

## Artigo

**Uso de Blendas Contendo Diferentes Proporções de Palha e Bagaço de Cana-de-Açúcar para Produção de Briquete****Masullo, L. S.; Sant'Anna Alesi, L.; Quadros, T. M. C.; da Silva, D. A.; de Pádua, F. A.; Yamaji, F. M.\****Rev. Virtual Quim.*, 2018, 10 (3), 641-654. Data de publicação na Web: 15 de maio de 2018<http://rvq.sbq.org.br>**Use of Blends Containing Different Proportions of Straw and Sugarcane Bagasse for the Production of Briquettes**

**Abstract:** Briquettes and pellets can be an option to produce biofuels made by agricultural residues compression. Therefore, this study aims at provide the characterization of the briquettes made by different residual concentrations of sugar bagasse and straw. Concerning this, we determined rapid analysis and mechanical resistance. Our mechanical test determined the briquettes resistance and friability. The results showed better characteristics of bagasse for briquettes formation, such as lower ash and higher fixed carbon content. Considering the compression resistance, the sugar cane bagasse briquettes in a high concentration had better results. Besides, these briquettes were more resistance to break on the tumbling test. However, briquettes produced with both residues showed feasible results. Thus, the use of blends can be a viable alternative for the use of sugarcane residues.

**Keywords:** Biomass; bioenergy; compression; technological property; wastes.

**Resumo**

A produção de briquetes e pellets pode ser uma forma de obtenção de biocombustíveis a partir da compactação de resíduos vegetais. O objetivo deste trabalho foi caracterizar a qualidade de briquetes produzidos a partir de blendas de bagaço e palha da cana-de-açúcar. Determinou-se a análise imediata e a resistência mecânica. Os resultados mostraram que o bagaço e a palha apresentaram diferente comportamento no processo de briquetagem, tendo o bagaço melhores características primordiais para formação de briquetes (como menor teor de cinzas e maior teor de carbono fixo). Nos testes mecânicos, os briquetes produzidos com maiores proporções de bagaço (75 % e 100 %) apresentaram melhores resultados de resistência à compressão além de demonstrarem maior resistência à quebra no teste de tamboramento. Concluiu-se que o uso de palha da cana para a produção de briquetes só se torna viável na composição mista. O uso de blendas pode ser uma alternativa viável para o aproveitamento dos resíduos de cana-de-açúcar.

**Palavras-chave:** Biomassa; bioenergia; compactação; propriedade tecnológica; resíduos.

\* Universidade Federal de São Carlos, Grupo de Pesquisa Biomassa e Bioenergia, Departamentos de Ciências Ambientais, Campus de Sorocaba, CEP 18052-780, Sorocaba-SP, Brasil.

✉ [fmyamaji@ufscar.br](mailto:fmyamaji@ufscar.br)

DOI: [10.21577/1984-6835.20180047](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180047)

## Uso de Blendas Contendo Diferentes Proporções de Palha e Bagaço de Cana-de-Açúcar para Produção de Briquete

Liamara S. Masullo,<sup>a</sup> Letícia S. Alesi,<sup>b</sup> Taruhim M. C. Quadros,<sup>b</sup> Diego A. da Silva,<sup>b</sup> Franciane A. de Pádua,<sup>b</sup> Fabio M. Yamaji<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Universidade de São Paulo, ESALQ, Departamentos de Ciências Florestais, Campus de Piracicaba, CEP 13418-900, Piracicaba-SP, Brasil.

<sup>b</sup> Universidade Federal de São Carlos, Grupo de Pesquisa Biomassa e Bioenergia, Departamentos de Ciências Ambientais, Campus de Sorocaba, CEP 18052-780, Sorocaba-SP, Brasil.

\* [fmyamaji@ufscar.br](mailto:fmyamaji@ufscar.br)

*Recebido em 17 de abril de 2018. Aceito para publicação em 12 de maio de 2018*

### 1. Introdução

### 2. Material e Métodos

- 2.1. Preparação do material para a briquetagem
- 2.2. Caracterização química da matéria prima
- 2.3. Análise Física dos briquetes
- 2.4. Análise dos dados

### 3. Resultados e Discussão

- 3.1. Preparação do material para a briquetagem
- 3.2. Caracterização química da matéria prima
- 3.3. Análise Física dos briquetes

### 4. Conclusão

## 1. Introdução

Com uma extensa e diversificada reserva energética, o Brasil possui aproximadamente 45 % de sua demanda primária por energia gerada a partir de fontes renováveis, tornando o setor energético brasileiro um dos menos intensivo em carbono do mundo.<sup>1</sup> Dentre as principais fontes renováveis responsáveis pela matriz energética limpa do

país destacam-se a biomassa da cana-de-açúcar (18 %), a energia hidráulica (13 %) e a lenha e carvão vegetal (8 %).<sup>2</sup>

O Brasil é o principal produtor mundial de cana-de-açúcar, representando 38 % da produção mundial em 2016<sup>3</sup> e com cerca de 8,8 milhões de hectares plantados em 2017<sup>4</sup>. Contudo, há uma grande problemática relacionada à destinação dos resíduos culturais, especialmente da palha e do bagaço. Para cada tonelada de cana-de-

açúcar utilizada na produção sucroalcooleira são produzidas em média 560 kg de resíduos (bagaço e palha)<sup>5</sup>, gerando anualmente 15 t ha<sup>-1</sup> de resíduos de cana.<sup>6</sup>

A cultura da cana no Brasil está associada à queima da palha, que pode liberar grande quantidade de gases do efeito estufa, reduzindo a eficiência energética associada à cultura.<sup>7</sup> A queima dos canaviais é uma técnica de manejo que foi largamente utilizada no passado e que vem sofrendo restrições na atualidade por questões ambientais. O Decreto Federal nº 2.661, de 8 de julho de 1998, estipulou a redução gradativa do emprego do fogo como método facilitador do corte de cana-de-açúcar em um período de 20 anos, estimulando o aumento da colheita mecanizada<sup>8</sup> e a geração de resíduos na forma de palha<sup>6</sup>.

Os resíduos agrícolas são importante depósito energético, sendo melhor aproveitados na forma de briquetes e pellets.<sup>9</sup> Resultantes da compactação de materiais lignocelulósicos, os briquetes são responsáveis pela geração de energia na forma de calor e utilizados como substitutos da lenha em muitas aplicações. As características dos materiais utilizados na produção de briquetes pode influenciar suas propriedades tecnológicas, dificultando seu posterior transporte e armazenamento.<sup>10</sup> Neste sentido, o preparo de blendas, ou seja, misturas de materiais com diferentes características, como por exemplo, higroscopicidade, pode ser uma alternativa técnica para tentar atenuar esses problemas.<sup>11</sup>

Devido à sua constituição química, a palha apresenta grande potencial para produção de energia, uma vez que é rica em compostos lignocelulósicos: celulose (40 %), hemicelulose (30%) e lignina (25 %)<sup>12</sup>. Igualmente, destaca-se o bagaço, outro resíduo proveniente da indústria sucroalcooleira, que possui potencial energético<sup>13</sup>, com teores de 23 % de celulose, 19 % de hemicelulose e 23 % de lignina<sup>12</sup> e poder calorífico próximo a 4000 kcal kg<sup>-1</sup><sup>14</sup>. Portanto, pesquisas para o aprimoramento das técnicas de utilização de resíduos da

atividade canavieira para fins energéticos se tornam uma oportunidade de destinação dos mesmos, podendo contribuir para a melhoria da eficiência energética da cultura.

Assim, este trabalho estudou o potencial de produção de briquetes a partir de resíduos da cana-de-açúcar, especificamente caracterizando as qualidades físico-mecânicas de briquetes em diferentes proporções de bagaço e de palha da cana-de-açúcar.

## 2. Material e Métodos

Para a produção dos briquetes foram utilizados resíduos de cana-de-açúcar coletados na Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo (CEAGESP) localizado na cidade de Sorocaba-SP.

### 2.1. Preparação do material para a briquetagem

Os materiais utilizados para a formação das blendas (bagaço e palhada) foram levados ao laboratório onde foram submetidos inicialmente ao teste do teor de umidade. Para isto, uma amostra de 20 g do material úmido foi pesada e levada à estufa a 65 °C até apresentar massa constante, sendo posteriormente transferido a um dessecador. O teor de umidade foi calculado utilizando a equação 1.

$$TU = \frac{mu - ms}{ms} \quad \text{Eq. 1}$$

Em que:  $TU$  = teor de umidade da amostra;  $mu$  = massa inicial da amostra (aproximadamente 20 g);  $ms$  = massa seca da amostra.

O restante do material foi seco a 60 °C, triturado em moinho tipo Wiley. O material moído foi utilizado para a produção das blendas e confecção dos briquetes.

Para determinação da densidade a granel e granulometria do material utilizado nas blendas foi utilizada a norma ABNT NBR 7402/82.<sup>15</sup> As análises de umidade foram feitas em uma balança determinadora de umidade, pois para o processo de briquetagem é conveniente que as partículas

estejam com teor de umidade entre 10 e 15 %.<sup>16</sup>

As blendas do bagaço de cana-de-açúcar e da palha, nas proporções propostas para a briquetagem, estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Composição percentual das blendas de cana-de-açúcar e palhada para o processo de briquetagem

Tratamento	Composição (%)	
	Bagaço	Palha
1	0	100
2	25	75
3	50	50
4	75	25
5	100	0

## 2.2. Caracterização química da matéria prima

A análise química imediata dos materiais envolve a umidade e os teores de voláteis, de cinzas e de carbono fixo. Por meio dela é feita a caracterização química do material, determinando a quantidade de água e o teor de material residual após a combustão, e assim a sua potencialidade como combustível.<sup>17</sup>

O procedimento para a determinação do teor de voláteis foi realizado com base na norma ASTM D- 3175.<sup>18</sup> Foi pesado cerca de 1 g de massa seca do material de cada tratamento, adicionando-os a um cadinho de porcelana calcinado. Esses foram levados à mufla previamente aquecida a 980 °C por 3 minutos com porta aberta e, em seguida, por 7 minutos com porta fechada. Os cadinhos foram retirados da mufla, e após alguns minutos resfriando no dessecador, foram pesados. Para o cálculo foi utilizada a equação 2.

### 2.2.1. Determinação de compostos voláteis

$$\text{Teor de voláteis} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad \text{Eq. 2}$$

Em que: ***m<sub>i</sub>*** é a massa inicial e ***m<sub>f</sub>*** a massa final.

### 2.2.2. Determinação do teor de cinzas

De cada material seco, 1 g foi pesado e

colocado em cadinho de porcelana calcinado. Os cadinhos foram levados ao bico de Bunsen durante alguns minutos até a diminuição das chamas, evitando possíveis perdas de material dentro da mufla no momento da combustão. Os cadinhos foram levados à

mufla a 600 °C durante seis horas. Após esse procedimento fez-se a pesagem do material final. Todo o procedimento foi realizado de acordo com a norma ASTM D - 3174.<sup>19</sup> Para o cálculo foi utilizada a equação 3.

$$\text{Teor de cinzas} = \frac{mc}{mi} \times 100 \quad \text{Eq. 3}$$

Em que:  $mi$  = massa inicial da amostra;  $mc$  = massa de cinza contida no cadinho após o procedimento.

*carbono fixo*

O teor de carbono fixo (TCFixo) foi calculado a partir dos dados de teor de voláteis e cinzas, segundo a equação 4.

#### 2.2.2. Determinação do teor de

$$\text{Teor de carbono fixo} = 100 - (\text{Teor de voláteis} + \text{Teor de cinzas}) \quad \text{Eq. 4}$$

### 2.3. Análise Física dos briquetes

#### 2.3.1. Confeção e expansão longitudinal

Os briquetes foram confeccionados com um molde de metal de 35 mm de espessura interna, utilizando 20 g de material com umidade variando entre 11 % e 12 % de umidade relativa. O material foi compactado sem aquecimento e sem aglutinante em uma briquetadeira (Marcon MPH-15) a 12 t, durante 30 segundos. Após a confecção, foram mensurados a altura e o diâmetro dos briquetes, com um paquímetro digital. Essas medições foram repetidas após 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 12 h, 24 h e 48 h a partir da confecção dos briquetes. Na última medição, foi realizada pré-ensaio mecânico, aos 35 dias após a confecção. Os briquetes foram mantidos em dessecador desde a compressão até a realização dos ensaios mecânicos.

#### 2.3.2. Densidade aparente dos briquetes

A massa dos briquetes foi determinada com uma balança semi-analítica e o volume foi estimado utilizando as medidas de altura e diâmetro obtidos por meio de um paquímetro. A densidade aparente dos briquetes foi calculada por meio da razão entre a massa e o volume de cada briquete. Assim como para a expansão longitudinal, a densidade aparente dos briquetes foi calculada após 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 12 h, 24 h e 48 h da confecção, e uma última vez antes da realização dos ensaios mecânicos (pré-ensaio).

### 2.4. Ensaios mecânicos

Nos ensaios mecânicos, foram realizados testes de compressão simples e de tamboramento. Para o teste de resistência à compressão foi utilizada uma máquina universal de ensaios (EMIC- modelo DL 30.000) com capacidade máxima de 30.000 kgf (300 kN), empregando uma célula de carga de 500 kgf a uma velocidade de 3 mm min<sup>-1</sup>, com o carregamento sendo aplicado no sentido perpendicular ao eixo longitudinal dos briquetes.

O teste de tamboramento foi realizado com base na norma ABNT – 8740.<sup>20</sup> Após o procedimento, os resíduos foram

classificados com a peneira de 20 mm e pesados. Para o cálculo das perdas, foi utilizado a equação 5.

$$\text{Teor de Perdas} = \frac{mf}{mi} \times 100 \quad \text{Eq. 5}$$

Em que:  $mi$  é a massa inicial e  $mf$  a massa final.

### 2.5. Análise dos dados

A análise dos dados foi realizada em delineamento inteiramente casualizado. Os testes de Shapiro-Wilk e de Box-cox foram utilizados para aferição da normalidade e de heterocedasticidade dos dados. Foram aplicadas aos dados, a análise de variância (ANOVA) e a comparação das médias pelo teste de Tukey ( $p=0,05$ ). Para a realização dos testes estatísticos, foi utilizado o programa estatístico R.<sup>21</sup>

## 3. Resultados e Discussão

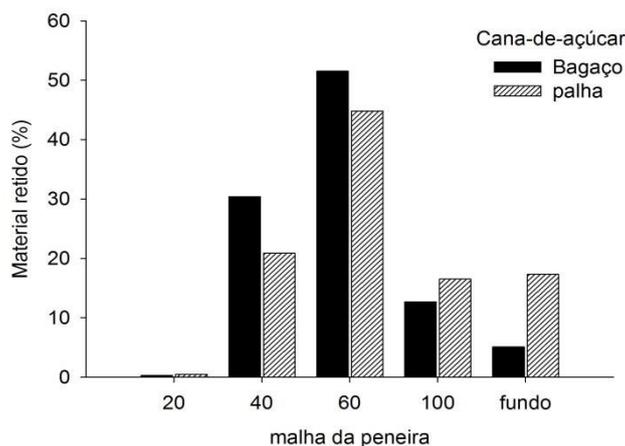
### 3.1. Preparação do material para a briquetagem

O teor de umidade encontrado para o bagaço de cana *in natura* foi de 138 %, caracterizando o bagaço como um material altamente úmido. Chrisostomo encontrou umidade próxima para a cana, no valor de 114 %.<sup>22</sup> A grande quantidade de água

contida no bagaço dificulta a transformação desse material em briquetes, principalmente por influenciar a compactação. Além disso, eleva seu custo de produção, pois exige a secagem do resíduo. A palha apresentou um teor de umidade de 19 %, valor mais próximo do ideal para a compactação, que varia entre 8 e 12 %.<sup>23</sup> Tal valor está associado ao fato da palha ficar exposta ao sol no campo.

A densidade a granel da cana-de-açúcar foi de  $0,16 \text{ g mL}^{-1}$ , valor 1,75 vezes menor que o obtido para densidade da palha, que foi de  $0,28 \text{ g mL}^{-1}$ . Aló *et al.* verificaram que o aumento da proporção de o bagaço de cana, em blendas de pó de lixa de eucalipto com bagaço de cana-de-açúcar, ocasionou uma redução na densidade a granel das blendas, passando de  $0,13 \text{ g cm}^{-3}$  em blendas essencialmente compostas por bagaço para  $0,25 \text{ g cm}^{-3}$  naquelas predominantemente constituídas por pó de lixa.<sup>24</sup> O baixo valor de densidade do bagaço acarreta problemas quanto ao manuseio e transporte dos briquetes após a sua compactação.<sup>10</sup>

Na distribuição granulométrica das partículas observa-se que ambos, o bagaço e a palha da cana, depois de moídos, possuíram granulometria menor que 40 mesh, onde se concentraram grande parte das matérias constituintes das blendas (Figura 1).



**Figura 1.** Distribuição granulométrica dos materiais utilizados na composição das blendas e produção dos briquetes

### 3.2. Caracterização química da matéria prima

O teor de umidade utilizado para as análises dos teores de cinza, voláteis e carbono fixo foi padronizado a 12 % por possibilitar melhores padrões de compactação.<sup>23</sup>

O teor de voláteis encontrado para as amostras de bagaço de cana (82 %) e para as amostras de palha (89 %) (Tabela 3) não diferiu estatisticamente ( $p=0,611$ ). Os resíduos de cana apresentaram resultados condizentes com os dados de Chrisostomo e Horst,<sup>22,25</sup> que encontraram teores de voláteis de 76 % e 72 %, respectivamente.

**Tabela 2.** Percentual de cinzas, compostos voláteis e carbono fixo (C fixo) dos materiais utilizados na produção dos briquetes.

Material	Percentual (%)			
	Cinzas	Voláteis	C Fixo	Umidade
Palha	8,2 a	88,6 a	3,2 b	12,0
Bagaço	0,4 b	82,0 a	10,5 a	12,0

\*Médias seguidas por uma mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey

Todos os materiais de origem vegetal possuem um percentual de compostos inorgânica, como minerais e metais, que compõem os teores de cinzas. A quantidade desses compostos influencia diretamente o poder calorífico do combustível e, na maioria dos materiais vegetais, é inferior a 1 %.<sup>22</sup> Ambos os materiais estudados diferiram ( $p<0,001$ ) quanto aos teores de cinzas. O bagaço da cana apresentou 0,4 %, enquanto a palha apresentou 8 % de cinzas em sua

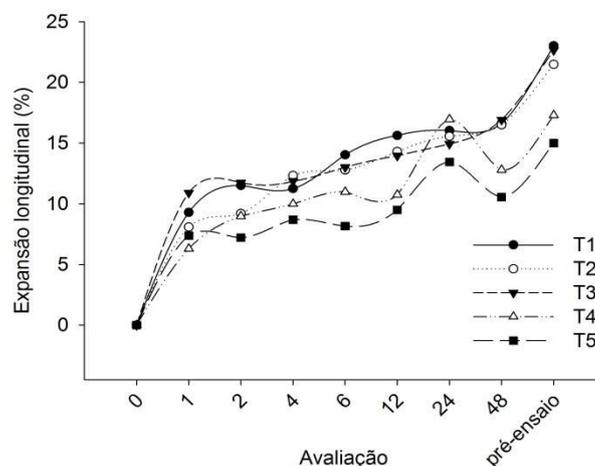
composição. O baixo teor de compostos inorgânicos é uma característica essencial e muito desejada para materiais de queima, pois grandes quantidades de cinzas podem diminuir o poder calorífico do material, reduzindo a sua eficiência energética.<sup>26</sup> Os resultados de teores de cinza encontrados na literatura para palha variam entre 3 e 4 %<sup>27</sup>, sendo, contudo, encontrados trabalhos que demonstram valores para palha próximos aos 15 %<sup>28</sup>.

O teor de carbono fixo representa a massa energética contida no resíduo, e quanto maior o seu teor, mais lenta é a queima, gerando maior tempo de combustão do material.<sup>22</sup> O bagaço da cana e a palha diferiram quanto ao conteúdo de carbono ( $p=0,04$ ). O bagaço da cana apresentou teor de carbono fixo maior (10 %) quando comparado com a palha (3 %), no entanto, ainda foi inferior ao valor encontrado na literatura, que foi de 17 %.<sup>25</sup>

### 3.3. Análise Física dos briquetes

#### 3.3.1. Expansão Longitudinal

Houve variação da expansão longitudinal dos briquetes durante o período de acompanhamento dos corpos de prova. Nota-se que todos os tratamentos ganharam de 15 % a 25 % em suas medidas longitudinais devido a absorção de umidade do ar (Figura 3).



**Figura 3.** Expansão longitudinal dos briquetes após acondicionamento

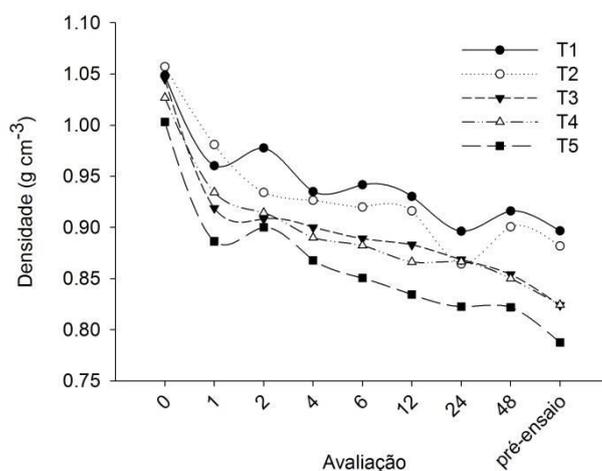
A menor taxa de expansão longitudinal ao longo de todo o período avaliado foi a do tratamento 5 (15 %), já as maiores foram as dos tratamentos 1 (23 %) e 2 (21 %). Isto deve-se à maior higroscopicidade da palha, material predominante na composição destas blendas. Resultados semelhantes foram encontrados por Yamaji *et al.* que observaram expansão longitudinal de 35 % para palha e de 18 % para bagaço da cana-de-açúcar.<sup>10</sup> Scarlet *et al.* ao estudarem a estabilidade de briquetes produzidos a partir de blendas de cascas de licuri e palha da cana-de-açúcar verificaram que a adição de palha aumentou a instabilidade dos briquetes, tornando-os mais suscetíveis a expansão longitudinal.<sup>29</sup> Yamaji *et al.* afirmam que esta expansão dos materiais

pode ser causada pela falta de aquecimento no processo de prensagem. Assim, é importante ressaltar que a grande higroscopicidade destes materiais lhes conferem a necessidade de condições controladas de temperatura e umidade de armazenamento, para evitar perdas de qualidade das propriedades físicas e mecânicas dos briquetes.<sup>10</sup>

#### 3.3.2. Densidade aparente

A maior densidade aparente dos briquetes foi observada no início do procedimento, quando os briquetes encontravam-se altamente compactados. Ao longo do tempo,

houve grande variação na densidade dos corpos de prova, devido principalmente à expansão do material compactado (Figura 2).



**Figura 2.** Densidade aparente dos briquetes após acondicionamento

O tratamento 1 apresentou valores superiores de densidade pós-briquetagem. Além disso, pode-se inferir que as densidades dos briquetes diminuíram à medida que se aumentou o percentual de bagaço da cana-de-açúcar.

Após a briquetagem, a densidade do tratamento 1 foi  $0,89 \text{ g cm}^{-3}$ . Esse valor é condizente com o estudo realizado por Yamaji *et al.* que encontram um valor de  $0,87 \text{ g cm}^{-3}$  para briquetes de capim elefante.<sup>10</sup> Os mesmos autores encontraram densidade para bagaço da cana-de-açúcar de  $0,66 \text{ g cm}^{-3}$ .

<sup>3</sup>, resultado esse inferior ao encontrado neste estudo que foi de  $0,78 \text{ g cm}^{-3}$ .<sup>10</sup>

### 3.3.3. Teor de umidade

Observa-se que os tratamentos 1 e 2 foram os únicos que apresentaram ganhos de umidade relativa (Tabela 3). Esses tratamentos são aqueles compostos essencialmente por palha da cana-de-açúcar, o que demonstra alta vulnerabilidade deste material para absorção de água.

**Tabela 3.** Teores de umidade médio dos corpos de prova (Inicial = no momento da compactação; Final = aos 35 dias pós-compactação)

Tratamento	Umidade (%)	
	Inicial	Final
T1	11,8 a	13,3 b
T2	11,5 a	12,7 b
T3	11,9 a	10,4 b
T4	12,7 a	11,8 a
T5	12,8 a	12,1 a

\*Médias seguidas por uma mesma letra na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey.

Segundo Yamaji *et al.*, tanto o bagaço da cana quanto a palha são materiais bastante higroscópicos, entretanto o bagaço da cana apresenta menor absorção de água quando comparado à palha.<sup>10</sup> Aló *et al.* observaram que o pó de lixa de eucalipto ao ser misturado em blendas com bagaço da cana-de-açúcar foi capaz de controlar a umidade dos briquetes, tornando-os menos higroscópicos e mais estáveis tecnologicamente.<sup>24</sup> É importante ressaltar que a umidade dos briquetes possui grande influencia sobre as propriedades estruturais de briquetes, uma vez que o seu aumento causa problemas de expansão e diminuição da densidade, o que pode trazer implicações

para o armazenamento após a compactação.<sup>30</sup>

### 3.4. Ensaio Mecânicos

Os ensaios mecânicos foram realizados com briquetes que apresentavam umidade média de 12 %. Verifica-se aumento da resistência à compressão dos briquetes quando a proporção de bagaço da cana é elevada na blenda ( $p < 0,001$ ). Os tratamentos 4 e 5 apresentaram os maiores valores de resistência dentre os tratamentos testados, já o tratamento 1 foi aquele com menor resistência (Tabela 4).

**Tabela 4.** Resistência à compressão diametral dos briquetes

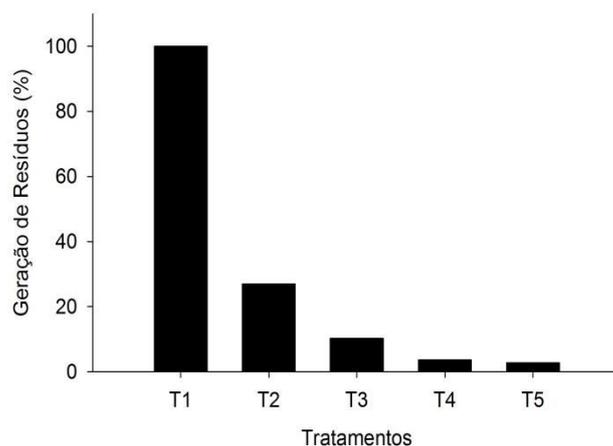
Tratamento	Resistência à compressão (MPa)
1	0,14 d
2	0,21 c
3	0,25 b
4	0,36 a
5	0,37 a

\*Médias seguidas por uma mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey.

Assim como Dias Junior *et al.*, que encontraram aumento da resistência de briquetes quando a quantidade de bambu foi elevada na blenda,<sup>31</sup> verificou-se um aumento da resistência dos briquetes com o acréscimo da quantidade de bagaço. Isto pode ser explicado pelas condições fibrilares do material, que permitem maior compactação dos briquetes, o que os torna menos friáveis. Este comportamento não pode ser verificado quando analisados

briquetes preparados com blendas essencialmente constituído por palha, pois os briquetes são altamente sensíveis a qualquer manipulação, os tornando de difícil manuseio.

O teste de tamboramento ou índice de friabilidade demonstrou que o acréscimo na quantidade de bagaço da cana aumentou a resistência dos briquetes, uma vez que há menores perdas, ou seja, menor geração de finos (Figura 4).



**Figura 4.** Percentual de geração de finos no teste de tamboramento

Os briquetes podem ser classificados segundo o grau de geração de finos, ou seja, de acordo com as partículas que não ficam retidas quando peneiradas (malha de 20 mm) ao final do ensaio. Segundo a Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC)<sup>32</sup>, os briquetes podem ser classificados conforme a sua friabilidade como: muito friáveis quando geram mais de 30 % de finos; bastante friáveis entre 25 a 29 % de finos; briquetes de friabilidade média entre 15 e 24 % de finos; pouco friáveis entre 10 e 15 % de finos e muito pouco friáveis quando a geração de finos é menor que 10 %.

Assim, o tratamento 1 produziu briquetes muito friáveis, que se desintegraram totalmente durante a realização dos testes; o tratamento 2 foi classificado como bastante friável (27 % de finos); o tratamento 3 foi classificado como pouco friável (10 % de finos); e os tratamentos 4 e 5 foram classificados como muito pouco friáveis, uma vez que ambos apresentaram geração de finos inferior a 10 %, sendo estes os dois tratamentos melhor avaliados quanto aos ensaios mecânicos (Figura 5).



**Figura 5.** Aspecto dos briquetes após o teste de tamboramento

Os resultados demonstram que, apesar do tempo e recursos para secagem, o bagaço da cana é uma matéria prima viável para a formação de briquetes fisicamente estáveis. Por outro lado, a palha da cana é de difícil tratamento, resultando em briquetes com qualidades não satisfatórias, com maiores teores de cinzas, maior higroscopicidade e menor resistência quando comparada a briquetes com maior proporção de bagaço. No entanto, se usada para formação de blendas, a palha passa a ser um material viável para formação de briquetes mais físico-mecanicamente estáveis. A melhor composição encontrada para as características avaliadas foi a de 25 % de palha e 75 % de bagaço. Contudo, estudos envolvendo avaliações do poder calorífico, além da viabilidade econômica da produção de tais blendas são recomendados.

#### 4. Conclusão

Considerando-se as condições aqui estudadas, constatou-se que o bagaço e a palha da cana-de-açúcar apresentaram comportamentos diferentes no processo de briquetagem. A palha mostrou-se como uma matéria prima com maior dificuldade para formação de briquetes. Nesse estudo, a produção de briquetes unicamente de palha foi considerada inviável.

Em concordância, as blendas constituídas de maior proporção de bagaço da cana apresentaram-se mais resistentes à compressão e menos friáveis, com menores percentuais de geração de finos.

O uso de blendas pode ser uma alternativa para o aproveitamento dos resíduos da cana-de-açúcar com intuito de produção de energia. Assim, o uso de palha da cana para a produção de briquetes só se torna viável na composição mista, nesse caso com o bagaço da cana.

#### Agradecimentos

A CAPES e CNPq pelas bolsas e financiamentos concedidos.

#### Referências Bibliográficas

- <sup>1</sup> International Energy Agency. World Energy Outlook. *IEA* **2013**, *1*, 708. [Link]
- <sup>2</sup> Ministério de Minas e Energia. R Resenha Energética Brasileira: Exercício de 2016. *Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia* **2017**, *1*, 30. [Link]
- <sup>3</sup> Food And Agriculture Organization Of The United Nations. Production quantity of sugar cane of 2016. [Link]
- <sup>4</sup> Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Acompanhamento da Safra brasileira: Cana-de-Açúcar, *4*, 2017. [Link]
- <sup>5</sup> SEBRAE. *O novo ciclo da cana: estudo sobre a competitividade do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar e prospecção de novos empreendimentos*, 1<sup>a</sup>.ed., IEL/NC: Brasília, 2005. [Link]
- <sup>6</sup> Carvalho, J. L. N.; Otto, R.; Franco, H. C. J.; Trivelin, P. C. O. Input of sugar cane post-harvest residues into the soil. *Scientia Agricola* **2013**, *70*, 336. [CrossRef]
- <sup>7</sup> Lopes, I. M.; Pinheiro, E. F. M.; Lima, E.; Ceddia, M. B.; Campos, D. V. B, Alves, B. J. R. Emissões de N<sub>2</sub>O em Solos sob Cultivo de Cana-de-Açúcar no bioma Mata Atlântica: Efeito dos Sistemas de Colheita e da Adubação com Vinhaça. *Revista Virtual de Química* **2017**, *9*, 1930. [CrossRef]
- <sup>8</sup> Moraes, M. A. F. D de. O mercado de trabalho da agroindústria canavieira: desafios e oportunidades. *Economia aplicada* **2007**, *11*, 605. [CrossRef]
- <sup>9</sup> Dias, J. M. C. de S.; Santos, D. T. dos; Braga, M.; Onoyama, M. M.; Miranda, C. H. B.; Barbosa, P. F. D.; Rocha, J. D. Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. *Embrapa Agroenergia* **2012**, *1*, 130. [Link]
- <sup>10</sup> Yamaji, F. M.; Vendrasco, L.; Chrisostomo, W.; Flores, W. P. Análise do Comportamento

Higroscópico de Briquetes. *Revista Energia na Agricultura* **2013**, 28, 11. [[CrossRef](#)]

<sup>11</sup> Gil, M. V.; Oulego, P.; Casal, M. D.; Pevida, C.; Pis, J. J.; Rubiera, F. Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends. *Bioresource Technology* **2010**, 101, 8859. [[CrossRef](#)]

<sup>12</sup> Santos, F. A.; Queiróz, J. H.; Colodette, J. L.; Fernandes, S. A.; Guimarães, V. M.; Rezende, S. T. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. *Química Nova* **2012**, 35, 1004. [[CrossRef](#)]

<sup>13</sup> Rosillo-Cale, F.; Bajay, S. V.; Rothman, H. *Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira*; Braunbeck, O. A.; Cortez, L. A. B., eds.; Editora da UNICAMP: Campinas, 2005, cap. 5.

<sup>14</sup> Cacuro, T. A.; Waldman, W. R. Cinzas da Queima de Biomassa: Aplicações e Potencialidades. *Revista Virtual de Química* **2015**, 7, 2154. [[CrossRef](#)]

<sup>15</sup> ABNT NBR 7402/82, Carvão vegetal - Determinação granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 1982. [[Link](#)]

<sup>16</sup> Gonçalves, J. E.; Sartori, M. M. P.; Leão, A. L. Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* **2009**, 13, 657. [[CrossRef](#)]

<sup>17</sup> Sant'anna, M. C. S.; Lopes, D. F. C.; Carvalho, J. B. R.; Silva, G. F. Caracterização de briquetes obtidos com resíduos da agroindústria. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais* **2012**, 14, 289. [[CrossRef](#)]

<sup>18</sup> ASTM D3175/11, Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. West Conshohocken, PA, 2011. [[Link](#)]

<sup>19</sup> ASTM D3174/12, Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal. West Conshohocken, PA, 2012. [[Link](#)]

<sup>20</sup> ABNT NBR 8740/85: Carvão vegetal - Determinação de índice de quebra e abrasão. Rio de Janeiro, 1985. [[Link](#)]

<sup>21</sup> R Development Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: the R Foundation for Statistical Computing. ISBN: 3-900051-07-0, 2011. [[Link](#)]

<sup>22</sup> Chrisostomo, W. *Estudo da Compactação de Resíduos Lignocelulósicos Para Utilização Como Combustível Sólido*. Universidade Federal de São Carlos - Sorocaba, 2011. [[Link](#)]

<sup>23</sup> <sup>23</sup> Grover, P. D.; Mishra, S. K. Biomass Briquetting: Technology and Practice. *Regional Wood Energy Development Programme in Asia* **1996**, 46, 43. [[Link](#)]

<sup>24</sup> Aló, L. L.; Konishi, P. A.; Belini, G. B.; Silva, J. P.; Martins, M. P.; Nakashima, G. T.; Caraschi, J.C.; Yamaji, F. M. Briquetes de Bagaço de Cana-de-Açúcar e Pó de Lixa de *Eucalyptus* spp: Caracterização e Equilíbrio Higroscópico. *Revista Virtual de Química* **2017**, 9, 774. [[CrossRef](#)]

<sup>25</sup> Horst, D. J. *Avaliação da Produção Energética a partir de Ligninas Contidas em Biomassas*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Ponta Grossa, 2013. [[Link](#)]

<sup>26</sup> Vieira, A. C. *Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas*. Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Cascavel, 2012. [[Link](#)]

<sup>27</sup> Santos, E. A.; Silva, D. S.; Filho, J. L. Q. Composição Química do Capim-Elefante cv. Roxo Cortado em Diferentes Alturas. *Revista Brasileira de Zootecnia* **2001**, 30, 18. [[CrossRef](#)]

<sup>28</sup> Moraes, R. F.; Zanetti, J. B.; Pacheco, B. M.; Jantália, C. P.; Boddey, R. M.; Alves, B. J. R. Produção e qualidade da biomassa de diferentes genótipos de capim-elefante cultivados para uso energético. *Cadernos de Agroecologia* **2009**, 4, 1103. [[Link](#)]

<sup>29</sup> Scalet, V.; Da Róz, A.; Santos, L. R. O.; Campos, J. M. V.; Yamaji, F. M. Produção de Briquetes a partir da Casca do Fruto de Licuri (*Syagrus coronata*) e Palha de Cana-de-Açúcar. *Revista Virtual de Química* **2018**, 10, 50-58. [[CrossRef](#)]

<sup>30</sup> Konishi, P. A.; Hansted, A. L. S.; Nakashima, G. T.; Padilla, E. R. D.; da Róz, A. L.; Sette Júnior, C. R.; Yamaji, F. M. Influência de Diferentes Condições de Armazenamento nas Propriedades Físico-Mecânicas de Briquetes. *Revista Virtual Química* **2017**, 9, 1065. [[CrossRef](#)]

<sup>31</sup> Dias Júnior, A. F.; Andrade, A. M De; Costa Júnior, D. S. Caracterização de briquetes produzidos com resíduos agrofloreais.

*Pesquisa Florestal Brasileira* **2014**, 34, 225.  
[CrossRef]

<sup>32</sup> Oliveira, J. B.; Vivacqua Filho, A.; Gomes, P. A. Produção de carvão vegetal: aspectos

técnicos. In: Penedo, W. R. Produção e utilização de carvão vegetal. Centro Tecnológico de Minas Gerais **1982**, 1, 59.  
[Link]