

Aproveitamento energético de cascas de pequi na produção de briquetes

Energy utilization of pequi peels in briquette production

Aprovechamiento energético de cáscaras de pequi en la producción de briquetas

DOI: 10.54033/cadpedv21n12-107

Originals received: 10/11/2024

Acceptance for publication: 11/01/2024

Bárbara Lôpo de Lima

Graduada em Engenharia de Energia
Instituição: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
Endereço: Montes Claros, Minas Gerais, Brasil
E-mail: barbaralopolima@hotmail.com

Fernando Colen

Doutor em Agronomia
Instituição: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
Endereço: Montes Claros, Minas Gerais, Brasil
E-mail: fernandocolenufmg@gmail.com

Marina Donária Chaves Arantes

Doutora em Ciência e Tecnologia da Madeira
Instituição: Universidade Federal de São João Del-Rei (UFSJ)
Endereço: Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil
E-mail: mdonariac@ufsj.edu.br

Talita Baldin

Doutora em Engenharia Florestal
Instituição: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
Endereço: Montes Claros, Minas Gerais, Brasil
E-mail: talita.baldin@hotmail.com

Edy Eime Pereira Baraúna

Doutor em Ciência e Tecnologia da Madeira
Instituição: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
Endereço: Montes Claros, Minas Gerais, Brasil
E-mail: ebarauna@ica.ufmg.br

Luiz Arnaldo Fernandes

Doutor em Ciência do Solo

Instituição: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Endereço: Montes Claros, Minas Gerais, Brasil

E-mail: larnaldo@ufmg.br

Lorena dos Santos Almeida Silva

Graduada em Engenharia Florestal

Instituição: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Endereço: Montes Claros, Minas Gerais, Brasil

E-mail: lorealmeidasilva@gmail.com

RESUMO

A utilização da biomassa lignocelulósica proveniente de resíduos domésticos tem se tornado uma escolha favorável na produção de bioenergia. No estado de Minas Gerais, a cadeia produtiva do pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) desempenha importante papel econômico e social. No entanto, a comercialização em grande escala desse produto pode gerar resíduos que, se não forem adequadamente gerenciados, representam um desafio ambiental significativo. Neste trabalho, foi avaliado o potencial energético da biomassa da casca de pequi para confecção de briquetes em diferentes proporções de umidade. Foram avaliadas propriedades físicas, mecânicas e térmicas da biomassa in natura em estudo. A caracterização imediata da biomassa revelou um alto teor de material volátil (74,41%), de carbono fixo (22,69%) e cinzas (2,90%), além de um poder calorífico de 14,23 MJ kg⁻¹, mostrando a eficácia do material para produção de energia. A análise química evidenciou 69,38% de extrativos, 10,27% de lignina e 20,35% de holocelulose. A análise termogravimétrica da casca se mostrou similar com a termo decomposição de biomassas lignocelulósicas. A confecção dos briquetes foi realizada em uma prensa hidráulica em diferentes proporções de umidade (5%, 7,5% e 10%). Os testes de resistência à compressão mostraram que briquetes com menor umidade possuem maior resistência. Os resultados deste estudo sugerem que a densificação da casca de pequi não apenas reduz significativamente o volume dos resíduos, como também resulta em uma diminuição de aproximadamente 90,42% do peso total, facilitando seu manejo e armazenamento, mas também oferece uma solução sustentável para a produção de bioenergia.

Palavras-chave: Bioenergia. Biomassa Lignocelulósica. Densificação. Energia Renovável.

ABSTRACT

The use of lignocellulosic biomass derived from domestic waste has become a favorable choice in bioenergy production. In the state of Minas Gerais, the pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) production chain plays an important economic and social role. However, large-scale commercialization of this product can generate waste that, if not properly managed, poses a significant environmental challenge. In this study, the energy potential of pequi peel biomass was evaluated for the

production of briquettes at different moisture levels. Physical, mechanical, and thermal properties of the raw biomass were analyzed. The immediate characterization of the biomass revealed a high volatile material content (74.41%), fixed carbon (22.69%), and ash (2.90%), as well as a calorific value of 14.23 MJ kg⁻¹, demonstrating the material's effectiveness for energy production. Chemical analysis showed 69.38% extractives, 10.27% lignin, and 20.35% holocellulose. The thermogravimetric analysis of the peel showed a similar thermodecomposition pattern to other lignocellulosic biomasses. The briquettes were made using a hydraulic press at different moisture levels (5%, 7.5%, and 10%). Compression resistance tests indicated that briquettes with lower moisture content had higher strength. The results of this study suggest that the densification of pequi peel not only significantly reduces the volume of waste and leads to a reduction of approximately 90.42% in total weight, facilitating its handling and storage, but also offers a sustainable solution for bioenergy production.

Keywords: Bioenergy. Densification. Lignocellulosic Biomass. Renewable Energy.

RESUMEN

El uso de biomasa lignocelulósica derivada de residuos domésticos se ha convertido en una opción favorable para la producción de bioenergía. En el estado de Minas Gerais, la cadena productiva del pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) desempeña un papel económico y social importante. Sin embargo, la comercialización a gran escala de este producto puede generar residuos que, si no se gestionan adecuadamente, representan un desafío ambiental significativo. En este trabajo, se evaluó el potencial energético de la biomasa de la cáscara de pequi para la fabricación de briquetas en diferentes proporciones de humedad. Se evaluaron las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de la biomasa in natura en estudio. La caracterización inmediata de la biomasa reveló un alto contenido de material volátil (74,41%), carbono fijo (22,69%) y cenizas (2,90%), además de un poder calorífico de 14,23 MJ kg⁻¹, lo que demuestra la eficacia del material para la producción de energía. El análisis químico mostró un 69,38% de extractivos, 10,27% de lignina y 20,35% de holocelulosa. El análisis termogravimétrico de la cáscara mostró un patrón de termodescomposición similar al de otras biomásas lignocelulósicas. La fabricación de las briquetas se realizó en una prensa hidráulica con diferentes proporciones de humedad (5%, 7,5% y 10%). Las pruebas de resistencia a la compresión indicaron que las briquetas con menor contenido de humedad tienen mayor resistencia. Los resultados de este estudio sugieren que la densificación de la cáscara de pequi no solo reduce significativamente el volumen de los residuos y da lugar a una reducción de aproximadamente el 90,42% del peso total, facilitando su manejo y almacenamiento, sino que también ofrece una solución sostenible para la producción de bioenergía.

Palabras clave: Bioenergía. Biomasa Lignocelulósica. Densificación. Energía Renovable.

1 INTRODUÇÃO

As preocupações ambientais globais têm impulsionado esforços voltados à transição para fontes de energia renovável, especialmente em países em desenvolvimento (Shrestha *et al.*, 2022). Dessa forma, a busca por alternativas energéticas renováveis tem ganhado destaque em resposta ao aumento da demanda por fontes alternativas (Marks-Bielska *et al.*, 2020). A utilização da energia proveniente da biomassa emerge como uma possibilidade às fontes não renováveis, visando crescimento econômico, estabilidade no fornecimento elétrico e combate as mudanças climáticas (Wiranarongkorn *et al.*, 2021).

O estado de Minas Gerais, se destaca pela sua longa história de dependência do extrativismo vegetal (Carneiro *et al.*, 2023). O potencial de aproveitamento e exploração comercial dos recursos do Cerrado é vasto e diversificado, incluindo sementes, frutas, látex, óleos e resinas, que têm diversas aplicações, abrangendo desde alimentação e remédios até utensílios e artesanatos (Filizola, 2013). O pequi (*Caryocar brasiliense*), pertencente à família botânica Caryocaraceae, possui diversas utilidades, que vão desde a alimentação humana a produtos medicinais até a fabricação de cosméticos e biodiesel (Gomes *et al.*, 2022). Sua cadeia produtiva desempenha um importante papel econômico e social no extrativismo norte mineiro (Fonseca; Neto; Mendes, 2023). A comercialização se dá de diversas formas, incluindo a fruta in natura, polpa congelada, óleo, licores, doces e cosméticos, atendendo tanto ao mercado local quanto à indústria. No entanto, é importante considerar que a comercialização em grande escala desse produto pode gerar resíduos que, se não forem adequadamente gerenciados, podem representar um desafio ambiental.

Nesse sentido, é fundamental buscar alternativas para aproveitar esses resíduos de forma sustentável. A biomassa residual é uma opção promissora no contexto energético (Scapin *et al.*, 2020), sendo a densificação uma das formas de aproveitamento. Esse processo envolve a reorganização das partículas da matéria-prima, alterando seus tamanhos e formas por meio mecânico, o que promove a interligação entre as partículas, resultando em melhorias na

manipulação, transporte e armazenamento da biomassa (Obi *et al.*, 2023; Mesquita *et al.*, 2024)). Biomassas de diversas origens, como resíduos agrícolas, dejetos animais, produtos florestais e resíduos urbanos, são compactadas em forma de briquetes e pellets. Esses produtos são amplamente recomendados para combustão em países com alta atividade agrícola, podendo ter um impacto significativo no fornecimento de energia, especialmente em comunidades rurais (Obi *et al.*, 2023), (Bot; Tamba; Sosso, 2024).

O objetivo deste estudo é investigar o potencial energético dos resíduos da casca do Pequi, visando sua aplicação como fonte de energia na forma de briquetes. Com base nas preocupações ambientais globais e na crescente demanda por fontes de energia renovável, este estudo busca explorar alternativas sustentáveis para o aproveitamento de resíduos gerados pela comercialização em grande escala do produto, visando a sua valorização, o que pode representar uma oportunidade para impulsionar a transição para fontes renováveis de energia e promover o desenvolvimento sustentável regional. Além disso, empregar técnicas que reduzam o volume dos resíduos gerados é essencial, pois facilita seu armazenamento, transporte e manejo, torna sua utilização mais eficiente. Essa abordagem pode transformar passivos ambientais em ativos econômicos, proporcionando uma nova fonte de renda para as comunidades locais e contribuindo para a sustentabilidade ambiental.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

As cascas de pequi usadas como matéria-prima foram adquiridas em mercados e pontos de venda na cidade de Montes Claros, em Minas Gerais (16°42'56"S; 43°51'58"W; 624m). Foram coletados aproximadamente 135 kg de cascas, que após a triagem para retirada de materiais indesejados, reduziu para aproximadamente 120 kg. A biomassa foi seca em sombra por sete dias e triturada por um desintegrador Cremasco DPC-4, sendo posteriormente peneirada a 5 mm.

A umidade do material foi determinada com base nos procedimentos descritos na norma ASTM D1762 (2021) com estufa a 105 ± 2 °C, assim como os teores de cinzas e de materiais voláteis, enquanto o teor de carbono fixo foi obtido a partir da diferença ($100\% - \text{Teor de materiais voláteis} - \text{Teor de cinzas}$). O poder calorífico da biomassa foi determinado por aferição em bomba calorimétrica IKA C5003 Control, de acordo com a NBR 8633 (1984). O teor de extrativo em álcool tolueno foi determinado em conformidade com os métodos da norma T204 cm-97 (1997), ao passo que a análise do teor de lignina Klason foi realizada segundo a norma T222 om-98 (1997), ambas da Associação Técnica da Indústria de Papel e Celulose. A Figura 1 evidencia o resumo gráfico do estudo.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

2.2 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DA BIOMASSA

Os estudos termogravimétricos foram realizados usando um analisador térmico DTG-60H. Aproximadamente 5g da biomassa foi colocada em um cadinho de alumina e aquecida de 28 a 900 °C, em diferentes razões de aquecimento de 5, 10, 15, 20 °C min⁻¹. A análise foi realizada em duplicata para cada razão de aquecimento. O nitrogênio foi usado como um gás inerte com uma vazão de 50 mL min⁻¹.

2.3 PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DOS BRIQUETES

Os briquetes foram produzidos em três diferentes condições. O primeiro tratamento (T1) utilizou 500 g de biomassa in natura à qual foram adicionados 25 ml de água, resultando em 5% de umidade em relação ao peso. O segundo tratamento (T2) aplicou 37,5 ml de água, correspondendo a 7,5% de umidade, enquanto o terceiro tratamento (T3) utilizou 50 ml de água, totalizando 10% de umidade. Esses valores representam a umidade adicionada antes da compactação para a confecção dos briquetes. Para o processo de briquetagem, foi usada uma prensa manual, com tubos de 7,5 cm de diâmetro, e que utiliza um macaco hidráulico para efetuar a pressão necessária para a compactação das partículas (Figura 2). Para a produção de cada briquete, foi usada aproximadamente 500 g de matéria-prima e um tempo de residência de cinco minutos. Após a briquetagem, os briquetes foram expostos à sombra para que a umidade evaporasse e atingissem peso constante, o que aconteceu cerca de 7 dias após sua fabricação. Depois desse período, a umidade dos briquetes variou entre 8% e 8,7%.

Figura 2. Equipamento confeccionado para a produção dos briquetes.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

A densidade aparente dos briquetes foi calculada dividindo a massa, medida em uma balança analítica, pelo volume, que foi obtido a partir dos diâmetros dos briquetes medidos com um paquímetro digital. A densidade

energética de cada tratamento foi determinada com base no poder calorífico da biomassa multiplicada pela densidade aparente. As propriedades mecânicas dos briquetes foram avaliadas por ensaios da norma NBR 7190 (1997), que permitiram determinar a compressão paralela e a força máxima. Esses ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios Emic DL10000, com um sistema de aquisição de dados automatizado.

2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Os valores referentes às propriedades mecânicas dos briquetes foram tabulados e apresentados como médias de três repetições. Para a densidade aparente e demais variáveis, os dados serão apresentados como a média calculada a partir de três medições realizadas em triplicata, proporcionando uma representação precisa da variação entre as amostras, com exceção da análise termogravimétrica, que foi realizada em duplicata. A normalidade dos resíduos foi verificada preliminarmente (teste de Shapiro-Wilk a 5% de probabilidade) para análise de variância (ANOVA), que foi realizada em delineamento inteiramente casualizado para avaliar o grau de significância das variáveis analisadas. Quando os resultados foram considerados significativos, os dados foram submetidos ao teste Tukey a 5% de probabilidade para a comparação de médias entre os diferentes tratamentos, assegurando uma análise confiável.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA BIOMASSA

A análise imediata da casca do pequi (Tabela 1) demonstra que o resíduo possui uma excelente capacidade de ignição, evidenciada pelo seu alto teor de material volátil e baixo teor de cinzas. Esses fatores não apenas facilitam a combustão, mas também reduzem os impactos ambientais relacionados aos resíduos pós-combustão e diminuem os custos de manutenção e limpeza dos equipamentos (Mishra; Mohanty, 2018).

Tabela 1. Análise imediata da casca do pequi.

	TU	VM	Ash	FC	TE	TL	TH	PCS
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(MJ kg⁻¹)
Biomassa	84,35	74,41	2,90	22,69	69,38	10,27	20,35	14,23

TU: teor de umidade; VM: teor de matéria volátil; Ash: teor de cinzas; FC: teor de carbono fixo; TE: teor de extrativos; TL: teor de lignina Klason; TH: teor de holocelulose; PCS: poder calorífico superior.

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

O conhecimento sobre a composição de uma biomassa é importante para otimizar seu uso como fonte de energia. Neste estudo, o valor de 84,35% para a umidade, demonstra que a biomassa de pequi, quando seca e compactada, pode concentrar uma grande quantidade de matéria por área, tornando-a uma fonte eficiente para aproveitamento energético. Estudos relatam que a maioria das biomassas verdes possuem cerca de 50% do seu peso em umidade, demonstrando que a biomassa de pequi possui uma umidade consideravelmente maior (Asadullah *et al.*, 2007).

No que se refere à análise imediata, os resultados encontrados nesse estudo se assemelham aos da literatura. Estudo sobre a pirólise da casca e semente de pequi, com foco em cinética, termodinâmica e caracterização de produtos voláteis, evidenciou 71,56%, 2,38% e 26,06% para os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, respectivamente (Mumbach *et al.*, 2024).

Quanto à composição química, o teor de extrativos da biomassa de pequi apresentou-se elevado. Estudos com outras biomassas, como bagaço-de-cana (27,7%), casca de café (34,5%), talo de algodão (14,6%), casca de amendoim (22,6%) e casca de arroz (14,7%) (Kumar *et al.*, 2020) mostram valores inferiores aos observados para o pequi. O alto teor de extrativos dessa biomassa pode estar associado às suas características marcantes, como cheiro e sabor, uma vez que os extrativos interferem na cor, odor e durabilidade do material (Kumar *et al.*, 2020).

A lignina, que interfere diretamente no poder calorífico e na resistência mecânica de combustíveis sólidos, apresentou altos valores na biomassa de pequi. Percentuais elevados de lignina são benéficos para a resistência dos materiais densificados, além de impactarem positivamente os rendimentos dos

processos de conversão termoquímica (De Souza *et al.*, 2020); (Nam *et al.*, 2020). O teor de holocelulose de 20,35% indica uma menor proporção de celulose e hemicelulose em comparação com outras biomassas lignocelulósicas, como espiga de milho (71,45%) e bagaço de cana (70,26%) (Kumar *et al.*, 2020). A holocelulose é crucial para os processos de degradação térmica e bioquímica, pois esses componentes são responsáveis pela liberação de açúcares durante a conversão bioquímica e influenciam diretamente a estabilidade térmica da biomassa.

O poder calorífico da biomassa de casca de pequi se mostrou inferior comparado com os resíduos de outras biomassas da região, como o babaçu, que apresentou 19,07 e 19,03 MJ kg⁻¹, para mesocarpo e endocarpo (Rambo *et al.*, 2015). O epicarpo das biomassas de castanha-do pará, pequi e agave, apresentaram poder calorífico superior variando entre 17,2 e 17,8 MJ kg⁻¹ (Rambo *et al.*, 2015). O valor de 14,23 MJ kg⁻¹, se explica pelo fato de ser usado a casca nesse estudo, material mais carnoso do fruto e com alto teor de umidade.

3.2 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DA BIOMASSA

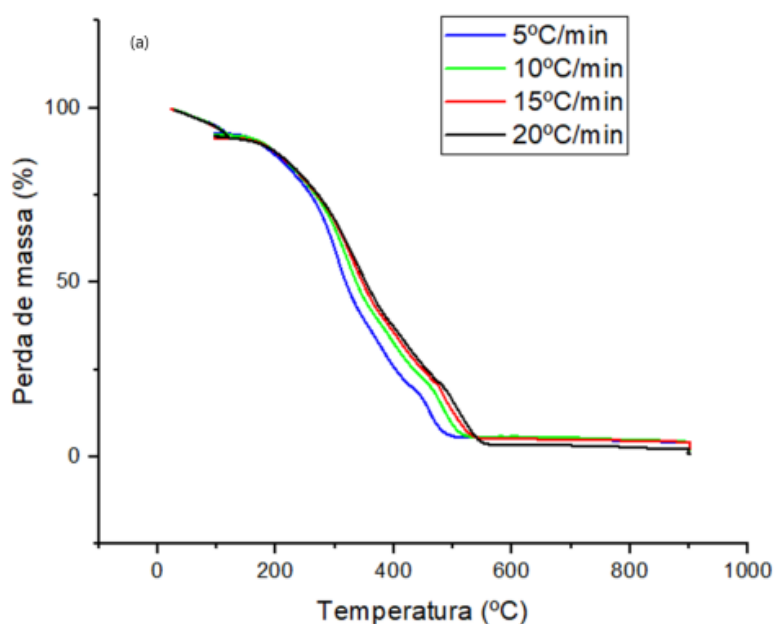
As curvas termogravimétricas obtidas para a casca de pequi (Figura 3a) mostraram que, mesmo com diferentes razões de aquecimento, a perda de massa manteve um padrão semelhante. Observou-se uma perda inicial de aproximadamente 10% até 180°C, atribuída à evaporação de água e compostos de baixo ponto de ebulição (Santos *et al.*, 2020).

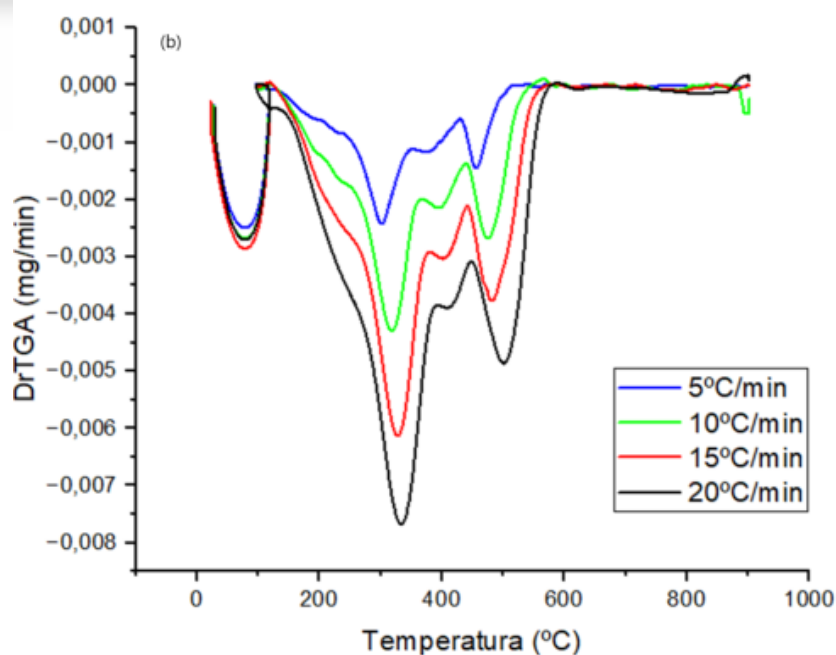
Aproximadamente 70% da perda de massa ocorreu na faixa de temperatura de 180°C a 450°C, referente à decomposição térmica conjunta da hemicelulose e celulose. Durante essa faixa de temperatura, foram registrados dois picos de decomposição na curva DTG: para a razão de aquecimento de 5°C min⁻¹, os picos ocorreram a 300°C e 385°C; para 10°C min⁻¹, a 320°C e 400°C; para 15°C min⁻¹, a 325°C e 410°C; e para 20°C min⁻¹, a 330°C e 450°C. No último estágio, com aproximadamente 20% de massa restante, observou-se a decomposição da lignina e a carbonização da biomassa, com picos a 460°C, 480°C, 485°C e 505°C para as razões de 5°C min⁻¹, 10°C min⁻¹, 15°C min⁻¹ e

20°C min⁻¹, respectivamente.

A decomposição térmica da hemicelulose e da celulose seguiu o comportamento esperado para biomassas lignocelulósicas. A hemicelulose, devido ao seu baixo grau de polimerização, se degradou a temperaturas mais baixas, entre 190°C e 320°C. Já a celulose, sendo um polímero de cadeia longa, se decompôs a partir de 300°C, necessitando de maior energia para quebrar suas ligações (Santos *et al.*, 2020). Além disso, a intensidade e a posição dos picos variaram com a taxa de aquecimento, demonstrando que uma taxa mais alta acelera a decomposição, elevando ligeiramente os picos e indicando menor eficiência na transferência de calor durante a pirólise da amostra (Yaman; Özbay, 2023).

Figura 3. Curvas termogravimétricas (a) e Derivadas da curva termogravimétrica (b) da biomassa da casca do pequi em diferentes razões de aquecimento.





Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

3.3 DENSIFICAÇÃO DA BIOMASSA

Logo após o processo de densificação, foram produzidos 24 briquetes. Na Figura 4, pode-se observar os briquetes de cada tratamento. Ao atingirem peso constante, o peso total dos 24 briquetes foi aproximadamente 11,5 kg.

Figura 4. Vista frontal (a) e superior (b) dos briquetes produzidos de biomassa de casca de pequi.



T1: Briquetes produzidos com 5% de umidade; T2: Briquetes produzidos com 7.5% de umidade; T3: Briquetes produzidos com 10% de umidade.

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

A densificação da casca de pequi se mostrou eficaz na redução do volume de resíduos que, de outra forma, seriam descartados na natureza. As densidades aparentes médias obtidas foram de $0,946 \text{ g cm}^{-3}$, $0,987 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,104 \text{ g cm}^{-3}$ para os tratamentos 1, 2 e 3, respectivamente. A densidade energética média dos briquetes foi de $2,294 \text{ MJ m}^{-3}$, $3,059 \text{ MJ m}^{-3}$ e $3,354 \text{ MJ m}^{-3}$, para os respectivos tratamentos. A variação entre os tratamentos, indica que o tratamento da umidade influenciou significativamente tais propriedades. O tratamento 3, apresentou a maior densidade aparente média e conseqüentemente a maior densidade energética, indicando uma maior compactação e potencial energético dos briquetes produzidos nesse tratamento.

Esses dados mostram que a redução de volume proporcionada pela densificação facilita o manejo e o armazenamento dos resíduos, além de minimizar o impacto ambiental. Comparando com outros resíduos agrícolas amplamente utilizados no Brasil, como o bagaço de cana-de-açúcar e a palha de cana, cujas densidades variam entre $0,870$ e $0,950 \text{ g cm}^{-3}$, os briquetes de casca de pequi demonstram valores próximos ou superiores (C. Silva *et al.*, 2021). Entretanto, ao comparar com briquetes de bambu, que apresentam uma densidade energética de $7,030 \text{ MJ m}^{-3}$, é importante notar que o processo de fabricação industrial utilizado para o bambu gera maior compactação, diferindo do processo manual empregado neste estudo (Krishnamoorthi *et al.*, 2023). Ademais, a densidade dos briquetes apresentou comportamento similar ao encontrado em outros estudos que utilizou diferentes porcentagens de umidade para compactação de briquetes, corroborando a tendência de que um maior teor de umidade na biomassa resulta em briquetes mais densos (Abdel Aal *et al.*, 2023).

3.4 ANÁLISE DE RESISTÊNCIA DOS BRIQUETES

Os briquetes submetidos aos diferentes tratamentos apresentaram variações na resistência à compressão. Após a aplicação do teste de Tukey, conclui-se que o tratamento 1 obteve a maior resistência à compressão, com uma média significativamente superior à do tratamento 3, enquanto o tratamento

2 apresentou uma média intermediária, que não é significativamente diferente das médias de T1 e T3. Em termos de valores, T1 apresentou a maior resistência à compressão, com 1,57 MPa, seguido por T2 e T3 com resistências de 1,27 MPa e 1,18 MPa, respectivamente. Os resultados indicam que, embora todos os briquetes tenham uma resistência suficiente para aplicações práticas, há uma diferença na capacidade de suportar compressão entre os tratamentos.

Em um trabalho que utilizou resíduos de poda urbana de *Ficus nitida* para a produção de briquetes, também foi observada uma relação entre a umidade e a resistência à compressão. Os briquetes foram produzidos com umidades de 8%, 10% e 15%, apresentando a maior resistência à compressão para a umidade de 8%, que foi de 18,5 MPa. Em comparação, o briquete com 15% de umidade teve resistência de 15,8 MPa, evidenciando o impacto negativo da umidade na resistência do material (Abdel Aal *et al.*, 2023).

No presente estudo, o método de briquetagem manual resultou em valores de resistência significativamente menores quando comparados aos obtidos em trabalhos que utilizaram processos de compactação mecanizada. Essa diferença pode ser explicada pela menor aplicação de força, o que resulta em briquetes com menor resistência. É importante destacar que o método de briquetagem manual foi escolhido neste estudo com o objetivo de desenvolver uma técnica simples e acessível, que possa ser facilmente replicada por pequenas comunidades, permitindo a produção de biocombustíveis a partir de resíduos abundantes na região.

A densidade e a resistência à compressão são os dois parâmetros mais importantes do briquete, e são controladas por uma série de parâmetros de qualidade que afetam a capacidade dos materiais densificados de permanecerem intactos durante todo o armazenamento e transporte (Ali *et al.*, 2024). Dessa forma, os resultados obtidos demonstram a necessidade de otimizar o processo de compactação, buscando aumentar a resistência mecânica dos briquetes sem comprometer a simplicidade da técnica.

4 CONCLUSÃO

Os resíduos da casca de pequi foram eficazes para a produção de briquetes que apresentaram boa resistência mecânica e propriedades físico-químicas adequadas, garantindo um bom potencial energético. Além de otimizar a logística de transporte e armazenamento, a briquetagem da casca de pequi representa uma alternativa promissora para o desenvolvimento de bioenergia sustentável. Esse processo beneficia comunidades extrativistas ao agregar valor a subprodutos e incentivar a economia local, proporcionando uma fonte de renda adicional. Além disso, contribui para a otimização da cadeia produtiva do setor e amplia o conhecimento acadêmico sobre o desempenho físico e energético de biocombustíveis regionais, transformando a biomassa residual em uma fonte útil de energia aliada à preservação ambiental. Contudo, uma limitação do estudo foi o processo manual de briquetagem. O uso de um maquinário industrial poderia aprimorar a qualidade dos briquetes. Assim, para estudos futuros sugere-se explorar métodos mecanizados para otimizar esses resultados.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas de pesquisa e estudo concedidas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190: Projeto de Estruturas de Madeiras**. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8633: Carvão vegetal: determinação do poder calorífico**. Rio de Janeiro, 1984.

ABDEL AAL, A. M. K. *et al.* Impact of Biomass Moisture Content on the Physical Properties of Briquettes Produced from Recycled Ficus nitida Pruning Residuals. **Sustainability**, v. 15, n. 15, p. 11762, 31 jul. 2023.

ALI, A. *et al.* Insight into the Biomass-Based Briquette Generation from Agro-Residues: Challenges, Perspectives, and Innovations. **BioEnergy Research**, v. 17, n. 2, p. 816–856, 23 jan. 2024.

ASADULLAH, M. *et al.* Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse. **Fuel**, v. 86, n. 16, p. 2514–2520, nov. 2007.

ASTM D 1762-84. Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. **ASTM International**, v. 84, n. Reapproved 2007, p. 1–2, 2011.

BOT, B. V.; TAMBA, J. G.; SOSSO, O. T. Assessment of biomass briquette energy potential from agricultural residues in Cameroon. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, n. 2, p. 1905–1917, 27 jan. 2024.

CARNEIRO, R. *et al.* Struggling over Serra do Curral. **Cosmopolitan Civil Societies: An Interdisciplinary Journal**, v. 15, n. 1, p. 33–52, 26 mar. 2023.

FILIZOLA, B. DE C. **Boas práticas de manejo para o extrativismo sustentável da fava d'anta**. Brasília: Instituto Sociedade, População e Natureza, 2013.

FONSECA, A.; NETO, N.; MENDES, J. Modeling logistics applied to extraction of pequi. **REVISTA DE TRANSPORTE Y TERRITORIO**, n. 26, p. 338–358, 2023.

GOMES, B. H. *et al.* Genetic diversity and correlation between morphological traits of pequi fruits (*Caryocar brasiliense* Camb.) with and without thorns at the endocarp. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 94, n. suppl 4, 2022.

MARKS-BIELSKA, R. *et al.* The Importance of Renewable Energy Sources in Poland's Energy Mix. **Energies**, v. 13, n. 18, p. 4624, 5 set. 2020.

MESQUITA, J. G. *et al.* Wood waste pellets from sustainable forest management in the Amazon as an energy source. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 6, p. e4769, 6 jun. 2024.

MISHRA, R. K.; MOHANTY, K. Pyrolysis kinetics and thermal behavior of waste sawdust biomass using thermogravimetric analysis. **Bioresource Technology**, v. 251, p. 63–74, mar. 2018.

MUMBACH, G. D. *et al.* Unlocking the potential of pequi (*Caryocar brasiliense*) residues for bioenergy and renewable chemicals: Multicomponent kinetic modeling, thermodynamic parameter estimation, and characterization of volatile products through TGA and Py-GC/MS experiments. **Industrial Crops and Products**, v. 209, p. 117928, mar. 2024.

OBI, O. F. *et al.* Solid Biofuel Production from Biomass: Technologies, Challenges, and Opportunities for Its Commercial Production in Nigeria. **Energies**, v. 16, n. 24, p. 7966, 8 dez. 2023.

RAMBO, M. K. D. *et al.* Characterization of biomasses from the north and northeast regions of Brazil for processes in biorefineries. **Food Science and Technology**, v. 35, n. 4, p. 605–611, 15 set. 2015.

SANTOS, V. O. *et al.* Pyrolysis of acai seed biomass: Kinetics and thermodynamic parameters using thermogravimetric analysis. **Bioresource Technology Reports**, v. 12, p. 100553, dez. 2020.

SCAPIN, E. *et al.* Production of Furanic Compounds and Organic Acids from Brazilian Pequi (*Caryocar brasiliensis* Camb.) Residues Using Green Chemistry. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, 2020.

SHRESTHA, A. *et al.* Evolution of energy mix in emerging countries: Modern renewable energy, traditional renewable energy, and non-renewable energy. **Renewable Energy**, v. 199, p. 419–432, nov. 2022.

WIRANARONGKORN, K. *et al.* Assessment and analysis of multi-biomass fuels for sustainable electricity generation. **Renewable Energy**, v. 180, p. 1405–1418, dez. 2021.