2 Resistência Mecânica

A resistência à compressão dos briquetes deve ser considerada quando há necessidade de armazenamento e transporte pois caso os resultados dos testes não atinjam valores adequados, podem ocorrer rupturas e levar à abrasão.

No entanto, os resultados devem ser interpretados com critério, porque são influenciados pela dimensão e forma dos briquetes, além das propriedades das matérias-primas a partir dos quais foram produzidos (DIAS JÚNIOR, 2013).

Outra propriedade relevante para a caracterização dos briquetes é relativo ao seu comportamento dimensional. Esta característica física é de grande importância, pois está diretamente relacionada à estabilidade e integridade dos briquetes durante o transporte da fábrica até o consumidor final. Contudo, existe uma ausência na literatura de trabalhos relacionados à avaliação dimensional dos briquetes após a compactação. (PRÓTASIO et al., 2011).

Diante disso, a avaliação mecânica dos briquetes pode ser usada como ferramenta para direcionar seus usos, quer seja doméstico ou até mesmo aplicações em altos fornos industriais.

3.4.3 Análise Imediata

A análise imediata é uma etapa simples e indispensável para o estudo da composição do biocombustível de biomassa em termos de umidade (U), material volátil (MV), carbono fixo (CF) e cinzas (CZ), sendo elas expressas em porcentagem de massa.

Umidade

O teor de umidade de uma amostra expressa a massa de água presente na biomassa. Em relação a processos de combustão da mesma, faz-se fundamental baixo teor de umidade.

Dependendo do tipo de matéria prima e do processo de compactação existe uma faixa de teor de umidade na qual o material pode ser briquetado adequadamente. Umidade em excesso pode provocar explosões devido à formação de vapor, em contrapartida a matéria prima muito seca dificulta os mecanismos de ligação entre as partículas. Diversos estudos recomendam que o valor ótimo de umidade deve estar entre 5 e 10% após a compactação. (EMBRAPA, 2012).

Cinzas

São os resíduos resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidações dos inorgânicos. Com isso, as cinzas são resultado da combustão da biomassa, processada a altas temperaturas, tornando-se necessário o seu conhecimento para evitar operações inadequadas. As cinzas podem conter elementos metálicos já presentes no combustível, argila, areia e sais que possam estar na biomassa e ainda por solos misturados à biomassa durante a colheita ou manuseio (CIESLINSKI, 2014).

O teor de cinzas é a percentagem em massa de cinzas após a queima completa do briquete. A maioria dos resíduos de biomassa tem teor de cinza na faixa entre 2 e 11%.

Materiais voláteis

São os gases produzidos pelo processo de pirólise (decomposição térmica de materiais orgânicos, na ausência de oxigênio) da biomassa. São os hidrocarbonetos leves, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio, umidade, metano, entre outros. Seu teor expressa a facilidade de ignição e queima do combustível, e influi muito no perfil de escoamento gasoso no forno e na velocidade química de reação, ou seja, os voláteis têm um papel importante durante a ignição e as etapas iniciais de combustão da biomassa, além de determinarem a estabilidade da chama durante a combustão (CIESLINSKI, 2014).

Carbono Fixo

O valor do carbono fixo representa a fração residual do combustível, sendo o material remanescente da liberação da fração volatilizada da amostra. Em estudos de composição imediata da biomassa, o percentual em massa do CF é expresso através da diferença entre os teores de Materiais Voláteis (MV) e de Cinzas (CZ) da amostra, segundo Equação 1. (CAVALCANTI, 2020).

$$\text{Carbono Fixo (\%)} = 100 - [\text{MV(\%)} + \text{CZ(\%)}] \quad \text{Equação 1.}$$

Poder Calorífico Superior

Poder calorífico é a quantidade de energia térmica liberada durante a queima completa de uma unidade de massa ou de volume de combustível, expressa em kcal/kg, kJ/kg, kcal/m³ ou kJ/m³. Trata-se de um valor teórico, uma vez que sua determinação é feita em uma câmara adiabática (que impede a troca de calor com o meio externo), na qual a amostra é depositada com 0% de umidade e submetida à queima, com medições contínuas da temperatura através de uma bomba calorimétrica (TAVARES, 2013).

O poder calorífico superior (PCS), que considera a água formada na combustão no estado líquido, pode ser determinado utilizando-se uma bomba calorimétrica inserida num sistema calorimétrico (CIESLINSKI, 2014).

O ideal para um biocombustível sólido industrial é que o poder calorífico seja suficiente para suprir a necessidade energética da fábrica. Segundo Carvalho Junior (2007), para uma substância ser considerada um combustível industrial, ela precisa: (a) existir em grandes quantidades, (b) possuir baixo custo, e (c) ser aplicável no processo industrial em consideração. Um combustível pode conter uma porção incombustível, que não fornece calor durante a combustão. Esta porção na lenha, geralmente, é composta de umidade e cinzas.

4. METODOLOGIA

4.1 OBTENÇÃO E PREPARAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA

As matérias primas utilizadas na presente pesquisa são: madeira de pallet, papelão e bagaço de cana de açúcar. Foram provenientes de uma indústria de revestimentos que fica localizada na cidade de João Pessoa, Paraíba. A fábrica utiliza fornalhas com a finalidade de gerar calor para um atomizador. A fornalha é alimentada com cavaco de madeira, mas devido a condições de transporte e armazenamento, o poder calorífico desse combustível tem grandes oscilações, aumentando assim a quantidade necessária para alimentar a fornalha.

A ideia de briquete como alternativa energética surgiu desse cenário, a fim de reaproveitar alguns resíduos orgânicos gerados pela própria indústria para a geração de energia. Só em 2022, a quantidade de madeira de pallet utilizada nessa indústria de revestimentos ultrapassou 230 toneladas e a quantidade de papelão foi de aproximadamente 100 toneladas.

A paletização é o método logístico muito utilizado, garantindo a gestão de estoque. No caso da indústria de revestimentos em questão, a paletização é feita utilizando pallets de madeira, na própria indústria existe uma fábrica de pallets. Para a produção de briquetes a madeira de pallet foi submetida a tratamento para redução de tamanho da partícula. (Figura 1).

Figura 1 - Madeira de pallet antes e após serragem com 2 granulometrias



O papelão do estudo foi proveniente de caixas utilizadas na indústria, esse material é produzido a partir de fibras de celulose, matéria-prima renovável (fibras virgens) ou de papel reciclado, reprocessados a partir de aparas. O papelão foi triturado e misturado com água e foi utilizado como ligante.

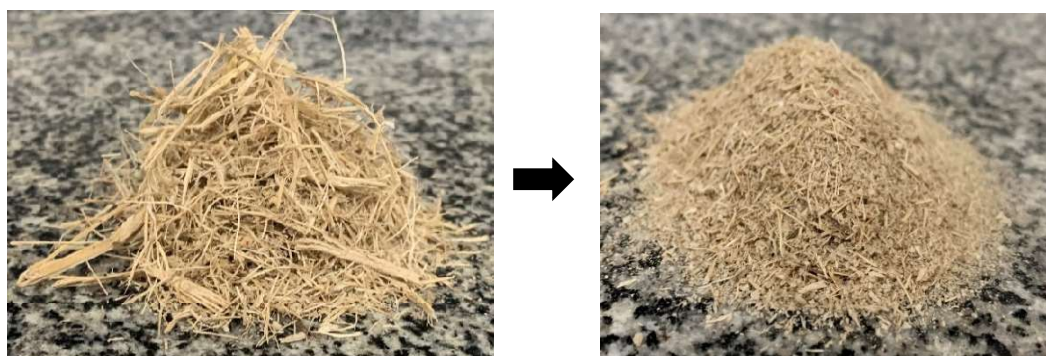
A utilização de ligantes é recomendada onde as ligações com força suficiente para suportar o aglomerado não podem ser atingidas em condições normais (NASCIMENTO, 2022). As proporções da mistura de papelão triturado com água utilizadas foram testadas até obter um briquete que não rompia facilmente.

Figura 2 - Papelão antes da trituração e mistura com água usada como ligante.



O bagaço de cana é uma biomassa que foi adquirida para utilizar na fornalha de uma das unidades industriais, mas não foi aproveitada e se encontra sem finalidade. Para a utilização nas formulações de briquete, o bagaço foi colocado para secar em temperatura ambiente por 5 dias.

Figura 3 - Bagaço de cana antes e após trituração.



Com o intuito de reaproveitar esses resíduos, foram desenvolvidos biocombustíveis sólidos e feito os testes físico-químicos e mecânicos para determinar o seu potencial energético.

4.2 PRODUÇÃO DOS BRIQUETES

Foram preparadas 5 formulações de cada amostra, Tabela 1, três sendo com o material classificados granulometricamente, onde foi peneirado numa malha de 65 mesh,

e duas formulações com a matéria prima sem análise granulométrica ou processamento para diminuir o tamanho das partículas.

Tabela 1 - Detalhamento experimental

	1	2	3	4	5
PAPELÃO	15%	15%	15%	20%	20%
MADEIRA DE PALLET	60%	42,5%	25%	60%	20%
BAGAÇO DE CANA	25%	42,5%	60%	20%	60%

Para a compactação do material, foi confeccionado um molde cilíndrico (Figura 4) com 5,4 cm de diâmetro e 12 cm de altura, e dois discos internos de 5 cm de diâmetro, onde eram colocados na base e no topo de cada molde para impedir que o material transbordasse.

Figura 4 - Molde cilíndrico e discos confeccionados.



Fonte: O Autor (2023).

As formulações foram submetidas a compactação na prensa hidráulica da marca MACRON MPH, localizada no Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFPB, com capacidade para 30 toneladas (Figura 5). Após testes preliminares as condições de compactação ideais encontradas foram de uma força de 5 toneladas por 10 minutos.

Figura 5 - Prensa hidráulica



Fonte: O Autor (2023)

4.3 AVALIAÇÃO DOS BRIQUETES

Após a produção dos briquetes as primeiras medidas foram para o teste de expansividade do material, porém os briquetes ficaram secando à temperatura ambiente por 8 dias. Todos os testes foram realizados em laboratórios do Centro de Tecnologia (CT) e do Centro de Energias Renováveis (CEAR) na Universidade Federal da Paraíba. As análises imediatas só foram iniciadas após o rompimento de cada formulação de briquete no teste de resistência à compressão.

Com exceção do teste de resistência à compressão, todas as medidas foram realizadas em triplicata.

4.3.1 Densidade

Para determinar a medida de densidade, a massa de cada formulação foi medida em balança de precisão. O volume foi calculado através método estereométrico por imersão que leva em consideração o princípio de Arquimedes. Para não ocorrer absorção de água pelo briquete, o material foi envolto em um filme PVC para evitar o contato direto com a água, conforme Figura 6.

Figura 6 - Método estereométrico para determinação de densidade



Fonte: O Autor (2023).

4.3.2 Análises mecânicas

Teste de expansividade

Após a compactação, os briquetes foi avaliado a estabilidade dimensional em intervalos determinados de 2, 4, 8, 12, 24, 48 e 72 horas para acompanhar a expansão longitudinal dos briquetes.

Para a realização das análises, foram mensurados os diâmetros dos briquetes, superior, inferior e do centro dos corpos-de-prova e altura de cada briquete, realizadas com paquímetro manual com precisão de 0,05 mm.

Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado no Laboratório de Solidificação Rápida (LSRAP) na UFPB, a partir do uso Máquina Universal de Ensaio da marca SHIMADZU (Figura 7), onde foi aplicada uma célula de carga na parte superior de um dos hemisférios do briquete até a sua ruptura. Para a determinação da tensão máxima suportada por cada formulação foi considerado a adaptação da norma ABNT NBR 7222:

Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.

Figura 7 - Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: O Autor (2023).

A carga deve ser aplicada continuamente e com crescimento constante da tensão de tração a uma velocidade de $0,05 \pm 0,02$ mm/s até a ruptura do briquete. Após o rompimento de cada corpo de prova, os materiais foram passados em um triturador e seguiram para as análises imediatas.

4.3.3 Análise Imediata

Umidade

A determinação do teor de umidade, foi utilizado a balança de umidade (Moisture Analyzer, MF-50) presente no Laboratório de Materiais e Química Ambiental (LabMAQ) no Centro de Energias Renováveis da UFPB, na qual se pesou um grama de cada amostra que foi secada até estabilizar, a uma temperatura de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. (Figura 8).

Figura 8 - Ensaio para determinar teor de umidade.



Fonte: O Autor (2023).

Cinzas

Para determinação do teor de cinzas de cada briquete foi realizada uma adaptação da Norma ASTM E1755 – Cinzas em biomassa. O teste consiste em: 1 g de cada amostra foi seca na balança de umidade. Estas foram colocadas em cadinhos e levadas para mufla, onde se aqueceu até 250 °C com taxa de 10 °C/min e as amostras foram deixadas por 30 minutos, após isso, ainda na mufla, aqueceu-se até 575 °C com taxa de 10 °C/min e deixando por uma hora e meia.

No fim do processo, os cadinhos foram colocados em um dissecador e foram pesados após estabilizar temperatura.

$$m_{\text{cinzas}} = m_{\text{amostra}} - m_{\text{final}} \quad \text{Equação 2.}$$

$$CZ (\%) = \frac{m_{\text{cinzas}}}{m_{\text{amostra}}} \quad \text{Equação 3.}$$

Onde: m_{amostra} é a massa medida inicialmente;

m_{final} é a massa após a queima na mufla.

Materiais Voláteis

A análise de materiais voláteis foi através da Norma ASTM E872. Inicialmente foi pesado um grama, cada das amostras foram reservadas em cadinhos tampados, e levadas separadamente a mufla aquecida até 950 °C. A análise foi realizada em um cadinho por vez, no qual este era colocado na extremidade da porta aberta da mufla por 2 minutos e em seguida, dentro da mufla, por 5 minutos, com a porta fechada.

Após este processo, o cadinho analisado foi colocado em um tijolo e depois dentro do dissecador, e ao atingir temperatura ambiente foram pesados e calculados seguindo a Equação 5.

$$m_{\text{residual}} = m_{\text{amostra}} - m_{\text{final}} \quad \text{Equação 4.}$$

$$MV (\%) = \frac{m_{\text{residual}}}{m_{\text{amostra}}} \quad \text{Equação 5.}$$

Onde: m_{amostra} é a massa medida inicialmente;

m_{final} é a massa após a queima na mufla.

Carbono Fixo

O teor de carbono fixo foi determinado de forma indireta, pela diferença, através da equação:

$$\text{Carbono Fixo (\%)} = 100 - [MV + CZ] \quad \text{Equação 6.}$$

Onde: MV é a porcentagem de materiais voláteis

CZ é a porcentagem de cinzas.

4.3.4 Poder Calorífico

Para esta análise usou-se uma bomba calorimétrica de marca IKA, modelo C-200, Figura 9, realizadas no LabMaQ da UFPB, se considerou a norma ASTM D5468 e foram analisadas as 5 formulações de briquetes. Cada amostra foi inserida em um sistema

calorimétrico, no qual a biomassa foi queimada em um ambiente fechado, na presença de oxigênio e mergulhada em uma massa de água de temperatura monitorada.

Figura 9 - Calorímetro IKA C-200



Fonte: O Autor (2023).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 PRODUÇÃO DOS BRIQUETES

As biomassas passaram pelo processo de compactação na prensa hidráulica, foram desmoldadas logo em seguida e levadas para secar a temperatura de aproximadamente 25 °C, no Laboratório de Bioengenharia do Centro de Tecnologia, por 8 dias para estabilização de umidade.

Figura 10 - Briquetes produzidos correspondendo a cada formulação.



As formulações 1, 2 e 3 tiveram uma aderência melhor, mesmo tendo uma menor quantidade de aglutinante (mistura de papelão triturado com água), devido ao tamanho das partículas de cada amostra, visto que os 3 primeiros briquetes foram feitos com a matéria prima triturada.

O aglutinante mais utilizado na produção de biocombustível sólido é o amido de milho industrial não refinado (ROUSSET et al., 2011). Mas existem outros tipos de ligantes como resina sintética, breu, lignina, cola de tanino, melaço, alcatrão vegetal e

bagaço de cana-de-açúcar (PEREIRA et al., 2009; MARTINS, 2016). A escolha do ligante deve ser considerada caso a matéria-prima afete algumas características do briquete como: Poder calorífico e Teor de cinzas.

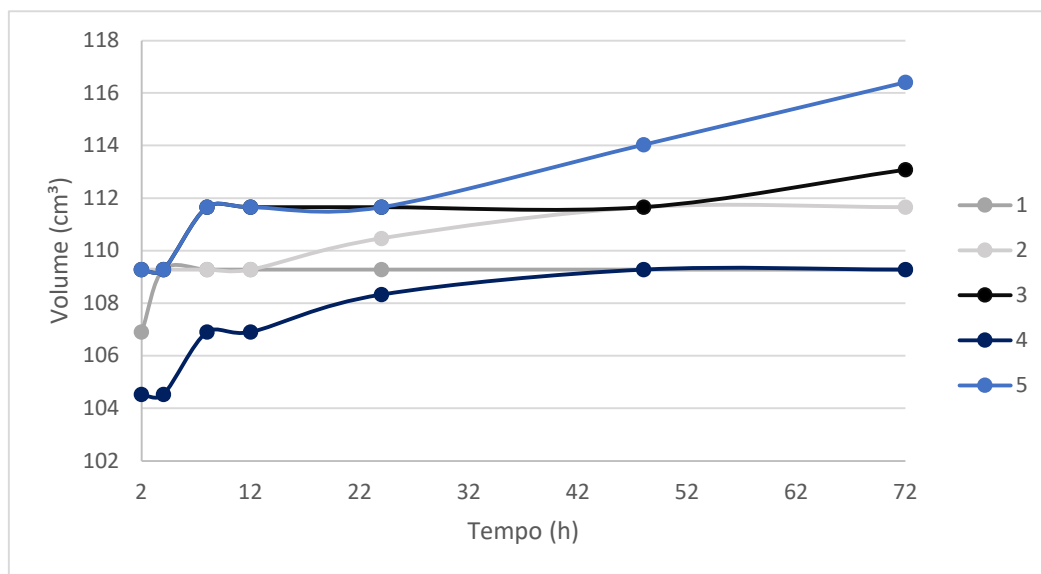
Monte (2023) mostra que briquetes compactados com papel triturado utilizados como ligante tem aderência melhor das partículas compactadas em relação ao amido extraído da mandioca.

5.2 ANÁLISES MECÂNICAS

5.2.1 Teste de expansão

Os resultados obtidos para o teste de expansão volumétrica podem ser observados na Figura 11. É possível perceber uma estabilidade dimensional, nas formulações de briquete 1 e 2, após 24 e 48 horas, respectivamente.

Figura 11– Valores correspondentes a expansividade dos briquetes produzidos.



Com exceção do comportamento do Briquete 1, todas as formulações variaram após as 24 horas que procedem a compactação, sendo assim a formulação 1 apresenta o melhor resultado, se levado em consideração o armazenamento posterior a briquetagem.

As formulações 4 e 5 foram as que mais apresentaram interferência da expansividade ao longo do tempo, em especial o briquete 5 que não atingiu estabilidade volumétrica em nenhuma análise, inferindo assim que a formulação 5 não é a ideal para

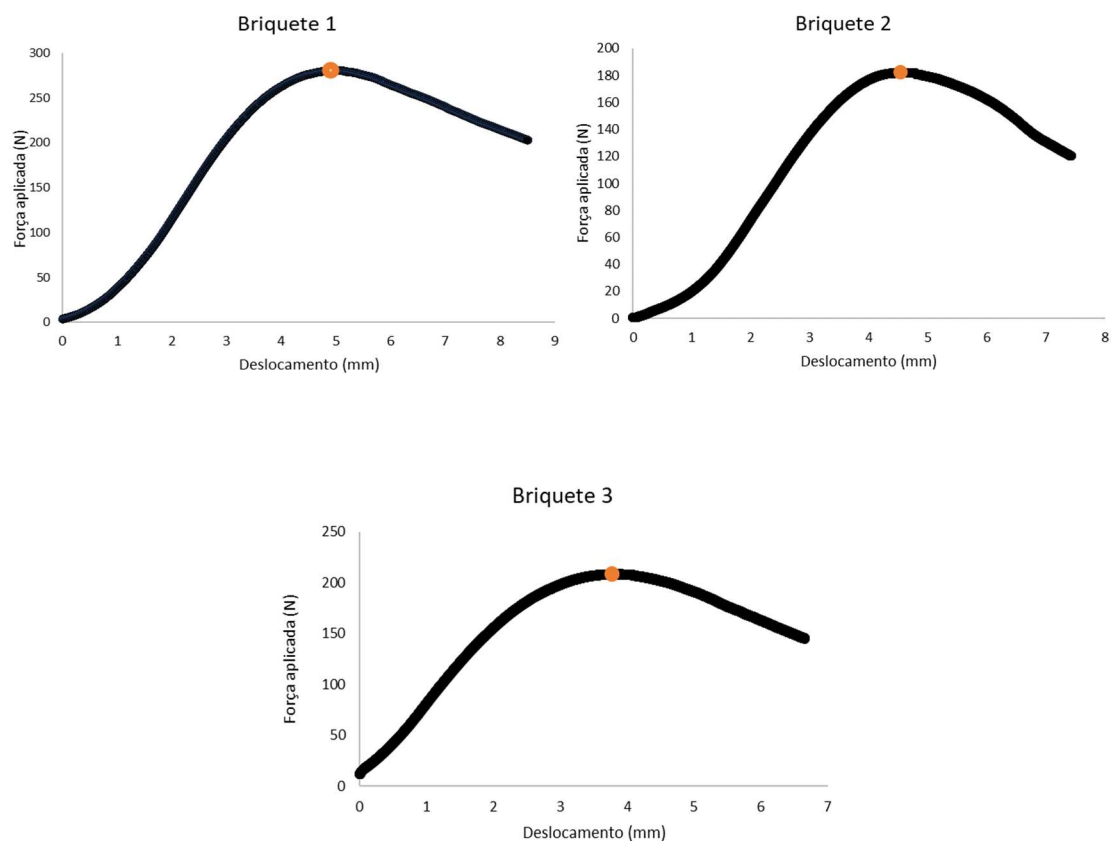
resistência mecânica, torna-se necessário a adição de mais aglutinante e maior força de compactação.

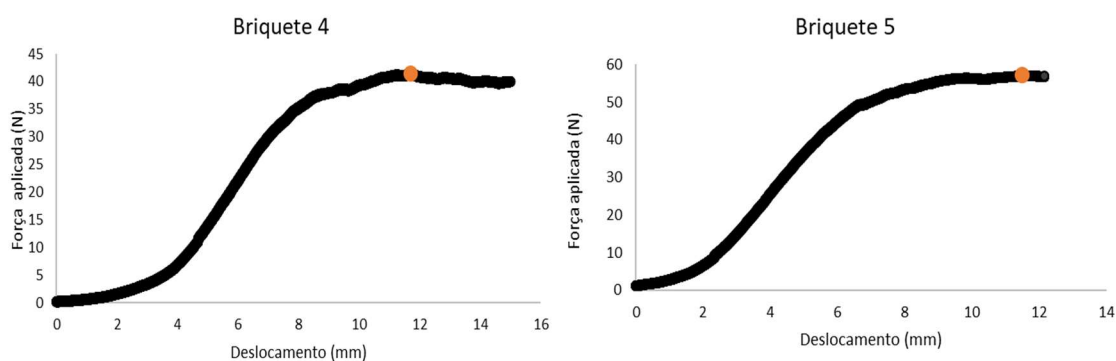
Segundo Magalhães, Silva, Castro (2019) e Alves et al. (2022), a variação volumétrica pode ser ocasionada por diversos fatores, como pela higroscopicidade das biomassas influenciando na resistência mecânica, pelo relaxamento natural inerente às suas fibras ou por uma menor adesão entre as partículas compactadas.

5.2.2 Resistência à compressão

Os gráficos abaixo representam o comportamento de cada briquete em relação força aplicada e o deslocamento sofrido durante seu rompimento. O ponto máximo destacado em cada gráfico indica a carga máxima suportada por cada briquete.

Figura 12 - Ensaio de resistência à compressão.





Para os briquetes 1, 2 e 3, classificados granulometricamente, temos cargas de ruptura superiores às que encontradas nas formulações 4 e 5. O briquete que apresentou melhor desempenho na análise de resistência a compressão foi o da formulação 1, onde tivemos uma aplicação de 280,36 N para um deslocamento sofrido de 4,91 mm. (Tabela 2).

Tabela 2 - Teste de resistência à compressão dos briquetes.

Briquete	Carga de ruptura (N)	Tensão máxima (N/mm ²)	Deformação (%)
1	280,36	0,118	10,22
2	182,13	0,077	9,88
3	208,08	0,088	7,71
4	41,35	0,017	26,06
5	51,11	0,024	23,98

As formulações 2 e 3 tiveram rompimento em cargas de ruptura numa faixa muito próxima e suas respectivas porcentagem de deformação são 9,88% e 7,71%. Como as três primeiras formulações de briquete foram produzidas com materiais com partículas menores, esses possuíram os melhores comportamentos nas análises mecânicas. Diferentemente das formulações 4 e 5 que romperam facilmente e tiveram uma porcentagem de deformação muito superior, não sendo indicadas como as melhores propostas, levando em consideração armazenamento e transporte como parâmetros importantes, para a produção de biocombustível sólido.

Motter (1979) e Cavalcanti (2020) indicam que os valores esperados para fins industriais, referentes à resistência a compressão ou tensão máxima, para briquetes deve ser superior ou igual a 6,86 N/mm². Como todos os resultados de tensão máxima foram inferiores, sugere um aumento da proporção de ligante em cada formulação ou um aumento da pressão de compactação.

5.3. DENSIDADE APARENTE

A Tabela 3 apresenta os resultados para ensaio de densidade feito pelo princípio de Arquimedes.

Tabela 3 - Densidade aparente

Briquete	Densidade (g/cm ³)
1	0,359
2	0,354
3	0,348
4	0,264
5	0,244

Para os valores de densidade aparente, os melhores resultados foram os observados nas formulações 1, 2 e 3, que obtiveram a maior densidade, e a relação é quanto maior o valor da densidade do briquete, maior a razão energia/volume. Somado a isso, produtos de alta densidade são desejáveis em termos de transporte, armazenamento e manuseio (EMBRAPA, 2012).

Os resultados encontrados são justificados por Cavalcanti (2020) os tamanhos das partículas influenciam na densidade, então como as três formulações tem menores partículas, possuem maiores valores de densidade.

5.4 ANÁLISE IMEDIATA

5.4.1 Teor de Umidade

A Tabela 4 apresenta os valores obtidos na análise para a determinação do teor de umidade das formulações de briquetes produzidas.

Tabela 4 - Caracterização do teor de umidades dos briquetes

Briquete	Umidade (%)
1	9,97
2	9,23
3	8,83
4	8,90
5	8,98

A literatura sugere um teor de umidade de 15-20% para a queima, visto que os valores superiores reduzem o valor do calor de combustão, a temperatura da câmara de queima e a temperatura dos gases de escape (GONÇALVES et al., 2009; EMBRAPA, 2012).

Valores de umidade acima de 15% podem levar à quebra do briquete ou à degradação biológica durante o transporte e armazenamento. Por outro lado, baixo teor de água (<5%) pode resultar em perda de material, bem como a sua quebra, geração de finos durante o transporte e armazenamento (EMBRAPA, 2012).

Os valores da Tabela 4 para umidade estão dentro da faixa de 9,97 a 8,83%, abaixo da faixa limite sugerida por Gonçalves et al. (2009), mas dentro da faixa sugerida por Dias et al. (2012).

5.4.2 Teor de Cinzas

Tabela 5 - Valores das cinzas

Briquete	Cinzas (%)
1	4,3
2	5,8
3	7,4
4	10,5
5	13,3

Para as formulações de briquete 1, 2 e 3 foram encontrados os menores valores para teor de cinzas na faixa de 4,3 a 7,4%, que está fora o valor limite sugerido por Carvalho (2010), que diz que um bom combustível sólido deve ter um conteúdo de cinzas inferior a 3%.

A literatura relata que o ideal após a queima dos briquetes é que haja a menor quantidade de cinzas, que representa o acúmulo de resíduo após a queima e pode diminuir o poder calorífico.

A quantidade de cinzas representa parte incombustível do briquete e visando a utilização a nível industrial, ressaltando que quanto menor este teor, menos inconvenientes em relação a incrustações e corrosões nos equipamentos combustivos ocorrerá (CAVALCANTI, 2020).

Tabela 6 - Valores de cinzas da literatura

AUTOR	Biomassa	Cinzas (%)
Pesquisa	1	4,3
	2	5,8
	3	7,4
	4	10,5
	5	13,3
Marchese et al. (2018)	Serragem de madeira	9,8
Dias Júnior (2013)	Resíduos de bambu	2,6
Macedo et al. (2014)	Bagaço de cana	11,0
Cavalcanti (2020)	Pinus	11,49
Figueiredo (2018)	Moringa + papel	8,91
Magalhães (2018)	Fino de carvão + papel	8,13
Cielinski (2014)	Bagaço de cana	18,8
Santos et al. (2017)	Palha de cana de açúcar	4,13

Diante dos valores de cinza expostos na Tabela 6, pode-se perceber que os valores encontrados para as formulações estão dentro do rol da literatura, Cielinski (2014) encontrou valores de cinzas superiores aos de Macedo et al. (2014), porém o briquete da formulação 5, com 60% de bagaço de cana de açúcar encontrou um valor intermediário entre os autores.

Melo et al. (2018) e Cavalcanti (2020) mencionam o reaproveitamento das cinzas para produção de cal, também para enriquecimento nutricional do solo e substituição em

produtos da construção civil, dependendo da composição elementar das cinzas geradas após a queima dos briquetes.

5.4.3 Teor de Voláteis

Tabela 7 - Teor de voláteis

Briquete	Materiais Voláteis (%)
1	80,6
2	80,5
3	81,9
4	84,4
5	85,2

A quantidade de materiais voláteis se relaciona diretamente com a queima no processo de carbonização, quanto maior o teor de materiais voláteis, mais rápida é a queima (OLIVEIRA et al., 2017). Quanto maior o teor de voláteis, maior a ignição do material, o que implica dizer que os baixos teores de materiais voláteis encontrados indicam que os briquetes necessitam de um tempo maior de ignição (MAGALHÃES, 2018).

São esperados valores elevados para o teor de volátil quando o intuito de aplicação da biomassa é termoquímico, que é o caso das 5 formulações de briquetes que obtiveram resultados entre 80,5 e 85,2%, ou seja, quanto maior o valor de materiais voláteis, mais reativo é o combustível sólido.

Macedo et al. (2014) encontrou valores de 75,00% para briquetes feitos de bagaço de cana de açúcar e Marchese et al (2018) obteve 76,20% e 77,50% para formulações de serragem de madeira e cana de açúcar, respectivamente. Na literatura, ao trabalhar com a combustão direta de biomassa, os valores na Tabela 7 para teor de voláteis são coerentes, significando uma boa reatividade em relação à ignição para todas as formulações do biocombustível produzido.

5.4.4 Carbono Fixo

A Tabela 8 apresenta os valores de carbono fixo calculado para cada formulação.

Tabela 8 - Teor de Carbono Fixo

Briquete	Carbono Fixo (%)
1	15,2
2	13,7
3	10,7
4	5,1
5	1,5

O teor de carbono fixo representa o resíduo inorgânico da massa após a liberação dos materiais voláteis, retirando os teores de cinzas e de umidade. Os briquetes com elevados valores de carbono fixo e baixa umidade são os ideais, em virtude do melhor desempenho com a produção de calor por unidade de massa (FIGUEIREDO, 2018).

As formulações que apresentaram maior e menor teor de carbono fixo foram a formulação 1 e a 5 respectivamente e ao analisar juntamente com os parâmetros de materiais voláteis, são inversamente proporcionais.

Biocombustíveis sólidos com alto teor de carbono fixo informa que tem potencial de queima lento, ou seja, levam mais tempo para sua queima total, como é o caso do carvão vegetal. O teor de carbono fixo é um parâmetro importante para indicar o rendimento do combustível.

5.5 CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA

5.5.1 Poder Calorífico

O PCS é a quantidade de energia liberada durante a transferência de calor, assim quanto mais energia é liberada, ou seja, maior o PCS, melhor a eficiência do processo

(VIEIRA, 2012). A Tabela 9 apresenta os resultados de Poder Calorífico Superior encontrados para cada formulação de briquete produzida.

Tabela 9 - Poder Calorífico Superior de cada formulação

Briquete	PCS (MJ/kg)	PCS (kcal/kg)
1	19,94	4.761,87
2	17,56	4.195,33
3	18,62	4.447,79
4	19,14	4.572,70
5	18,64	4.451,37

No presente trabalho os poderes caloríficos dos briquetes (kcal/kg) se apresentaram em patamares que permitem vinculá-los à inúmeras aplicações. A indústria de revestimentos utiliza um combustível sólido, cavaco de eucalipto, na fôrnlha que tem PCS em média de 3.852,2 kcal/kg para a geração de vapor de água, esse valor para um teor de umidade de 10%.

FURTADO, VALIN, BRAND e BELLOTE (2012) relatam que briquetes feitos de cavaco de Pinus tem PCS na média de 5.043,33 kcal/kg e briquete produzido a partir de serragem de Pinus tem 4.938,00 kcal/kg. Infere que os resultados da Tabela 9 são bastante próximos dos encontrados na literatura.

Cavalcanti (2020) produziu briquetes a partir de resíduos de podas de árvores da cidade de João Pessoa com Algaroba, Ficus e Castanhola e encontrou PCS de, respectivamente, 18,58 MJ/kg, 15,79 MJ/kg e 15,32 MJ/kg. Como observado, em comparação com esses valores, os resultados de caracterização energética da presente pesquisa foram superiores.

SILVA e MORAIS (2008) produziu briquete a partir de bagaço de cana, com 10% de umidade, e obteve 16,68 MJ/kg de PCS para o biocombustível produzido. MARCHESI et al. (2018) encontrou PCS 16,80 MJ/kg para briquetes produzidos a partir de serragem de madeira.

6. CONCLUSÃO

Todos os testes realizados para cada formulação de briquete produzida visaram determinar a viabilidade do processamento energético e seu aproveitamento para geração de calor em processos industriais.

Em relação a resistência à compressão pode-se analisar que os briquetes possuem baixos valores, não sendo recomendadas para usos industriais e sim para aplicação de fins comerciais e domésticos em processos combustivos. Para a necessidade de aplicação industrial é preciso aumentar a proporção de ligante ou estudar a utilização de um novo agente aglutinante.

Os valores de umidade de todas as 5 formulações de briquete estão dentro da literatura encontrada para processos de combustão direta de biomassa.

Os teores de cinzas encontrados estão de acordo com a literatura, alguns inclusive menores que os valores comparados. Quanto aos valores de materiais voláteis obtidos, estes se encontram próximos dos valores encontrados na literatura, quanto mais alta a proporção de materiais voláteis, maior a reatividade da combustão, assim como os valores de carbono fixo.

A partir das formulações propostas para a produção de briquetes no presente trabalho, observou-se que entre as análises, a formulação 1 obteve os melhores resultados levando em consideração as análises mecânicas e as análises imediatas e o seu poder calorífico de 19,94 MJ/kg apresenta grande potencial de utilização em processos térmicos de conversão de energia.

Recomenda-se que seja utilizado outro tipo de ligante para produzir o bicomcombustível sólido a fim de aumentar a tensão máxima suportada e poder ter uso industrial.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Miqueias Barbosa Formiga et al. **Produção e caracterização de biocombustível sólido a partir de resíduos orgânicos sem tratamento térmico**. Brazilian Journal of Development, v. 8, n. 2, p. 8925-8945, 2022.

ANDRADE, L.F.F.; BIGATON, R.P. **Briquetagem de bagaço de cana-de-açúcar**. 2016. 40p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Agrícola) -Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados - MS.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Banco de Informações de Geração**. (2012). Disponível em: www.aneel.gov.br. Acesso em Maio de 2023.

CAVALCANTI, I. L. R. **PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DE BRIQUETES A PARTIR DO RESÍDUO DA PODA DE ESPÉCIES ARBÓREAS DE JOÃO PESSOA**. Dissertação (Mestrado). Engenharia de Energias Renováveis. Universidade Federal da Paraíba -João Pessoa, 2020.

CARDOSO, Bruno Monteiro. **Uso da Biomassa como Alternativa Energética**– Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2012. 94 p.: il.; Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Elétrica, 2012.

CARVALHO JÚNIOR, R.M. **Desenvolvimento e análise energética do processo de obtenção do biodiesel de microalga por metanólise in situ**. Dissertação (Mestrado) UFPR, Curitiba – PR, 2010.

Carvalho Jr, João Andrade e McQuay, Mardson. **Princípios de Combustão Aplicada**. Ed. UFSc, 176p., 2007.

DA SILVA, Marcelo Bacci; DOS SANTOS MORAIS, Anderson. **Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação**. XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro, 2008.

DE SOUZA, G.; Pandolfi, M.; Coimbra, C. **O MERCADO POTENCIAL DO USO DE BRIQUETES NO BRASIL**. SIMTEC - Simpósio de Tecnologia da Fatec Taquaritinga, v. 4, n. 1, p. 10,14 de maio de 2018.

DIAS, J. **Utilização da biomassa: avaliação de resíduos e utilização de pellets em caldeiras domésticas.** 2002. Dissertação (Mestrado) – Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa.

DIAS, J. M. C. de S.; SANTOS, D. T. dos; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais.** 2012. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agroenergia/busca-de-publicacoes/-/publicacao/952626/producao-de-briquetes-e-peletes-a-partir-de-residuos-agricolas-agroindustriais-e-florestais>. Acesso em Maio de 2023.

DIAS JÚNIOR, A. F. **CARACTERIZAÇÃO DE BRIQUETES PRODUZIDOS COM RESÍDUOS AGROFLORESTAIS.** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, RJ.

DO MONTE, Judson Rangell Rodrigues; DE SOUZA CARDOSO, Francinaldo; DO MONTE, Leiliane Trindade de Almeida. **APROVEITAMENTO DO EPICARPO DE BABAÇU EXTRAÍDOS EM CAXIAS-MA PARA A PRODUÇÃO DE BRIQUETES.** Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo, v. 8, n. 3, p. 217-244, 2023.

EMBRAPA. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais** / José Manuel Cabral de Sousa Dias, et al. – Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2012. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/952626/1/DOC13.pdf>. Acesso em Maio de 2023.

Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030.** Rio de Janeiro: EPE, 2007. 408p. : 199 il ; 23 cm. ISBN: 978-85-60025-02-2.

FIGUEIREDO, E. R. **Preparação e caracterização de briquetes obtidos da vagem da moringa e do papel celulose.** 2018. 36 p. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Pombal - PB. 2018.

FURTADO, T. S.; VALIN, M.; BRAND, M. A.; BELLOTE, A. F. J. **Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal.** Pesquisa Florestal Brasileira, [S. l.], v. 30, n. 62, p. 101, 2010. Disponível em:

<https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/101>. Acesso em: Maio de 2023.

GENTIL, L. V. B. **Tecnologia e economia do briquete de madeira**. 2008. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília.

GONÇALVES, J. E.; SARTORI, M. M. P.; LEÃO, A. L. **Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de Eucalyptus grandis**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, n.5, p.657–661, 2009.

MACEDO, L. A. **Influência da composição da biomassa no rendimento em condensáveis do processo de torrefação**. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais - Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

MAGALHÃES, A. S. **BRIQUETES DE RESÍDUOS URBANOS: UMA ALTERNATIVA ENERGÉTICA PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO**. Monografia (Graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Florestal, 2018.

MAGALHÃES, A.S; SILVA, T.M.M. da; CASTRO, V.G de. **Produção e caracterização de briquetes a partir de resíduos sólidos e prensagem semi-manual**. Adv. For. Sci., Cuiabá, v.6, n.3, p.705-710, 2019.

MARCHESE, L.; SOUZA, F. B. de; SOARES, D.; DOMENICO, M. D. **Avaliação do potencial combustível de biomassas residuais por termogravimetria**. 6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, 2018.

MELO, M. C. S.; NEVES, G. A.; MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. C.; NÓBREGA, A. C. V.; MARINHO, E. P. **Cal produzida a partir de cinza de biomassa rica em cálcio**. Cerâmica 64 , [S. l.], 2018.

MOTTER, C. **Aproveitamento de finos de carvão vegetal para produção de briquetes de uso siderúrgico**. 22º Congresso Anual da ABM. Vitória, ES, julho de 1979.

NASCIMENTO, Leandro Miranda. **Avaliação da aplicação de resíduo agroindustrial como agente aglomerante na fabricação de briquetes de pó de despoeiramento**

secundário do convertedor LD. 2022. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará. Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Fortaleza, 2022.

Nakashima, G. T., Martins, M. P., Silva, D. A. da, Chrisostomo, W., & Yamaji, F. M. (2014). **APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS VEGETAIS PARA A PRODUÇÃO DE BRIQUETES.** Brazilian Journal of Environmental Sciences (RBCIAMB), (34), 22–29.

OLIVEIRA, C. M. de. **Wood pellets Brasil.** Curitiba: Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa, 2012. Disponível em: http://media.wix.com/ugd//09c803_24ea825b8184644b715809e41b68642c.pdf. Acesso em: Maio de 2023.

OLIVEIRA, L. H.; BARBOSA, P. V. G.; LIMA, P. A. F.; YAMAJI, F. M.; SETTE JÚNIOR, **Aproveitamento de resíduos madeireiros de Pinus sp. com diferentes granulometrias para a produção de briquetes.** Revista de Ciências Agrárias, v. 40, n. 3, p. 683-691, 2017.

PEREIRA, F.A.; CARNEIRO, A.C.O.; VITAL, B.R.; DELLA LUCIA, R.M.; PATRICIO 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.

Potencial de produção de bioenergia no mundo. Disponível em: <https://www.canalbioenergia.com.br/brasil-e-o-pais-com-maior-potencial-de-producao-de-bioenergia-no-mundo/>. Acesso em Maio de 2023.

PROTÁSIO, T. de P.; ALVES, I. C. N.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; BALIZA, A. E. R. **Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos.** Pesquisa Florestal Brasileira, [S. l.], v. 31, n. 68, p. 273, 2011. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.68.273. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/288>. Acesso em: Maio de 2023.

ROUSSET, P.; PIRES, A.C.; SABLowski, A.; RODRIGUES, T. **LCA of eucalyptus wood charcoal briquettes.** Journal of Cleaner Production , v.19, p.1647-1653, 2011.

TAVARES, S. R. de L., & Santos, T. E. dos. (2013). **USO DE DIFERENTES FONTES DE BIOMASSA VEGETAL PARA A PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS**. *HOLOS*, 5, 19–27.

United Nations Environment Programme – UNEP. **Production Gap Report (2020)** – Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/production-gap-2020>. Acessado em Maio de 2023.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Energia na Agricultura. Cascavel, PR. 2012.