

Artigo

Propriedades Físico-Mecânicas de Briquetes Produzidos com Palha de Cana-de-Açúcar em Alta Temperatura

Fernandes, P. H. G.; Nakashima, G. T.; Padilla, E. R. D.; Santos, L. R. O.; Yamajia, F. M.*

Rev. Virtual Quim., 2020, 12 (4), 878-887. Data de publicação na Web: 23 de Junho de 2020

<http://rvq.sbq.org.br>

Physico-Mechanical Properties of Briquettes Produced from Heated Sugarcane Straw

Abstract: Pressing time and temperatures are factors that can influence positively briquettes durability characteristics. This work aimed to analyze physical-mechanical characteristics of sugarcane straw briquettes, produced with different pressing times and two briquetting temperatures, 26 °C and 100 °C. The characterization of the biomass was made through the tests of proximate analysis and higher heating value (HHV). It was used particles smaller than 1.70 mm and moisture content of 11.5 %. Four types of briquettes/treatments were prepared with 15 replicates: A (control, 26 °C, 30 s), B (100 °C, 30 s), C (100 °C, 150 s), D (100 °C, 300 s). A hydraulic press was used to briquetting and a muffle was used to heating the cylindrical mold. The longitudinal expansion was measured 1, 2, 4, 6, 24, 48 and 72 hours after briquetting. Briquette resistance was performed by compression and friability test. The results were 80.87 % for volatiles, 5.41 % for ash content, 13.72 % for fixed carbon and 18360 J.g⁻¹ for HHV (in natura). The results showed that the use of temperature and the highest pressing time applied in briquetting increase the compressive strength, durability and density of the briquettes. Treatment D showed the greater resistance, apparent density and durability rating, which was 1.246 MPa, 0.979 g/cm³, 84.41 %, respectively.

Keywords: Sustainability; durability; bioenergy.

Resumo

Tempo de pressão e temperaturas são fatores que podem influenciar positivamente as características de durabilidade dos briquetes. Esse trabalho teve como objetivo analisar as características físico-mecânicas de briquetes de palha de cana-de-açúcar, produzidos com diferentes tempos de prensagem e duas temperaturas de briquetagem, 26 °C e 100 °C. A caracterização da biomassa foi feita através dos testes de análise química imediata e poder calorífico superior (PCS). As partículas utilizadas foram menores que 1,70 mm e 11,5 % de teor de umidade na amostra. Quatro tipos de briquetes/tratamentos foram preparados com 15 repetições cada: A (controle, 26 °C, 30 s), B (100 °C, 30 s), C (100 °C, 150 s), D (100 °C, 300 s). Para o processo de briquetagem foi utilizada uma prensa hidráulica e uma mufla para aquecer o molde cilíndrico. A expansão longitudinal foi mensurada 1, 2, 4, 6, 24, 48 e 72 horas após a briquetagem. Testes de compressão e friabilidade foram realizados para determinação da resistência dos briquetes. Ao final da caracterização, os valores encontrados foram de 80,87 % para voláteis, 5,41 % para teor de cinzas, 13,72 % para carbono fixo e 18360 J.g⁻¹ (PCS) (in natura). Os resultados apresentaram uma tendência de que o uso da temperatura e os maiores tempos de prensagem aplicados durante a briquetagem aumentam resistência à compressão, durabilidade e densidade dos briquetes. O tratamento D obteve a melhor resistência, densidade aparente e índice de durabilidade, que foi de 1,246 MPa, 0,979 g/cm³ e 84,41 %, respectivamente.

Palavras-chave: Sustentabilidade; durabilidade; bioenergia.

* Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Ciências Ambientais, Campus Sorocaba, CEP 18052-780, Sorocaba-SP, Brasil.

 fmyamaji@ufscar.br
DOI: [10.21577/1984-6835.20200070](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20200070)

Propriedades Físico-Mecânicas de Briquetes Produzidos com Palha de Cana-de-Açúcar em Alta Temperatura

Pedro Henrique de G. Fernandes,^a Gabriela T. Nakashima,^a Elias Ricardo D. Padilla,^b Luís Ricardo Oliveira Santos,^a Fábio Minoru Yamaji^{a,*}

^a Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Ciências Ambientais, *Campus Sorocaba*, CEP 18052-780, Sorocaba-SP, Brasil.

^b Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Departamento de Engenharia Mecânica, *Campus Guratinguetá*, CEP 12516-410, Guaratinguetá-SP, Brasil.

*fmyamaji@ufscar.br

Recebido em 15 de Julho de 2019. Aceito para publicação em 25 de Maio de 2020.

1. Introdução

2. Materiais e Métodos

2.1 Caracterização do material

2.2 Análise química imediata

2.3 Fabricação dos briquetes

2.4 Análises dos briquetes

2.5 Análise estatística

3. Resultados e Discussões

3.1 Umidade

3.2 Análise química imediata

3.3 Expansão longitudinal

3.4 Densidade aparente

3.5 Análises mecânicas

4. Conclusões

1. Introdução

Após a revolução industrial, a queima de combustíveis fósseis para a geração de energia se intensificou drasticamente atingindo níveis maiores após a década de 1970.¹ O consumo de energia global é atendida por 78% de fontes de energia fóssil como óleo, carvão e gás natural.² Contudo, nos últimos anos, os países vem buscando outras fontes de energia, principalmente as de origem renovável, que vem crescendo³ para que

possam atingir a demanda, diminuir a poluição ambiental e oferecer segurança energética.⁴

Dentre as fontes alternativas, a biomassa se mostra como uma opção viável para a geração de energia,⁵ pois sua combustão, em geral, é considerada um processo equilibrado de carbono. Visto que o CO₂ resultante do processo de queima foi previamente capturado da atmosfera pelas plantas, o resultado é o equilíbrio entre o carbono absorvido e o desprendido para o meio.⁶ A biomassa ainda é um recurso renovável derivado de resíduos agrícolas, florestais, entre outros,

podendo ser convertido em combustível sólido, líquido e gás, com aplicações no transporte, aquecimento e geração de eletricidade.⁷

Em 2018, 45,3% da oferta interna de energia no Brasil foi de origem renovável, com destaque para o uso de biomassa de cana-de-açúcar que representou 38,4% desta parcela.⁸ O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar, a safra de 2019/2020 foi estimada em 642,727 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), e o estado de São Paulo como responsável por mais de 50% desse total, com 340,871 milhões de toneladas.⁹

No entanto, a Lei Estadual 11.241/02 em São Paulo, que proíbe gradativamente o uso da queima da palha na colheita da cana-de-açúcar,¹⁰ acabou gerando um “novo” resíduo além do bagaço da cana-de-açúcar. Para áreas mecanizáveis a eliminação total da queima deverá ser consolidada até o ano de 2021. Áreas não mecanizáveis, com declividade superior a 12% e/ou menor que 150 hectares, se consolidará até o ano de 2031.¹⁰ Para cada tonelada de cana-de-açúcar colhida, há uma geração de 14% de palha.¹¹ Para a safra de 2019/2020, estima-se a geração de 89,98 milhões de toneladas de palha em todo o país, e 47,72 milhões somente no estado de São Paulo. Sendo este resíduo um potencial para fins energéticos.¹²

Mesmo com a alta disponibilidade o aproveitamento da palha de cana-de-açúcar apresenta dificuldades. Um dos maiores problemas é a baixa densidade deste tipo de material (<0,3 g/cm³) que resulta em alto custo de transporte, manuseio e estocagem, limitando o uso da biomassa para produção de energia. Para contornar esse problema, a briquetagem pode ser uma alternativa.¹³

A briquetagem é definida como a densificação de materiais particulados, melhorando parâmetros como aumento da densidade e homogeneidade.¹⁴ Ela pode ser definida também como o processo de reconstrução ou reconsolidação de material particulado por meio de temperatura e pressão a uma massa de partículas, podendo ou não contar com adição de elementos ligantes.¹⁵

Com a temperatura, tempo e atmosfera adequados utilizados na briquetagem, os produtos da biomassa têm maior densidade energética e alta hidrofobicidade.^{16,17} Quando há um aumento da temperatura de prensagem, a lignina pode atuar como ligante natural das partículas.¹⁸

Conforme o tempo de briquetagem aumenta, a resistência mecânica é elevada.¹⁹ Além dessas características, a biomassa briquetada é vantajosa pois reduz as emissões de partículas, padronizam o tamanho e pode ser uma boa substituição aos combustíveis de madeira natural.²⁰

A análise da qualidade da biomassa para uso energético é baseada em algumas características como umidade, densidade, carbono fixo, voláteis, cinzas e composição química, pois são características que afetam diretamente o poder calorífico da biomassa.²¹ Além disso, influenciam na facilidade de compactação da biomassa, estabilidade e durabilidade dos briquetes.²²

A avaliação da resistência mecânica dos briquetes é realizada pela estabilidade dimensional após a densificação, pelo ensaio de tração por compressão diametral e o teste de friabilidade (tamboramento).²² O ensaio de tração indica a resistência à compressão para corpos de prova cilíndricos, e o de tamboramento determina a resistência ao desgaste durante o transporte e manuseio dos briquetes.¹⁵

O objetivo do presente trabalho foi a caracterização energética da palha de cana-de-açúcar e analisar a influência da temperatura e tempo de prensagem na qualidade dos briquetes produzidos a partir desse material.

2. Materiais e Métodos

2.1. Caracterização do material

A palha de cana-de-açúcar utilizada para a produção dos briquetes foi coletada na “Fazenda Corredeira”, localizada no município de Ibaté – SP, Brasil (21° 57' 17" S/47° 59' 48" W).

Inicialmente com a ajuda de um moinho de facas tipo Willey Marconi MA 340, a palha foi triturada em partículas menores que 1,70 mm. Para a determinação do teor de umidade utilizou-se uma balança determinadora de umidade Marconi ID 200.

2.2. Análise química imediata

Os teores de cinzas, voláteis e carbono fixo foram determinados em triplicata, utilizando 1,00 g do material triturado, conforme metodologia prescrita na norma ASTM E870-13.²³ O teor de carbono fixo é dado pela Equação 1.

$$\% cf = 100 - (\% tc + \% tv) \quad (1)$$

Onde: % cf = teor de carbono fixo;

% tc = teor de cinzas;

% tv = teor de voláteis.

Os valores para o poder calorífico superior (PCS) foram realizados em triplicata conforme a norma ASTM D5865-13,²⁴ em uma bomba calorimétrica IKA C200, no estado in natura e após a briquetagem de cada tratamento.

2.3. Fabricação dos briquetes

Pré-testes variando a temperatura durante a briquetagem foram realizados para determinar a melhor temperatura para definir os tratamentos. Para a confecção dos briquetes foram utilizados 4 tratamentos com 15 repetições cada, totalizando 60 briquetes, os quais se basearam em diferentes tempos de prensagem e temperaturas (Tabela 1).

O teor de umidade da biomassa utilizada foi de 11,5%, estando de acordo com a literatura, que aconselha que o teor de umidade esteja entre 10% e 15%.²⁵ Todos os briquetes foram confeccionados com 20,00 g de material.

A briquetagem do material foi realizada em prensa hidráulica Marconi MPH-30. A pressão utilizada foi de 122,31 MPa e não houve adição de aglutinante. As dimensões do molde de aço inox utilizado foram de 160,00 mm de altura e 35,00 mm de diâmetro. Antes do início de cada briquetagem os moldes foram aquecidos em mufla até que atingissem temperaturas entre 110 °C e 100 °C. O monitoramento da temperatura do molde foi realizado no início e ao final do processo de prensagem de cada briquete utilizando termômetro infravermelho da marca Instrutemp ITTI 1000.

2.4. Análises dos briquetes

A metodologia para avaliar a expansão longitudinal (no sentido paralelo à compactação)

foi adaptado,²⁶ medindo-se a altura de todos os briquetes em intervalos de 1, 2, 4, 6, 24, 48 e 72 horas após a confecção dos briquetes, e uma última medição após 7 dias com o auxílio de um paquímetro digital da marca Insize com resolução de 0,01 mm, para então dar início aos ensaios mecânicos.

O ensaio de tração por compressão diametral foi realizado em uma máquina universal de ensaios EMIC – modelo DL30000, célula de carga de 500 kgf, seguindo a norma ABNT NBR 7222.²⁷ Foram utilizados 10 briquetes de cada tratamento e o software utilizado foi o Tesc versão 3.04.

Para o teste de tamboramento (friabilidade) utilizou-se 5 briquetes de cada tratamento previamente pesados utilizando uma balança analítica. O ensaio foi realizado utilizando um friabilômetro com 50 rpm durante 10 minutos, resultando no índice de durabilidade, de acordo com a norma UNE-EN 15210-1.²⁸

Ao final de 500 rotações, os finos gerados durante o ensaio foram separados utilizando uma peneira com abertura de 3,5 mm e calculado o índice de durabilidade (Equação 2).

$$DU = (mf/mi) * 100 \quad (2)$$

Onde: DU = índice de durabilidade em porcentagem;

mf = massa de briquetes retidos na peneira;

mi = massa total inicial utilizada no ensaio.

Seguido do teste de tamboramento, foi analisada a umidade de cada tratamento com os finos coletados.

2.5. Análise estatística

Os valores para variância foram verificados através da ANOVA, distinguindo se houve diferença significativa entre as médias dos tratamentos. Caso o p-valor for menor que o nível de significância, há diferença significativa. Pelo método de comparação de médias de Tukey, foi determinada qual média dos resultados foram significativamente diferente

Tabela 1. Tratamentos utilizados na produção dos briquetes

| Tratamentos | Temperatura (°C) | Tempo (s) |
|-------------|------------------|-----------|
| A | 26 | 30 |
| B | 100 | 30 |
| C | 100 | 150 |
| D | 100 | 300 |

dentre as demais, adotando-se um nível de 5% de significância. Os resultados foram processados no software Excel 2010.

3. Resultados e Discussões

3.1. Umidade

Os briquetes do tratamento A, que foram produzidos sem uso de aquecimento, ou seja, em temperatura ambiente (26 °C) durante a prensagem, mantiveram a umidade de 11,5%. Os tratamentos B, C e D que foram produzidos com 100 °C durante a briquetagem, apresentaram um valor de 8,5% para umidade. Portanto, pode-se dizer que a temperatura adicionada no processo de briquetagem tem influência na evaporação de água da biomassa.

3.2. Análise química imediata

Os resultados da análise química imediata da palha de cana-de-açúcar são apresentados na Tabela 2.

Para voláteis, que expressa a facilidade de queima do material,²⁹ o teor foi de 80,87%, estando dentro do intervalo encontrado nos valores da literatura, que variam de 84,5%¹¹ a 70,59%³⁰ e também foi observado valores medianos, como 77,50%.²⁶

O valor do teor de cinzas obtido nas análises do presente trabalho foi de 5,41%, enquanto que na literatura o valor encontrado variou entre 2,7% a 3,9%,^{11,31} entretanto, houve trabalhos que obtiveram 5,68%.²⁶ Esse alto valor para o teor de cinzas pode ser resultante da contaminação (impurezas) da amostra. Após a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, a palha fica depositada no campo. O recolhimento da palha é feita por máquinas que

fazem a varrição e o enleiramento; enfardamento e carregamento e finalmente o transporte e estoque. Essas operações acabam misturando partículas de terra/areia na palha de cana-de-açúcar coletada.

Em relação ao teor de carbono fixo, o resultado (13,72%) está dentro do intervalo de valores encontrados na literatura, que variaram de 11,6%,¹¹ 17,22%³⁰ e 16,81%.²⁶

O poder calorífico da biomassa não diferiu antes e depois do processo de briquetagem (Tabela 3).

Os valores encontrados para PCS não tiveram diferença entre os tratamentos. Esse resultado era esperado, uma vez que o material utilizado na produção dos briquetes foi o mesmo. Os resultados mostram que a aplicação de temperatura e tempo no processo de briquetagem não alterou o poder calorífico do material. Os resultados se mostraram maiores quando comparado com a literatura, em que encontraram 17490 J/g e 15630 J/g.^{26,30} Estes valores podem ser justificados pelos diferentes cultivares existentes da cana-de-açúcar.¹² Ou seja, cada material genético apresentará diferentes características. Outro fator que pode interferir no poder calorífico é o sistema utilizado para o recolhimento da palha. Quanto maior o teor de impurezas (cinzas), menor o PCS.

3.3. Expansão longitudinal

Ao término da briquetagem, alguns briquetes do tratamento B apresentaram rachaduras, enquanto os briquetes dos demais tratamentos permaneceram concisos (Figura 1).

Esse fator pode ser explicado pelo baixo tempo de retenção da prensagem (30 s) do tratamento B. Nesse intervalo de tempo de 30 s, a diminuição da temperatura do molde foi de 10 °C. A rachadura indica que essa diminuição de temperatura não foi suficiente para permitir a liberação da pressão da prensa hidráulica. Nos tratamentos C e D, a

Tabela 2. Resultados da análise química imediata da palha de cana-de-açúcar

| Biomassa | Voláteis (%) | Teor de cinzas (%) | Carbono fixo (%) |
|-------------------------|--------------|--------------------|------------------|
| Palha-de-cana de açúcar | 80,87 ± 0,11 | 5,41 ± 0,08 | 13,72 |

Tabela 3. Resultados da análise dos Poderes Caloríficos Superiores da biomassa in natura e após os tratamentos de briquetagem

| Natura | Poder Calorífico Superior (J/g) | | | |
|--------|---------------------------------|-----------------|------------------|------------------|
| | A (26 °C/30 s) | B (100 °C/30 s) | C (100 °C/150 s) | D (100 °C/300 s) |
| 18360 | 18533 | 18250 | 18273 | 18388 |

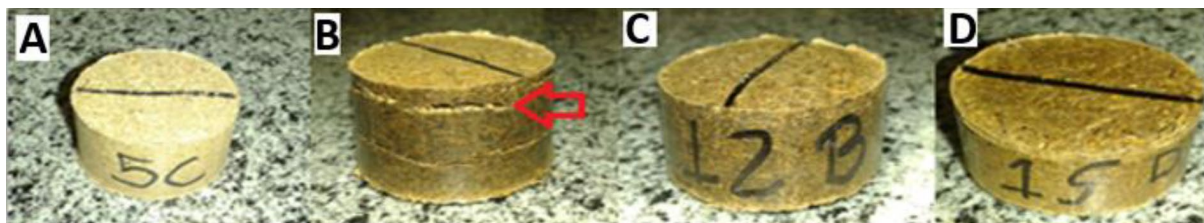


Figura 1. Da esquerda para a direita, fotos dos briquetes dos tratamentos A, B, C e D

temperatura final do molde apresentou uma diminuição de cerca de 25 °C a 30 °C. Nessas condições, a retirada de pressão resultou em briquetes agregados e sem rachaduras. O tratamento A também não apresentou esse fenômeno, pois não foi adicionado temperatura durante a briquetagem.

Esse fato se baseia na questão de que quanto maior a pressão exercida sobre a água, maior será o ponto de ebulição,³² portanto, a chance de rupturas no briquete será maior quando se liberar a pressão da briquetagem e o molde ainda estiver em temperaturas próximas a 100 °C. Isso mostra que o ideal seria aumentar o tempo de resfriamento do molde.

Na análise de Tukey das médias de expansão, somente o tratamento A diferiu dos outros tratamentos, e foi o único que não apresentou redução no tamanho dos briquetes após a prensagem. Já os tratamentos B, C e D apresentaram redução no tamanho dos briquetes após a prensagem. Essa redução foi devida à perda de água para o meio durante a estabilização da expansão, portanto as médias expansivas se mostraram negativas (Tabela 4).

Para auxiliar na identificação do comportamento de cada tratamento ao longo tempo, foi elaborado um gráfico (Figura 2).

A expansão do tratamento A foi de 9,68% em 72 horas, já os outros tratamentos, obtiveram uma

Tabela 4. Média de expansão em porcentagem para cada tratamento

| Tratamentos | Média expansiva (%) |
|-----------------|---------------------|
| A (26 °C/30s) | 9,68 a |
| B (100 °C/30s) | -2,72 b |
| C (100 °C/150s) | -2,98 b |
| D (100 °C/300s) | -2,37 b |

*Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, ao nível de significância de 5 % no teste de Tukey

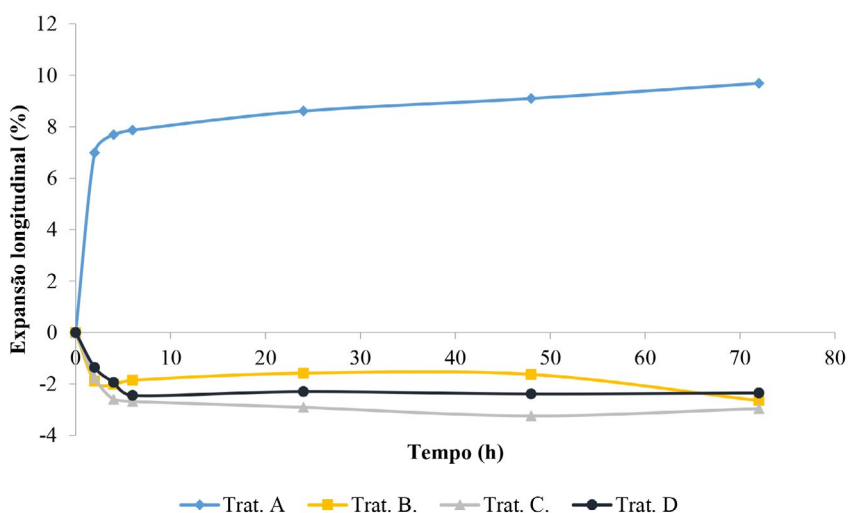


Figura 2. Gráfico de expansão longitudinal em porcentagem para cada tratamento

redução após o processo de briquetagem, com uma taxa de redução entre 2% e 3%. Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato da biomassa perder água por evaporação devido a utilização de aquecimento durante a prensagem. A redução de volume nos tratamentos com altas temperaturas pode ser explicado pela perda de água.³³

Mesmo com a redução do tamanho dos briquetes, houve um aumento da estabilidade nos tratamentos B, C e D. Os briquetes produzidos com aquecimento obtiveram uma estabilidade dimensional 6h após a prensagem. Em briquetes produzidos com palha de trigo, com temperaturas superiores a 80 °C durante a briquetagem, as amostras apresentaram uma melhora na estabilidade,³⁴ sugerindo que as finas camadas de cera da palha poderiam ser responsáveis, pois forneceriam aderência plástica entre as fibras. A partir dos resultados obtidos pode-se dizer que o uso de aquecimento no processo prensagem aumenta a estabilidade dimensional dos briquetes.

3.4. Densidade aparente

Maiores densidades aparentes (Tabela 5) indicam mais massa disponível em um mesmo volume de material de forma que maiores densidades, apresentam maior potencial energético.³⁵

Tratamentos que receberam os maiores tempos de prensagem obtiveram as maiores densidades em relação aos tratamentos que foram produzidos com 30 segundos de prensagem. Os resultados mostram que, mesmo com o uso de aquecimento na prensagem, o tratamento B não diferiu do tratamento A. Esse resultado pode ser explicado devido à expansão dos briquetes do tratamento B logo após a prensagem, evidenciado pelas rachaduras apresentadas. Os tratamentos C e D não tiveram diferenças estatísticas para a densidade, indicando que o tempo de prensagem de 150s foi suficiente.

Para briquetes de palha de cana-de-açúcar produzidos com 8 minutos de prensagem, sem aquecimento e sem adição de aglutinantes, encontraram o valor médio de 0,841 g/cm³.¹⁹ Entretanto, quando comparado ao do presente trabalho, a densidade se enquadra nos valores obtidos nos tratamentos A e B.

Em briquetes produzidos com capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) prensados a 14,97 MPa e 118 °C, pesquisadores encontraram valores de densidade acima de 1,3 g/cm³.³⁶ Tais valores ultrapassam a densidade máxima obtida no presente trabalho, podendo ser explicado pela alta temperatura utilizada durante a compactação.

Em briquetes de palha de cana-de-açúcar produzidos com 30 segundos, sem aquecimento e sem aglutinantes, pesquisadores encontraram um valor para densidade de 0,841 g/cm³ estando de acordo com o valor obtido no presente trabalho.

3.5. Análises mecânicas

O teste de resistência à compressão define a força máxima que o briquete pode suportar antes da ruptura durante o armazenamento.³⁷

Todos os tratamentos diferiram entre si no teste de tração por compressão diametral (Tabela 6).

Observando os valores encontrados, pode-se dizer que há uma relação positiva entre resistência mecânica e temperatura e tempo de prensagem. Os tratamentos que foram produzidos com maior tempo de prensagem e aquecimento obtiveram maior resistência mecânica. Utilizando o tratamento A (controle) como referência no valor de resistência máxima, os tratamentos B, C e D tiveram um aumento de 138%, 308% e 463% respectivamente (Figura 3).

A resistência mecânica tende a crescer de maneira linear quando há a adição de maiores tempos de pressão e temperatura durante a briquetagem, culminando em maior resistência quando uma força

Tabela 5. Densidade média aparente para cada tratamento

| Tratamentos | Densidade (g/cm ³) |
|------------------|--------------------------------|
| A (26 °C/30 s) | 0,855 a |
| B (100 °C/30 s) | 0,835 a |
| C (100 °C/150 s) | 0,941 b |
| D (100 °C/300 s) | 0,979 b |

*Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, ao nível de significância de 5 % no teste de Tukey

Tabela 6. Valores de força máxima e resistência suportado pelos briquetes por tratamento

| Tratamentos | Força máxima (N) | Resistência máxima (MPa) |
|----------------|------------------|--------------------------|
| A (26°C/30s) | 283,79 | 0,221 a |
| B (100°C/30s) | 585,74 | 0,527 b |
| C (100°C/150s) | 946,99 | 0,902 c |
| D (100°C/300s) | 1298,43 | 1,246 d |

*Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, ao nível de significância de 5 % no teste de Tukey

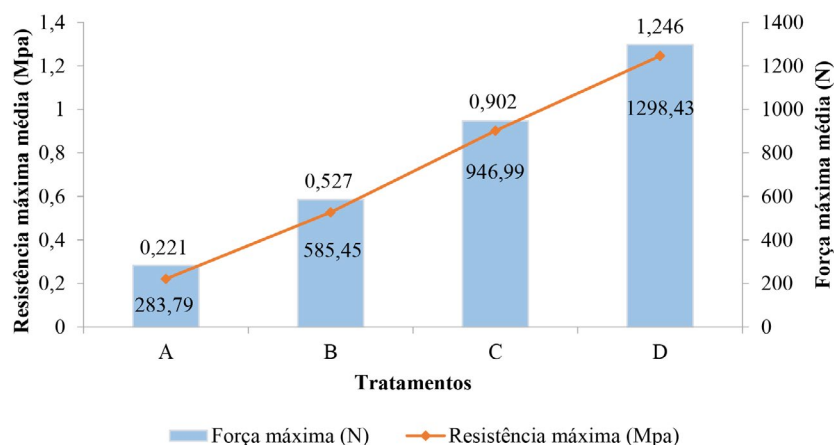


Figura 3. Gráfico de resistência máxima média e força máxima média por tratamento

máxima é aplicada.¹⁹ O tratamento que apresentou maior resistência foi o D, atingindo uma resistência mecânica de 1,246 MPa.

Já em relação ao tratamento controle, o valor de resistência máxima de 0,22 MPa ficou bem próximo do valor encontrado na literatura (0,24 MPa).²⁶ O valor encontrado para briquetes com 30 segundos de prensagem, sem aquecimento e sem adição de aglutinante foi de 0,270 MPa.³⁰

O ensaio de tamboramento (friabilidade) (Figura 4) pode ser usado como complemento ao teste de tração por compressão diametral, cuja principal função é analisar o desgaste dos briquetes durante o transporte/manuseio.³⁷

O gráfico sugere que a adição de temperatura durante a briquetagem é um importante fator para o aumento da durabilidade dos briquetes, notando-se um aumento na durabilidade quando o aquecimento

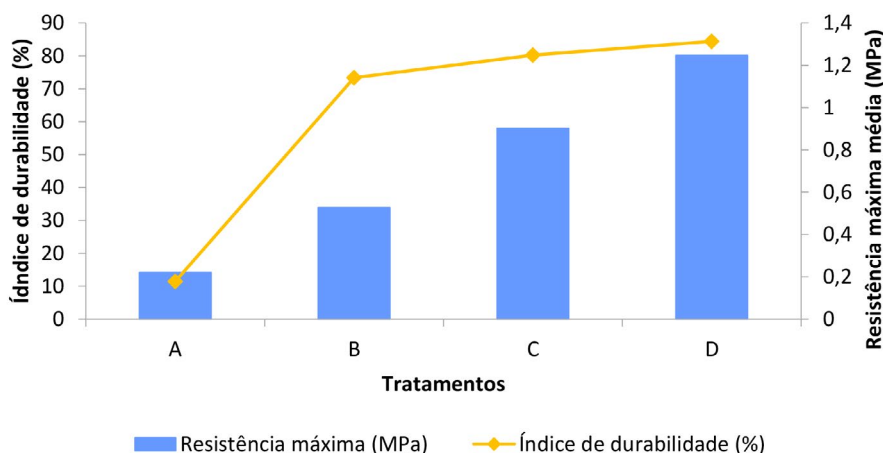


Figura 4. Gráfico do índice de durabilidade em relação à resistência máxima média em porcentagem para cada tratamento

é adicionado ao processo. Em relação ao tratamento A, os tratamentos B, C e D obtiveram um aumento de 540%, 600% e 611%, respectivamente.

Estudos realizados com palhas de trigo, aveia, canola e cevada, mostraram uma correlação positiva quanto ao índice de durabilidade quando produzidos com adição de temperaturas maiores que 123 °C, podendo obter mais de 90% de durabilidade dos briquetes.³⁸

Briquetes de cana-de-açúcar produzidos por outros autores pesquisados se mostraram muito friáveis (30% ou menos de durabilidade).^{26,30}

4. Conclusões

Maiores tempos de prensagem e temperaturas são fatores que resultaram no aumento da resistência mecânica, densidade aparente e durabilidade dos briquetes. O tratamento que apresentou as melhores características (maior densidade e maior resistência mecânica) foi o tratamento D, produzido com 100 °C e 300 segundos de prensagem.

O uso de aquecimento na prensagem não alterou o poder calorífico dos briquetes. Entretanto, como o aumento da densidade aparente significa maior quantidade de massa num mesmo volume, briquetes com maior densidade (tratamentos C e D) foram considerados de melhor qualidade para uso energético.

Referências Bibliográficas

- ¹Pearce, F.; *O aquecimento global*, 2a. ed., Publifolha: São Paulo, 2002.
- ²Enerdata, Global Energy Statistical Yearbook 2019. Disponível em: <<https://yearbook.enerdata.net/oil-products/world-oil-domestic-consumption-statistics.html>>. Acesso em: 1 maio 2020.
- ³BP; *BP Statistical Review of World Energy 2019*, 68th. ed., BP Statistical: London 2019. [Link]
- ⁴Bilgili, F.; Koçak, E.; Bulut, Ü.; Kuskaya, S. Can biomass energy be an efficient policy tool for sustainable development? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2017**, *71*, 830. [CrossRef]
- ⁵Schueler, V.; Weddige, U.; Beringer, T.; Gamba, L.; Lamers, P. Global biomass potentials under sustainability restrictions defined by the European Renewable Energy Directive. *GCB Bioenergy* **2013**, *5*, 652. [CrossRef]
- ⁶Lackner, K. S. A guide to CO₂ sequestration. *Science* **2003**, *300*, 1677. [CrossRef]
- ⁷Akorede M. F.; Hizam H.; Ab Kadir M. Z. A.; Aris I.; Buba S. D. Mitigating the anthropogenic global warming in the electric power industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2012**, *16*, 2747. [CrossRef]
- ⁸Balanço Energético Nacional, *Relatório Síntese*, Ministério de Minas e Energia, 66, 2019. [Link]
- ⁹Conab. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar safra 2019/20; Terceiro Levantamento – Relatório Técnico. Brasília, 2019. [Link]
- ¹⁰São Paulo. Lei nº 11.241, de 19 de setembro de 2002. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. [Link]
- ¹¹Hassuani, S. J.; Leal, M. R. L. V.; Macedo, I.; *Biomass power generation: Sugar cane bagasse and trash*, 1a. ed., United Nations Development Program and Centro de Tecnologia Canavieira: Piracicaba, 2005.
- ¹²Landell, M. G. de A.; Scarpari, M. S.; Xavier, M. A.; dos Anjos, I. A.; Baptista, A. S.; de Aguiar, C. L.; da Silva, D. N.; Bidóia, M. A. P.; Brancalião, S. R.; Bressiani, J. A.; de Campos, M. F.; Miguel, P. E. M.; da Silva, T. N.; da Silva, V. H. P.; Anjos, L. O. S.; Ogata, B. H. Residual biomass potential of commercial and pre-commercial sugarcane cultivars. *Scientia Agricola* **2013**, *70*, 299. [Link]
- ¹³Kaliyan, N.; Morey, R. V.; Natural binders and solide bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. *Bioresource Technology* **2010**, *101*, 1082. [CrossRef]
- ¹⁴Granada, E.; López González, L. M.; Mpiiguez, J. L.; Moran, J. Fuel lignocellulosic briquettes, die design and products study. *Renewable Energy* **2012**, *27*, 561. [CrossRef]
- ¹⁵Quirino, W. F.; Brito, J. O.; *Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal*, IBAMA, Laboratório de Produtos Florestais: Brasília, 1991. [Link]
- ¹⁶Chen, W. H.; Kuo, P. C. A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry. *Energy* **2010**, *32*, 2580. [CrossRef]
- ¹⁷Wang, C.; Peng, J.; Li, H.; Bi, X. T.; Legros, R.; Lim, C.; Sokhansanj, S. Oxidative torrefaction of biomass residues and densification of torrefied sawdust to pellets. *Bioresource Technology* **2013**, *127*, 318. [CrossRef]
- ¹⁸Chen, L. J.; Xing, L.; Hana, L. Renewable energy from agro-residues in China: solid biofuels and biomass briquetting technology. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **2009**, *13*, 2689. [CrossRef]

- ¹⁹Ramos e Paula, L. E.; Trugilho, P. F.; Rezende, R. N.; Assis, C. O.; Baliza, A. E. R. Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. *Pesquisa Florestal Brasileira* **2011**, *31*, 103. [[CrossRef](#)]
- ²⁰Ndiema, C.; Manga, P. N.; Ruttoh, C. R. Influence of die pressure on relaxation characteristics of briquetted biomass. *Energy Conversion and Management* **2002**, *43*, 2157. [[CrossRef](#)]
- ²¹Vale, A. T.; Mendes, R. M.; Amorim, M. R. S.; Dantas, V. F. de S. Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e da torta de pinhão manso (*Jatropha curcas*), *Cerne*, **2011**, *17*, 267. [[CrossRef](#)]
- ²²Yamaji, F. M.; Vendrasco, L.; Christomo, W.; Flores, W. P. Análise do comportamento higroscópico de briquetes. *Energia na Agricultura* **2013**, *28*, 11. [[CrossRef](#)]
- ²³ASTM E870-82, Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013. [[CrossRef](#)]
- ²⁴ASTM D5865-13, Standard Test Methods for Gross Calorific Value of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013. [[Link](#)]
- ²⁵Tripathi, A. K.; Iyer, P. V. R.; Kandpal, T. C. A techno-economic evaluation of biomass briquetting in India. *Biomass and Bioenergy* **1998**, *14*, 479. [[CrossRef](#)]
- ²⁶Padilla, E. R. D.; Adhmann, I. C.; Yamaji, F. M.; Fandino, J. M. M. Produção e Caracterização Físico-Mecânica de Briquetes de Fibra de Coco e Palha de Cana-de-Açúcar. *Revista Virtual de Química* **2016**, *8*, 1334 [[CrossRef](#)].
- ²⁷ABNT NBR 7222, Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos, Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, 2011. [[Link](#)]
- ²⁸UNE – EN 15210-1, Biocombustíveis sólidos – Determinación de la durabilidad mecánica de pélets y briquetas, Asociación Española de Normalización y Certificación: Madrid, España, **2010**. [[Link](#)]
- ²⁹Tavares, S. R. L.; Santos, T. E. Uso de diferentes fontes de biomassa vegetal para produção de biocombustíveis sólidos. *Holos* **2013**, *29*, 19. [[CrossRef](#)]
- ³⁰Aleixo, D. S.; Nakashima, G. T.; Barros, J. L.; Róz, A. L.; Yamaji, F. M. Caracterização de Biomassas para Briquetagem. *Floresta* **2015**, *45*, 713. [[CrossRef](#)]
- ³¹Leal, M. R. L. V.; Galdos, M. V.; Scarpate, F. V.; J. Seabra, E. A.; Walter, A.; Oliveira, C. O. F. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review. *Biomass and Bioenergy* **2013**, *53*, 11. [[CrossRef](#)]
- ³²Haynes, W. M.; *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 94th ed. Taylor & Francis: Florida, 2014.
- ³³Boas, M. A. V.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Viçosa, Brasil, 2011.
- ³⁴Smith, I. E.; Probert, S. D.; Stokes, R. E.; Hansford, R. J. The Briquetting of Wheat Straw. *Journal of Agricultural Engineering Research* **1977**, *22*, 105. [[CrossRef](#)]
- ³⁵Brand, M. A.; *Energia da biomassa florestal*, 1a ed., Interciência: Rio de Janeiro, 2010.
- ³⁶Lima, J. S.; Ribeiro, M. X; Amorim, F. S.; Borges, C. H. A.; Souza, M. P.; Abreu, Y. K. L. Produção e avaliação de briquetes de capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) cultivados com doses de nitrogênio. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável* **2016**, *11*, 29. [[CrossRef](#)]
- ³⁷Kambo, H. S.; Dutta, A. Strength, storage, and combustion characteristics of densified lignocellulosic biomass produced via torrefaction and hydrothermal carbonization. *Applied Energy* **2014**, *135*, 188. [[CrossRef](#)]
- ³⁸Tumuluru, J. S.; Tabil, L. G.; Song, Y.; Iroba, K. L.; Meda, V. Impact of process conditions on the density and durability of wheat, oat, canola, and barley straw briquettes. *Bioenergy Research* **2015**, *8*, 388. [[CrossRef](#)]