

Caracterização de serragem de eucalipto para produção de briquetes

Characterization of eucalyptus sawdust for briquette production

Caracterización del serrín de eucalipto para la producción de briquetas

Renata Carolina Araujo De Camargo ¹

Mario Luiz Nunes da Silva ²

João Lúcio de Barros ³

Resumo: O aproveitamento de resíduos de serragem de madeira podem contribuir para com a geração de energia renovável e contribuir com o meio ambiente. A pesquisa visa a caracterização dos resíduos de madeira para o aproveitamento na produção de briquetes. Realizada em parceria com o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, câmpus Sorocaba e campus Itapetininga, a análise envolveu o preparo de amostras, ajuste de umidade e produção de briquetes, além da avaliação de propriedades como expansão volumétrica, teor de voláteis, cinzas e carbono. Os resultados indicaram que as características físicas e químicas mostraram-se aptas para a produção de briquetes. A pressão de compactação influenciou as propriedades físicas dos briquetes. Embora algumas variações tenham sido observadas, os resultados ressaltaram a importância de controlar as condições de produção e armazenamento para garantir a qualidade do produto final, ainda que fatores como armazenamento e clima possam ter afetado as amostras.

Palavras-chave: Caracterização. Eucalipto. Serragem. Briquetes.

Abstract: The use of waste wood sawdust can help generate renewable energy and contribute to the environment. The research aims to characterize wood waste for use in the production of briquettes. Carried out in partnership with the Federal Institute of Education, Science and Technology of São Paulo, Sorocaba campus and Itapetininga campus, the analysis involved preparing samples, adjusting humidity and producing briquettes, as well as assessing properties such as volumetric expansion, volatile content, ash and carbon. The results indicated that the physical and chemical characteristics were suitable for briquette production. The compaction pressure influenced the physical properties of the briquettes. Although some variations were observed, the results highlighted the importance of controlling production and storage conditions to guarantee the quality of the final product, even though factors such as storage and climate may have affected the samples.

Keywords: Characterization. Eucalyptus. Sawdust. Briquettes.

¹ Graduanda. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. E-mail: renata.araujo@aluno.ifsp.edu.br

² Doutor. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. E-mail: marioluiznunes@ifsp.edu.br

³ Doutor. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. E-mail: lucio@ifsp.edu.br

Resumen: La utilización de residuos de serrín de madera puede ayudar a generar energía renovable y contribuir al medio ambiente. La investigación pretende caracterizar los residuos de madera para su uso en la producción de briquetas. Realizado en colaboración con el Instituto Federal de Educación, Ciencia y Tecnología de São Paulo, campus de Sorocaba y campus de Itapetininga, el análisis implicó la preparación de muestras, el ajuste de la humedad y la producción de briquetas, así como la evaluación de propiedades como la expansión volumétrica, el contenido de volátiles, la ceniza y el carbono. Los resultados indicaron que las características físicas y químicas eran adecuadas para la producción de briquetas. La presión de compactación influyó en las propiedades físicas de las briquetas. Aunque se observaron algunas variaciones, los resultados subrayaron la importancia de controlar las condiciones de producción y almacenamiento para garantizar la calidad del producto final, aunque factores como el almacenamiento y el clima pueden haber afectado a las muestras.

Palabras-clave: Caracterización. Eucalipto. Serrín. Briquetas.

Submetido 15/01/2025

Aceito 10/03/2025

Publicado 02/04/2025

Considerações iniciais

Conforme o relatório anual de 2023 emitido pela Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), o eucalipto ocupa 76% da área de árvore plantada no Brasil, sendo a espécie mais cultivada, totalizando 7,6 milhões de hectares. Diversas são as finalidades para o eucalipto e a área de reflorestamento é muito importante para o avanço sustentável de indústrias (Barros et al., 2019).

A biomassa é uma energia renovável viável por ser eficiente na utilização consciente dos recursos naturais, gerando energia, contribuindo para a redução das emissões de gases poluentes e do efeito estufa. A crescente utilização de fontes renováveis é uma tendência mundial, e o Brasil, com sua vasta biodiversidade e riqueza de recursos naturais, tem se consolidado como líder nesse setor. Na situação atual, o país demonstra ações e pesquisas que refletem um destaque para a transformação de seu sistema energético, com iniciativas voltadas para a sustentabilidade e a utilização de fontes limpas de energia (Carmo, 2013).

O briquete é um biocombustível compacto e eficiente, reconhecido como uma alternativa sustentável à lenha e a outros combustíveis convencionais, podendo ser conhecido como lenha ecológica, ele pode substituir o gás, a energia elétrica, o carvão mineral e vegetal, além da própria lenha tradicional, em diversas aplicações industriais e residenciais, a criação do briquete aproveita diferentes tipos de resíduos vegetais.

Sua utilização é bastante diversificada, atendendo desde residências até setores como cerâmicas, padarias, pizzarias e indústrias de alimentos, químicos, têxteis e cimento. Essa versatilidade, aliada ao reaproveitamento de materiais que seriam descartados, faz do briquete uma opção prática e ecológica para atender às demandas energéticas, promovendo o uso responsável de recursos naturais e a redução do impacto ambiental (Silva et al., 2017).

Os briquetes podem ser confeccionados mediante as pequenas partículas de pó, compactados por prensas hidráulicas ou mecânicas, para gerar uma forma cilíndrica ou um disco utilizado como combustível (Soares et al., 2015). Este processo de briquetagem resulta em um produto que, além de ser uma fonte de energia, apresenta boa eficiência em termos de densidade e poder calorífico. Isso faz com que os briquetes de biomassa se tornem uma alternativa promissora, especialmente em um contexto global de busca por fontes energéticas mais sustentáveis e limpas.

Conforme Ferrari et al. (2020), no Brasil, a cana-de-açúcar, madeiras, serragem e o cavaco, além de casca de arroz e de café, são matérias-primas comumente utilizadas para a fabricação de briquetes. Nos Estados Unidos, por outro lado, o milho e a soja são frequentemente empregados, enquanto na África, a lenha permanece como a principal fonte para esse processo. O Brasil, com suas diversas espécies de árvores e uma combinação de solo e clima, é um ambiente propício para a produção de briquetes de boa qualidade. O eucalipto, em particular, destaca-se devido às suas propriedades favoráveis, como elevada densidade, resistência mecânica, poder calorífico, e baixa formação de cinzas e umidade, o que o torna ideal para utilização na indústria de madeira serrada, produção de energia e papel e celulose (Lima, 2015).

A crescente demanda por fontes alternativas de energia no Brasil, associada ao aumento da conscientização ambiental, torna os briquetes de biomassa uma excelente oportunidade para a economia circular. O uso do eucalipto para essa finalidade não apenas promove a redução da dependência de fontes de energia não renováveis, como também contribui para a criação de novos mercados e o fortalecimento de indústrias sustentáveis. Além disso, a utilização de briquetes em processos industriais reduz significativamente as emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se com as metas globais de sustentabilidade e combate às mudanças climáticas. Assim, o desenvolvimento de novas tecnologias e melhorias no processo de briquetagem têm o potencial de impulsionar ainda mais esse setor, proporcionando um futuro mais sustentável e eficiente para a matriz energética brasileira.

Além disso, o mercado de briquetes continua a expandir, especialmente com o crescente interesse por alternativas mais limpas e renováveis no setor energético. O Brasil, devido ao seu potencial de produção de biomassa e seu compromisso com a sustentabilidade, se posiciona como uma base importante nesse mercado global. O aprimoramento contínuo das técnicas de briquetagem, juntamente com a utilização de matérias-primas locais, como o eucalipto, será significativo para o futuro da produção de energia renovável no país.

O objetivo deste trabalho foi determinar as características físico-químicas dos materiais para a produção de briquetes.

Revisão bibliográfica

Fontes Renováveis

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2023, a oferta interna de energia no país totalizou 303,1 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (mtep) em 2022, registrando uma leve queda de -0,03% em comparação com o ano anterior. Quanto à contribuição das fontes renováveis na matriz energética, observou-se um aumento significativo de 6,04% em relação ao ano anterior.

A crescente demanda pela substituição de combustíveis não renováveis por fontes de energia renováveis é uma realidade que reflete uma crescente conscientização ambiental da sociedade (Barros, 2019).

A versatilidade do uso da biomassa como fonte de energia, podendo ser utilizada de forma sólida, líquida ou gasosa, contribui para o aumento do investimento, pesquisa e utilização. Dessa forma, a biomassa surge como uma opção tecnicamente viável para substituir os combustíveis fósseis (Dahunsi; Fagbiele; Yusuf, 2020).

A biomassa é amplamente distribuída pelo globo terrestre e se destaca por possuir um ciclo de vida relativamente curto. Assim, emerge como uma opção promissora para substituir o carvão e outras fontes de combustíveis fósseis como uma alternativa possível (Chen et al., 2021).

Eucalipto

O Eucalipto é uma espécie com diversas linhagens sendo os mais comuns no Brasil o *Eucalyptus urograndis*, *grandis* e *viminalis* (Lima, 2015).

No Brasil, e em outras localidades, o cultivo do eucalipto é escolhido por sua adaptação e rápido crescimento, pelo seu rendimento econômico, como uma madeira que pode ser utilizada de diversas formas (EMBRAPA, 2023). Há registros do início do cultivo no Brasil entre 1825 e 1868, mas Joaquim Francisco de Assis Brasil, no Rio Grande do Sul em 1868, foi um dos pioneiros a se interessar e plantar em grande escala (EMBRAPA, 2019).

De acordo com Areias et al. (2020), o valor de eucalipto atingiu 6,97 milhões de hectares em 2019 de produção nacional e de doze empresas analisadas, onde sete eram no estado de São

Paulo, utilizavam serragem de eucalipto como matéria prima principal. O Quadro 1 mostra os principais prós e contras do uso das biomassas de eucalipto analisadas pelos autores, levando em conta a produção, a quantidade de fornecedores, o preço, o custo da energia e suas propriedades energéticas (Areias et al., 2020).

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens na utilização das biomassas analisadas no Estado de São Paulo.

	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Briquete	Densidade elevada; TCF	Disponibilidade de fornecedores; Baixa produção; Preço; Custo de energia
Serragem	PCS; Preço	Baixa densidade; Disponibilidade de fornecedores
Floresta de eucalipto	PCS; TCF; Alta produção; Disponibilidade de fornecedores; Custo de energia	Preço
Lenha de eucalipto	PCS; TCF; Alta produção; Disponibilidade de fornecedores	Preço
Cavaco de eucalipto	PCS; Alta produção; Disponibilidade de fornecedores; Preço; Custo de energia	Baixa densidade

Fonte: Adaptado de Areias et al., 2020

Legenda: PCS = Poder Calorífico Superior; TCF = Teor de Carbono Fixo

Briquetes

O briquete tem como principal vantagem a maior densificação energética, contribuindo para com o transporte, armazenamento e homogeneização das características do material, que por sua vez, tem como característica sua heterogeneidade. Além disso, melhora o aspecto e características físico-químicas dos materiais, agregando valor e possibilitando atender as características para fornecimento de acordo com a demanda de mercado.

O processo de fabricação envolve o uso de uma prensa hidráulica, um equipamento que auxilia para compactar os materiais e transformá-los em biocombustíveis sólidos. O funcionamento da prensa é baseado na aplicação de alta pressão: quando o pistão atinge o nível de compressão necessário, uma peça localizada na parte frontal do equipamento se abre,

permitindo a eliminação do briquete formado (Donato; Takena, 2016). A briquetagem de resíduos lignocelulósicos surge como uma tecnologia promissora, uma vez que demonstram uma qualidade superior à da lenha (Areias, 2020).

Este material sólido demonstra ser mais apropriado que a lenha de eucalipto devido a sua umidade em torno de 5 a 15%, pois a lenha habitual tem cerca de 20 e 25% (Lima, 2015).

A área de Pesquisa e Desenvolvimento acadêmico e industrial, se esforça para encontrar soluções alternativas de redução de custos e o aproveitamento de materiais, garantindo a concorrência no mercado e o valor agregado do produto (Almeida et al., 2019).

Teor de Voláteis

O teor de voláteis em briquetes é um fator crítico que determina o desempenho na queima e a eficiência energética do material. Combustíveis com altos teores de voláteis tendem a apresentar uma ignição mais rápida, o que pode ser vantajoso em aplicações que exigem um aquecimento imediato.

Além disso, a quantidade de voláteis influencia diretamente a formação de fumaça e a emissão de poluentes durante a combustão. Estudos recentes sugerem que a manipulação do teor de voláteis pode ser feita através do pré-tratamento da biomassa, como a secagem e a torrefação, resultando em briquetes que queimam de maneira mais limpa e eficiente (Chen et al., 2021).

A reação de um combustível pode ser avaliada pelo seu teor de voláteis. Quanto mais a quantidade de substâncias voláteis, maior é sua resposta, o que ativa o processamento da queima (Oshiro, 2016).

Teor de Cinzas

Segundo Silva (2020) é conveniente evidenciar que para finalidades energéticas são melhores materiais os que possuem baixo teor de cinzas e de umidade. E entender a sua origem é essencial para a análise do desempenho, principalmente quando usadas para indústrias (Souza et al., 2022).

O teor de cinzas é um parâmetro crucial na avaliação da qualidade dos briquetes, especialmente para aplicações industriais. As cinzas resultantes da combustão podem causar

problemas operacionais em caldeiras, como entupimentos e corrosão, que podem levar a custos adicionais e interrupções na produção (Oshiro, 2016). Portanto, a seleção de matérias-primas com baixo teor de cinzas é fundamental para garantir um desempenho eficiente e econômico.

Teor de Carbono Fixo

O teor de carbono fixo representa a porcentagem da massa orgânica rica em carbono, considerando o material seco, ou seja, sem umidade. Esse componente é o que mais contribui para o aumento do poder calorífico nos materiais analisados (Barros, 2014).

Além disso, o teor de carbono fixo também está relacionado à estabilidade térmica do combustível. Briquetes com uma quantidade elevada de carbono fixo tendem a queimar de forma mais lenta e uniforme, o que é benéfico para processos que requerem um fornecimento constante de calor (Oshiro, 2016). A pesquisa sobre o aumento do teor de carbono fixo por meio de técnicas de processamento, como a carbonização e a torrefação, é uma área promissora para otimizar a produção de briquetes.

Em conclusão, compreender a relação entre o teor de carbono fixo, a composição da biomassa e as condições de produção pode oferecer uma base sólida para o desenvolvimento de briquetes com características superiores, alinhadas às demandas do mercado e às necessidades ambientais.

Metodologia

Os materiais aplicados consistem na biomassa de 3 tipos diferentes de resíduos de eucaliptos, o tratamento A foi obtido como resíduo de serragem em uma serraria localizada em Salto de Pirapora, com origem não especificada pela empresa. Já o tratamento B, também procedente da mesma serraria, corresponde à espécie Duna. E o tratamento C refere-se a um eucalipto de uma empresa madeireira de grande porte situada no município de Itapetininga. Essas serragens estão apresentadas na Figura 1.

Figura 1 – a) serragem de eucalipto, b) serragem de eucalipto duna, c) serragem de eucalipto da empresa.



Fonte: Próprio autor, 2024

Preparação das amostras: O material foi secado na estufa Ethik Technology com recirculação de ar sob temperatura de 103 °C. Posteriormente o material foi peneirado e classificado com peneiras de abertura de 35 a 100 meshes, conforme ASTM D293. Esse procedimento foi realizado para adequar o tamanho das partículas à próxima etapa do processo.

Ajuste da umidade: Após a secagem, a biomassa contou com a umidade ajustada em aproximadamente 10% (base seca), com auxílio de balança digital com precisão de 0,001 g e borrifador manual. A água foi aplicada ao material, que foi então colocado em um saco hermeticamente fechado e misturado manualmente por 10 minutos. O material permaneceu em repouso por 24 horas dentro da embalagem fechada, para completar a homogeneização na amostra.

Produção dos briquetes: A compactação foi realizada com 20 g de material em molde cilíndrico de aço, utilizando uma prensa hidráulica Bovenau P15000 de 15 toneladas, conforme representado na figura 2. O tempo de compactação foi de 30 segundos, com pressões de 5,0 e 7,5 toneladas e a ilustração de sua produção pode ser vista na figura 3.

Figura 2 – Material em molde cilíndrico de aço.



Fonte: Próprio autor, 2024

Figura 3 – Briquetes do tratamento C na pressão de 5,0 toneladas.



Fonte: Próprio autor, 2024

Expansão volumétrica: Expansão volumétrica: Foram realizadas medições utilizando paquímetro com precisão de 0,05 mm. As medições foram efetuadas nas alturas e diâmetros dos briquetes imediatamente após a retirada do molde e, posteriormente, nos intervalos de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12, 24, 36, 48, 60 e 72 horas, conforme a metodologia adotada por Barros (2014). A equação 1 apresenta o cálculo para a expansão volumétrica, que fornece uma análise precisa do comportamento dos briquetes ao longo do tempo, permitindo avaliar sua estabilidade dimensional após a compactação.

$$EV = \left(\frac{\pi \cdot di^2}{4} \right) \cdot hi - \left(\frac{\pi \cdot d0^2}{4} \right) \cdot h0$$

(1)

em que,

EV - Expansão volumétrica (mm³);

π - Constante admissional (3,14159);

hi - Altura medida (mm);

di - Diâmetro medido (mm);

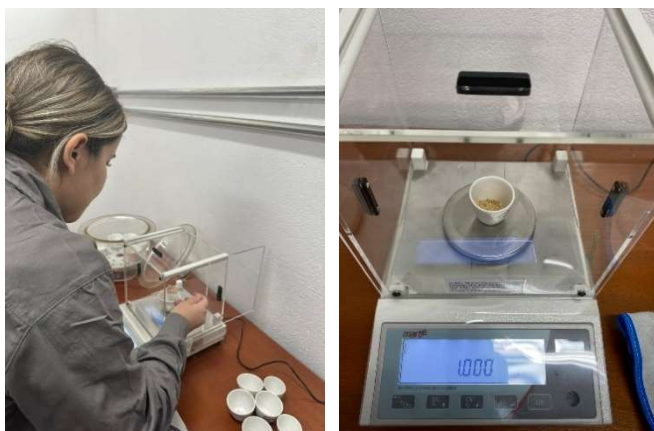
h0 - Altura inicial (mm);

d0 - Diâmetro inicial (mm).

Umidade: A análise de umidade foi realizada com aproximadamente 1,5 gramas de material, que foram submetidas a um analisador de umidade até que ocorresse estabilização na variação de massa, conforme a norma ASTM D3173. Este procedimento foi adotado para determinar o teor de umidade do material.

Análise Imediata: As amostras foram preparadas em cadinhos de porcelana previamente calcinados e pesados com precisão de 0,001 g. Cerca de 1 g de material foi colocado em cada cadinho, seguindo a norma ASTM D3172. A Figura 4 ilustra o processo de preparação das amostras para análise imediata do material utilizado na produção dos briquetes.

Figura 4 – Preparo de amostras para análise imediata.



Fonte: Próprio autor, 2024



Teor de voláteis: A determinação do teor de voláteis foi realizada em duplicata utilizando um forno mufla a 600°C por 11 minutos, conforme a ASTM D-3174 (2018). Após o aquecimento, os cadinhos foram resfriados em dessecador com sílica gel por 30 minutos, pesados e analisados conforme a equação 2 da ASTM D3172:

$$TV = \left(\frac{m_f - m_a}{m_i} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

em que,

TV: Teor de matérias voláteis, em %;

m_i : Massa inicial, em g;

m_f : Massa final, em g.

Teor de cinza: As amostras foram colocadas em cadinhos de porcelana e submetidas a uma temperatura de 600°C por 6 horas em forno mufla, em duplicata. Após o tratamento térmico, os cadinhos foram resfriados em dessecador com sílica gel por 30 minutos, pesados e analisados de acordo com a equação 3 da ASTM D3174:

$$TC = \left(\frac{m_f - m_a}{m_i} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

em que,

TC: Teor de cinzas, em %;

m_i : Massa inicial, em g;

m_f : Massa final, em g.

Teor de carbono fixo: O teor de carbono fixo foi calculado subtraindo-se os valores de voláteis e cinzas da unidade, usando a equação 4 da ASTM D3172:

$$TCF = 100 - (TV + TC) \quad (4)$$

em que,

TCF é o teor de carbono fixo (%);

TV é o teor de voláteis (%);

TC é o teor de cinzas (%).

Análise dos dados e resultados

Os tratamentos foram realizados em forma de duplicata, para análise. A umidade, voláteis, cinza e teor de carbono são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Teor De Voláteis, Cinzas, Carbono Fixo e Umidade.

TRATAMENTO	VOLÁTEIS (%)	CINZAS (%)	CARBONO FIXO (%)	UMIDADE (%)
A	83,8249	0,1503	16,3254	28,6430
B	82,8349	0,1001	17,2652	26,9500
C	87,0159	0,2002	13,1843	27,6500

Fonte: Próprio autor, 2024

O tratamento A encontrava-se com percentual de 28,64%, enquanto que a serragem B encontrava-se com teor de umidade 26,95% e a serragem C com 27,65%, significativamente acima do recomendado para a fabricação de briquetes. Recomenda-se para fabricação de briquetes que o teor de umidade do material esteja entre 8 e 15%, pois conforme a umidade aumenta, a quantidade de calor gerada reduz, já que uma fração da energia liberada na queima é utilizada para vaporizar a água contida no material (Dias *et al.*, 2012, apud Souza *et al.*, 2022).

Essa alta umidade impacta negativamente a eficiência energética do material, uma vez que parte da energia é utilizada para vaporizar a água durante a combustão. Além disso, pode causar problemas na compactação, resultando em briquetes menos densos e mais suscetíveis à quebra durante o transporte e armazenamento.

Embora o teor de umidade seja elevado, é importante destacar que o método utilizado para ajustá-lo pode ser melhorado. Uma secagem mais uniforme ou o uso de pré-tratamentos específicos poderiam contribuir para a obtenção de briquetes de maior qualidade, conforme sugerido pela literatura citada.

Taxas de umidade superiores a 15% ou inferiores a 8% podem resultar na quebra dos briquetes durante as fases de fabricação, estocagem ou transporte. Além disso, uma grande variação no teor de umidade pode prejudicar o processo de combustão, demandando ajustes contínuos no sistema (Brito, 1986, apud Souza *et al.*, 2022).

Em relação ao teor de matérias voláteis, o tratamento C foi o material que apresentou maior valor, com 87% seguido pelo A com 83,8% e o tratamento B com 82,8%.

Esse parâmetro é importante, pois influencia diretamente a facilidade de ignição do material. Apesar disso, altos valores de voláteis não são necessariamente vantajosos para briquetes de longa duração, já que podem reduzir a estabilidade térmica e o poder calorífico.

Uma possível abordagem seria buscar equilíbrio entre voláteis e carbono fixo. A redução dos voláteis, por meio de tratamentos como a torrefação, poderia resultar em briquetes com queima mais uniforme e eficiente, atendendo melhor às necessidades de processos industriais.

Levando em conta que são formados por vapores e gases, e que apenas uma parte reduzida desses gases apresenta um alto poder calorífico, pode-se refletir que a quantidade de voláteis não é um fator decisivo nas propriedades do material (Sánchez, 2010 apud Barros, 2014).

A quantidade de materiais voláteis indica o nível de reação do material e influencia diretamente sua facilidade de ignição. Que consiste em quanto mais volátil for o material, mais rapidamente ele entra em combustão, podendo, em certos casos, até ocorrer de forma espontânea (Hansted, Ana Larissa S. et al., 2016; Vieira, A. C. et al., 2013, Apud Barros, 2019).

De acordo com Carvalho (2010), conforme citado por Oshiro (2016) um combustível sólido de qualidade deve apresentar um teor de cinzas abaixo de 3%. Quando a biomassa é utilizada como combustível em caldeiras, a quantidade de cinzas se torna uma característica determinante. Isso pode ocorrer porque as cinzas podem se dissolver em altas temperaturas, levando à formação de incrustações que comprometem o funcionamento dos equipamentos (Maia, 2013, apud Oshiro, 2016).

Os valores encontrados para o teor de cinzas foram baixos (0,10% a 0,20%), o que está alinhado com o padrão esperado para biomassas de eucalipto destinadas à produção de energia. Isso é positivo, pois materiais com baixos níveis de cinzas minimizam problemas como incrustações e corrosão em equipamentos industriais.

Entretanto, é importante investigar a consistência desses valores em amostras maiores ou em condições variáveis de produção. Isso garantiria maior confiabilidade nos dados e na aplicabilidade dos briquetes em diferentes contextos.

Os valores observados neste estudo para o teor de cinzas estão de acordo com a literatura e estão abaixo daqueles verificados em madeiras destinadas à produção de energia, de espécies florestais. E próximos aos padrões considerados de eucaliptos para uso energético, que possuem teores de cinzas inferiores a 1%.

A presença de carbono fixo é muito analisada em combustíveis sólidos, pois ela fornece energia e é a parte do material que resiste melhor ao calor durante a queima (Chrisostomo, 2011 apud Barros, 2019). O aumento de carbono fixo nas serragens está associado à redução dos níveis de teor de voláteis, uma vez que esses são inversamente proporcionais.

O carbono fixo variou entre 13,18% (tratamento C) e 17,27% (tratamento B). Um teor mais elevado de carbono fixo está relacionado à estabilidade térmica e ao poder calorífico do material. Neste estudo, o tratamento B apresentou melhores características nesse aspecto, sendo mais adequado para aplicações que demandam maior densidade energética.

Por outro lado, o tratamento C, apesar de dispor de menor teor de carbono fixo, apresentou maior teor de voláteis, o que pode ser útil em aplicações que exigem ignição rápida. Portanto, a escolha do material ideal depende do tipo de aplicação a que os briquetes se destinam.

Quanto maior o carbono fixo, melhor pode ser sua resistência térmica do material. Dessa forma, esse fator é importante para o combustível utilizado (Barros, 2019).

De acordo com Ramos e Paula (2010), conforme citado por Oshiro (2016), para uma produção de energia apropriada, é aconselhável que o material contenha uma quantidade reduzida de cinzas e que o material apresente um alto teor de carbono fixo e um nível baixo de umidade.

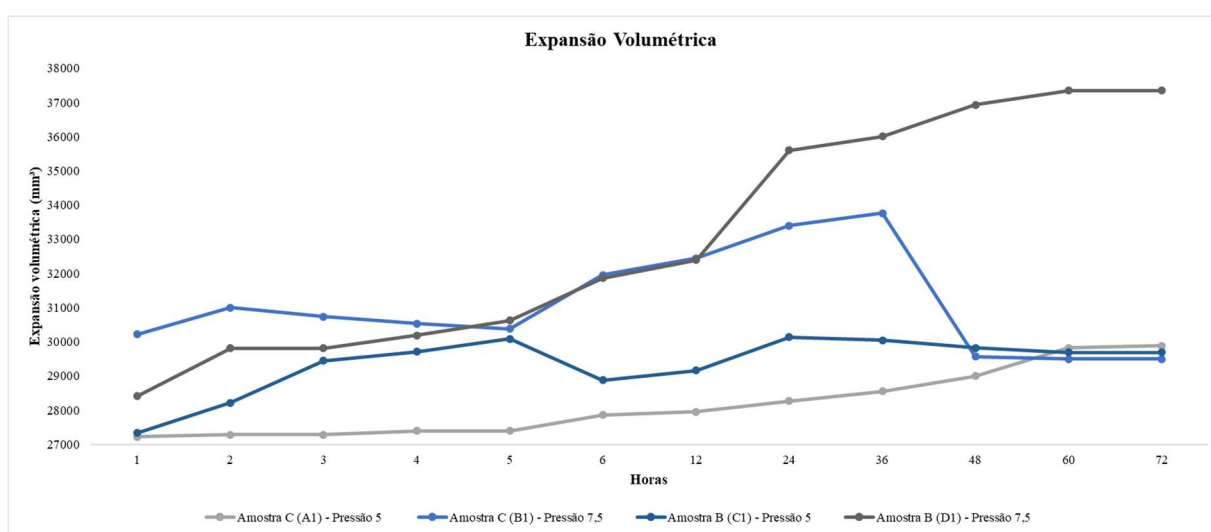


Briquetes

Expansão Volumétrica

Os resultados para os briquetes, mensurados no intervalo de tempo pré definido são mostrados na Figura 5, nos intervalos de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12, 24, 36, 48, 60 e 72 horas.

Figura 5 – Medidas do tratamento B e C com pressão de 5,0 e 7,5 toneladas.



Fonte: Próprio autor, 2024

Durante a análise dos materiais, observou-se que alguns briquetes apresentaram comportamentos distintos. Enquanto normalmente ocorre a expansão, nos tratamentos B de 7,5 e no C na pressão de 5, houve contração na pressão de 7,5 do tratamento B e na pressão 5 do tratamento C, possivelmente em razão à secagem do briquete com excesso de água (Barros, 2014). De acordo com Magalhães, Silva e Castro (2019), assim como Alves et al. (2022), a variação volumétrica das biomassas pode ser atribuída a diferentes fatores. Entre eles,

destacam-se a capacidade do material de absorver e reter umidade, que afeta a resistência mecânica.

Controlar a umidade inicial e a pressão de compactação são fatores cruciais para reduzir a variação na expansão volumétrica. Uma análise mais aprofundada sobre as condições de compactação, poderia otimizar os resultados.

O estudo apresentou que a pressão de compactação tem impacto significativo nas propriedades dos briquetes. Pressões mais altas de 7,5 toneladas, tendem a gerar briquetes mais densos e menos suscetíveis a variações dimensionais, porém é necessário avaliar o custo benefício de pressões mais elevadas, considerando o aumento de energia requerida.

Os resultados mostraram que a serragem de eucalipto possui características favoráveis para a produção de briquetes, mas ajustes nos processos de secagem e compactação são necessários para alcançar padrões industriais mais elevados. Controlar a umidade e balancear os teores de voláteis e carbono fixo podem melhorar a qualidade final. Além disso, os baixos níveis de cinzas são um ponto forte, alinhando-se às exigências do mercado para aplicações energéticas sustentáveis.

Considerações finais

Este estudo caracterizou os resíduos de serragem de eucalipto visando sua aplicação na produção de briquetes. O estudo revelou que a pressão de compactação tem um impacto significativo nas propriedades dos briquetes e também desafios que precisam ser superados para otimizar sua utilização.

O teor de cinzas dos materiais foi consistentemente baixo, indicando que todos os resíduos avaliados são adequados para aplicações energéticas, com potencial para reduzir problemas operacionais em equipamentos industriais, como caldeiras. O teor de carbono fixo mais elevado no tratamento B destaca seu uso preferencial em processos que exigem combustão mais estável e prolongada, enquanto os altos teores de voláteis do tratamento C podem ser explorados em aplicações que demandam ignição rápida.

No entanto, os elevados teores de umidade registrados em todos os materiais analisados representam uma limitação significativa, pois comprometem o poder calorífico, a integridade

dos briquetes e a eficiência do processo de combustão. Essa característica evidencia a necessidade de melhorias no pré-tratamento dos resíduos, especialmente na etapa de secagem.

A análise da compactação revelou que maiores pressões resultam em briquetes mais densos e menos propensos à expansão volumétrica, características desejáveis para transporte e armazenamento.

Do ponto de vista ambiental e energético, o aproveitamento de resíduos de serragem de eucalipto para produção de briquetes apresenta uma alternativa viável e sustentável. A transformação de resíduos em biocombustíveis sólidos contribui para a redução de desperdícios, diversificação da matriz energética e substituição de combustíveis fósseis, alinhando-se às metas globais de sustentabilidade.

Os resultados apontam que os materiais avaliados podem ser direcionados para diferentes aplicações, de acordo com suas características específicas. O tratamento B, por exemplo, com maior teor de carbono fixo, é mais indicado para processos industriais que requerem resistência térmica e fornecimento constante de calor. Por outro lado, o tratamento C, devido ao seu alto teor de voláteis, pode ser empregado em cenários que demandam ignição rápida e eficiência inicial na combustão.

Os resultados divergentes podem ser devido a como o material foi armazenado e condições climáticas, no qual não dispomos dessa informação. Para superar as limitações identificadas, recomenda-se investigar o impacto de diferentes temperaturas e tempos de compactação na densidade e durabilidade dos briquetes, realizar análises econômicas que considerem os custos de pré-tratamento e produção em escala industrial.

Ao aproveitar sobras de madeira na produção de briquetes, transforma-se o que antes era lixo em uma fonte de energia, contribuindo para a preservação ambiental, a economia de energia e o controle do desmatamento. Além de substituir a lenha, os briquetes garantem maior sustentabilidade e eficiência.

Por fim, o estudo reforça a viabilidade técnica do uso de serragens de eucalipto para a produção de briquetes, ao mesmo tempo que destaca a importância de controles rigorosos no processo produtivo para garantir a competitividade e a qualidade do produto final no mercado de biocombustíveis.

Agradecimentos

Ao IFSP Sorocaba, pela oportunidade de realização da pesquisa no Laboratório de Biomassa e Biocombustíveis.

Referências

ALMEIDA, Anne Marri Costa da Silva *et al.* A produção de briquetes a partir dos resíduos de eucalipto: uma oportunidade de negócios para o litoral norte da bahia. **Revista Valore**, Volta Redonda, v. 449, n. 27, p. 27-49, jul. 2019.

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.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 293**. Standard Test Method for the Sieve Analysis of Coke. 1999.

ANEEL. Parte II: Fontes Renováveis - Biomassa. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, p. 63-74, 2008.

APRESENTAÇÃO, Marcos de Jesus Fonseca de. **energia de biomassa como uma perspectiva para o problema energético e ambiental de são tomé e príncipe**. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis), Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2021.

AREIAS, Adriana Aparecida. **Análise de viabilidade econômica do uso de diversas fontes de biomassa para queima**. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2020.

AREIAS, A. A.; CRUZ JÚNIOR, J. C.; YAMAJI, F. M. Market study on the use of biomass for burning in the State of São Paulo, Brazil. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 9, n. 11, p. e1429119566, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i11.9566. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/9566>. Acesso em: 17 aug. 2024.

_____. **ASTM D 3172**. Standard Practice for Proximate Analysis Sample of Coal and Coke. 2002.

_____. **ASTM D 3173**. Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. 2000.

_____. **ASTM D 3174**. Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal. 2000.

BARROS, João Lúcio de. **Caracterização de blendas e briquetes de carvões vegetal e mineral**. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais), Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2014.

BARROS, João Lúcio de et al. Diferença entre os Resultados Obtidos pelos Procedimentos das Normas DIN e ASTM na Densidade a Granel de Biomassas Sólidas. **Revista Virtual de Química**. Niterói, p. 993-1000. jul. 2020.

_____. **Biocoque como fonte de energia renovável para uso siderúrgico**. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais), UNESP, Sorocaba, 2019.

CARMO, Vadson Bastos do. **Avaliação da eficiência energética renovável de biomassas alternativas para geração de eletricidade**. Tese (Doutorado em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

CARVALHO, Natália; BARROS, João; SILVA, Diego; NAKASHIMA, Gabriela; YAMAJI, Fábio. Caracterização física e química da biomassa usada como combustível sólido em uma caldeira. **Química Nova**, [S.L.], v. 44, n. 1, p. 35-40, set. 2020. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170663>. Disponível em: <https://quimicanova.sbq.org.br/pdf/AR2020-0234>. Acesso em: 25 abr. 2024.

CHEN, W.-H. et al. Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 82, 2021.

DAHUNSI, S. O.; FAGBIELE, O. O.; YUSUF, E. O. Bioenergy technologies adoption in Africa: A review of past and current status. **Journal of Cleaner Production**, v. 264, 2020.

DONATO, Cláudio José; TAKENAKA, Edilene Mayumi Murashita. O Aproveitamento de Resíduos de Madeira para o Desenvolvimento Sustentável. **Fórum Ambiental**, São Paulo, v. 12, n. 04, p. 67-80, 2016.

EMBRAPA. Embrapa (ed.). **Cultivo do eucalipto**. 2023. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1155567/1/EmbrapaCultivoDoEucalipto2014.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2024.

EMBRAPA. Embrapa (org.). **Eucalipto: perguntas e respostas**. Perguntas e Respostas. 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/florestas/eucalipto/perguntas-e-respostas>. Acesso em: 18 ago. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE (Brasil). **Balanco Energético Nacional – Relatório Síntese 2023, ano base 2022**. Ministério de Minas e Energia – MME 65p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 25 abr. 2024.

FERRARI, G. et al. Bibliometric analysis of trends in biomass for bioenergy research. *Energies*, v. 13, n. 14, 2020.

FLORENTINO-MADIEDO, L.; DÍAZ-FAES, E.; BARRIOCANAL, C. Mechanical strength of bio-coke from briquettes. *Renewable Energy*, v. 146, p. 1717–1724, 2020. IBÁ. (2024). Indústria Brasileira de Árvores. *Relatório 2023*. Brasília: IBÁ.

LIMA, Francisco Daniel Mota. **Quantificação e caracterização físico-química do material particulado fino (MP_{2,5})**: queima de biomassa em fornos de pizzaria na cidade de São Paulo. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

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.

MORAIS, Bruno Rogério Ferreira de. **Proposta de aproveitamento energético de resíduos de poda urbana no município de Itapetininga**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Itapetininga, 2023.

NAKASHIMA, Gabriela Tami *et al.* Briquetes produzidos a partir do aproveitamento de resíduos provenientes do aterro de resíduos inertes da cidade de sorocaba. In: CONER, 2. Sorocaba: **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, 2018. v. 7, p. 231-243.

OSHIRO, Thaís Liemi. **Produção e caracterização de briquetes produzidos com resíduos lignocelulósicos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016.

SILVA, Jose Wilton Fonseca da *et al.* DA BIOMASSA RESIDUAL AO BRIQUETE: VIABILIDADE TÉCNICA PARA PRODUÇÃO DE BRIQUETES NA MICRORREGIÃO DE DOURADOS-MS. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Dourados, v. 6, n. 4, p. 624-646, 2017.

SILVA, Renata Guilherme Cândido da. **Produção e Caracterização de briquetes de biomassas lignocelulósicas em diferentes granulometrias**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2020.

SOARES, Larissa de Souza *et al.* Utilização de Resíduos de Borra de Café e Serragem na Moldagem de Briquetes e Avaliação de Propriedades. **Revista Matéria**, Sorocaba, v. 2, n. 20, p. 550-560, maio 2015.

SOUZA, C. de O., ARANTES, M. D. C., Pinto, J. de A., SILVA, J. G. M. da, CARNEIRO, M. F., LIMA, A. C. B. de, & PASSOS, R. R. (2022). Qualidade dos resíduos madeireiros de mogno-africano e eucalipto para briquetagem. **Ciência Florestal**, 32(2), 637–652.
<https://doi.org/10.5902/1980509843299>