

## Artigo

## Influência de Diferentes Condições de Armazenamento nas Propriedades Físico-Mecânicas de Briquetes

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.\*

Rev. Virtual Quim., 2017, 9 (2), no prelo. Data de publicação na Web: 5 de abril de 2017

<http://rvq.s bq.org.br>

### Influence of Different Storage Conditions on the Physico-Mechanical Properties of Briquettes

**Abstract:** The aim of the present study was to analyze the physico-mechanical properties of briquettes under different storage conditions. The briquettes were generated from a blend containing 70% eucalyptus saw dust and 30% sugarcane bagasse. Sixty briquettes were produced at moisture content 12.5%. The briquettes were stored for 120 hours after being pressed in four environment types (4 treatments); 15 briquettes were used in each treatment, namely: Closed container (T1); Outdoor storage (T2); Storage at 40% RH (T3); and Storage at 75% RH (T4). According to the proximate analysis results, the blends presented volatile content 71.91%; fixed carbon, 21.52%; and ash content, 6.57%. The high heating value (HHV) of the blend was 18.17 MJ.kg<sup>-1</sup>. All the briquettes presented values considered satisfactory for the diametral compression effort, at mean treatment 1.10 MPa. There was no significant difference between treatments in the friability test, and the mean value 13.85% was recorded. Therefore, the RH of the environment during the packaging process changed the physico-mechanical characteristics of the briquettes. Although the storage in an environment with up to 75% RH interfered in the properties, it kept briquettes in proper conditions for use.

**Keywords:** Biomass; briquette; packaging; relative humidity.

### Resumo

O objetivo deste trabalho foi analisar as propriedades físico-mecânica dos briquetes em diferentes condições de armazenamento. Os briquetes foram produzidos a partir da blenda com 70% de pó de lixa de eucalipto e 30% de bagaço de cana-de-açúcar. Foram fabricados 60 briquetes, com um teor de umidade de 12,5%. Os briquetes foram armazenados por 120 horas após prensagem em quatro tipos de ambiente (4 tratamentos), utilizando 15 briquetes em cada tratamento: recipiente fechado (T1); armazenamento ao ar livre (T2); armazenamento a 40% de UR (T3); e armazenamento a 75% de UR (T4). Os resultados da análise química imediata mostraram que a blenda apresentou um teor de voláteis de 71,91%, carbono fixo 21,52% e teor de cinzas de 6,57%. O poder calorífico superior (PCS) da blenda foi 18.17 MJ.kg<sup>-1</sup>. Todos os briquetes apresentaram valores considerados satisfatórios quanto ao esforço de compressão diametral, com média dos tratamentos de 1,10 MPa. No teste de friabilidade não houve diferença significativa entre os tratamentos e observou-se o valor médio de 13,85%. Concluiu-se que a UR do ambiente durante o acondicionamento, influenciou na umidade de equilíbrio dos briquetes, alterando suas características físico-mecânicas. A estocagem em um ambiente com até 75% de UR, embora tenha interferido nas propriedades físico-químicas, manteve os briquetes em condições adequadas para o uso.

**Palavras-chave:** Biomassa; briquete; acondicionamento; umidade relativa.

\* Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Ciências Ambientais, Rodovia João Leme dos Santos, Km 110 - SP-264, Bairro do Itinga, Sorocaba-SP, Brasil.

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

DOI:

## Influência de Diferentes Condições de Armazenamento nas Propriedades Físico-Mecânicas de Briquetes

Paula Ayumi Konishi,<sup>a</sup> Ana Larissa S. Hansted,<sup>a</sup> Gabriela T. Nakashima,<sup>a</sup> Elias Ricardo D. Padilla,<sup>a</sup> Alessandra L. da Róz,<sup>b</sup> Carlos R. Sette Júnior,<sup>c</sup> Fábio M. Yamaji<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Ciências Ambientais, Rodovia João Leme dos Santos, Km 110 - SP-264, Bairro do Itinga, Sorocaba-SP, Brasil.

<sup>b</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Departamento Industrial, Av. João Olímpio de Oliveira, 1561, Vila Asem, Itapetininga-SP, Brasil.

<sup>c</sup> Universidade Federal de Goiás, Departamento da Agronomia. Rodovia Goiânia, Nova Veneza, km 0, Campus Samambaia, Goiânia-GO, Brasil.

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

*Recebido em 14 de dezembro de 2016. Aceito para publicação em 30 de março de 2017*

### 1. Introdução

### 2. Material e Métodos

#### 2.1. Materiais

#### 2.2. Ajuste do teor de umidade das biomassas

#### 2.3. Análise imediata e poder calorífico

#### 2.4. Produção de briquetes

#### 2.5. Acondicionamento dos briquetes

#### 2.6. Avaliação da expansão longitudinal, volumétrica e densidade aparente

#### 2.7. Resistência à tração por compressão diametral

#### 2.8. Friabilidade

#### 2.9. Análise estatística

### 3. Resultados e Discussão

### 4. Conclusão

## 1. Introdução

A biomassa vegetal pode ser considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética com consequente redução da dependência dos

combustíveis fósseis. O Brasil pode usufruir da grande quantidade de biomassa residual produzida, visto que o país é um dos maiores produtores agrícolas e florestais do mundo,<sup>1,2</sup> estima-se que são produzidos cerca de 167 milhões de toneladas de bagaço de cana-de-açúcar,<sup>3-5</sup> e aproximadamente, 30 milhões de

toneladas de resíduos de madeira por ano, tendo como principal fonte geradora a indústria madeireira.<sup>6</sup>

A utilização da biomassa para a produção de energia pode ser realizada pela queima direta; entretanto, este método apresenta algumas desvantagens quanto ao manuseio, armazenamento e transporte, já que a matéria-prima possui baixa densidade aparente e energética, grande heterogeneidade, forma e granulometria irregular.<sup>7</sup> A densificação de resíduos vegetais, como por exemplo, a peletização e a briquetagem, são processos que podem ser adotados para a produção de combustíveis sólidos mais eficientes e com melhores características energéticas.<sup>7,8</sup>

Recentemente, várias pesquisas foram realizadas, a fim de caracterizar e avaliar a disponibilidade de resíduos agrícolas e florestais para produção de briquetes, incluindo pesquisas de viabilidade técnico-econômica e as perspectivas das indústrias no Brasil.<sup>3,9-12</sup> Trabalhos semelhantes foram realizados em outras partes do mundo, focados principalmente na densificação de materiais como serragem, casca de arroz, casca de amendoim, palma e fibras de coco.<sup>13</sup> Wamukonya e Jenkins também estudaram a possibilidade de utilização de briquetes de serragem e palha de trigo como combustível.<sup>14</sup>

A produção de briquetes pode ser afetada por diversos fatores, entre os principais: temperatura e pressão de compactação, tamanho das partículas e teor de umidade.<sup>8,15,16</sup> Com relação à água deve-se atentar para o teor de umidade da biomassa e para a umidade relativa (UR) do ambiente, uma vez que as biomassas vegetais são higroscópicas e o excesso de umidade pode comprometer a qualidade dos briquetes. Nyakuma *et al.* ressaltam que os briquetes possuem tendência a desagregarem quando expostos à água ou submetidos à altos valores de UR.<sup>17</sup>

Há resíduos agroflorestais extremamente úmidos, com valores acima de 50% de umidade, como o bagaço da cana-de-açúcar

e, segundo Gonçalves, tal condição pode provocar a formação de vapor de água no interior da biomassa, tornando os briquetes instáveis com maior índice de expansão.<sup>18</sup> Desta forma, é necessário o processo de secagem do material. Por outro lado, há alguns tipos de biomassa, como o pó de lixa, que podem apresentar teor de umidade menor que 10% em base seca.

O material com baixo teor de umidade (menor que 9%) pode apresentar riscos ao seu acondicionamento, por ser de fácil combustão,<sup>19</sup> além de ser inadequado à produção de briquetes, pois dificulta a compactação, gerando um produto mais frágil.<sup>20</sup> De acordo com Gentil,<sup>21</sup> briquetes produzidos a partir de duas ou mais biomassas residuais, também conhecidas como blendas, vêm se destacando no mercado, principalmente devido ao apelo ambiental.

O presente trabalho teve como objetivo analisar as propriedades físico-mecânica dos briquetes (70% de pó de lixa de eucalipto e 30% de bagaço de cana-de-açúcar) em quatro diferentes condições de armazenamento.

## 2. Material e Métodos

### 2.1. Materiais

As biomassas empregadas no processo de briquetagem foram o pó de lixa da madeira de *Eucalyptus* spp. e bagaço de cana-de-açúcar. O pó de lixa de eucalipto foi coletado manualmente direto da lixadeira de uma empresa moveleira, no município de Salto de Pirapora-SP 23°38'58''S, 47°34'25'' com classificação Köppen Cfa.<sup>22</sup> O bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) foi obtido em uma usina localizada no município de Porto Feliz-SP nas coordenadas 23°21'52''S, 47°52'40''W com classificação Köppen Cfa.<sup>23</sup>

## 2.2. Ajuste do teor de umidade das biomassas

O bagaço de cana-de-açúcar foi triturado no moinho de facas tipo Willey. Em seguida, os materiais foram misturados manualmente em uma proporção de 70% de pó de lixa de eucalipto e 30% de bagaço de cana-de-açúcar. Para a determinação do teor de umidade dos materiais, utilizou-se uma balança determinadora de umidade modelo

MX-50 marca Shimadzu.

## 2.3. Análise imediata e poder calorífico

Os teores de cinzas e voláteis foram determinados utilizando 1,00 g da mistura conforme a metodologia prescrita na norma ABNT NBR 8112/86<sup>24</sup> com três repetições para cada ensaio. O teor de carbono fixo foi calculado de acordo com a Equação 1.

$$\text{Carbono Fixo (\%)} = 100\% - (\text{Teor de Cinzas (\%)} + \text{Teor de Voláteis (\%)}) \quad \text{Eq. 1}$$

O poder calorífico superior (PCS) foi obtido conforme a norma ASTM D5865-13,<sup>25</sup> em uma bomba calorimétrica IKA C200.

mistura de biomassa, com 12,5% de umidade foi compactada com uma pressão real de 122,31 MPa durante 30 s, sem aquecimento e sem adição de aglutinante seguindo o mesmo procedimento usado por Hansted *et al.*<sup>26</sup>

## 2.4. Produção dos briquetes

Para a briquetagem foi utilizada uma prensa hidráulica, marca Marconi MPH-30 e moldes cilíndricos de aço inox de 35,00 mm de diâmetro e 160,00 mm de altura. Foi produzido um total de 60 briquetes. Na confecção de cada briquete 20,00 g da

## 2.5. Acondicionamento dos briquetes

Foram simuladas quatro condições de armazenamento como mostra a Tabela 1, utilizando 15 briquetes em cada tratamento.

**Tabela 1.** Acondicionamento dos briquetes

Tratamento	Condições de armazenamento
T1	Recipiente hermeticamente fechado
T2	Ambiente (ao ar livre)
T3	40% de UR
T4	75% de UR

No tratamento T1, os briquetes foram inseridos em sacos plásticos e vedados, a fim de evitar a influência de umidade externa. No tratamento T2, os briquetes foram armazenados ao ar livre. No tratamento T3 os briquetes foram mantidos a 40% de UR, armazenados em ambiente seco dentro de um dessecador com sílica gel previamente

ativada. No tratamento T4, simulou-se uma situação com 75% de UR, utilizando uma câmara climática marca Marconi modelo MA402. A umidade relativa foi monitorada em intervalos de 4 horas utilizando um termo-higrômetro digital marca Impac modelo TH-01.

## 2.6. Avaliação da expansão longitudinal, volumétrica e densidade aparente

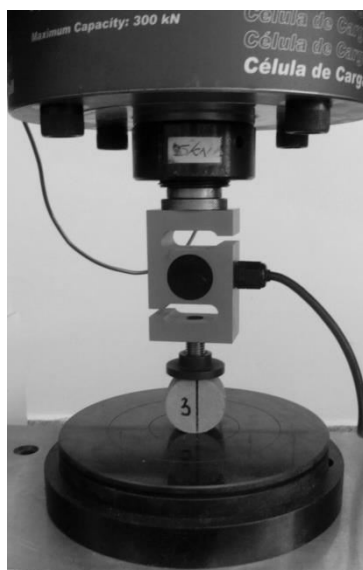
Após o processo de briquetagem, mediu-se a altura e o diâmetro de todos os briquetes em intervalos pré-estabelecidos com o auxílio de um paquímetro digital marca Insize com resolução de 0,01 mm. O procedimento foi realizado até a estabilização dimensional a fim de se avaliar a expansão longitudinal (no sentido paralelo à compactação) e a expansão em volume.

Para o cálculo da densidade aparente foi utilizado o método estereométrico, medindo-se a massa dos briquetes logo após a sua confecção (densidade aparente inicial) e após o período de estabilização (densidade aparente final). Os ensaios mecânicos foram feitos 120 horas após briquetagem (onde foi

realizada a última medição dos briquetes)

## 2.7. Resistência mecânica de tração por compressão diametral

Após a estabilização da expansão dos briquetes foi realizado o ensaio mecânico de tração por compressão diametral, com base na norma ABNT NBR 7222/11.<sup>27</sup> Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios EMIC DL30000 usando uma célula de carga de 500 kgf. Foram utilizados 10 briquetes de cada tratamento e os resultados foram obtidos diretamente pelo programa Tesc versão 3.04. A Figura 1 apresenta a montagem experimental.



**Figura 1.** Montagem experimental para o ensaio de tração por compressão diametral

## 2.8. Friabilidade

O ensaio dinâmico de friabilidade, também conhecido como tamboramento, foi realizado para analisar a resistência a impactos, manuseio e abrasão dos briquetes.<sup>28</sup> A determinação da friabilidade foi baseada na norma ABNT NBR 8740,<sup>29</sup> como descrito por Oliveira *et al.*<sup>30</sup> Foi

utilizado um friabilômetro com as dimensões internas do tambor reduzidas para 300 x 300 x 100 mm, configurado para 30 rpm durante o período de 15 min, totalizando-se aproximadamente 500 rotações. Foram utilizados cinco briquetes de cada tratamento para este ensaio.

## 2.9. Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância, sendo que a comparação entre os tratamentos foi analisada por meio do teste F, a 5% de significância. Nas propriedades em que a hipótese nula foi rejeitada, as médias foram comparadas também a 5% de significância pelo teste Tukey. Para a análise foram empregados os softwares Tinn-R e R versão 2.11.1.

## 3. Resultados e Discussão

O valor médio encontrado para o teor de cinzas da blenda de bagaço de cana-de-açúcar e pó de lixa foi de 6,57%. O teor de cinzas da blenda pode ser considerado alto quando comparado a outros estudos. Para fins energéticos, o teor de cinzas aceitável para as biomassas florestais é de aproximadamente 1%.<sup>33,34</sup> De acordo com Brasil *et al.*<sup>31</sup>, o teor de cinzas encontrado para o bagaço de cana-de-açúcar foi de 2,43%. Para o pó de lixa de eucalipto, estudos reportam teor de cinzas acima de 3,0%. Esses valores podem ter origem a partir dos minerais (grãos) que se soltam da lixa durante o processo de lixamento.<sup>32</sup>

O teor de cinzas pode prejudicar o potencial energético do material, já que são compostas por minerais que não participam do processo de combustão.<sup>35</sup> Outro ponto prejudicial da presença de cinzas é o seu acúmulo nas estruturas da caldeiras (grelhas, tubulações e paredes). O espessamento das paredes diminui a eficiência energética e aumenta a necessidade de manutenção dos equipamentos.<sup>36</sup>

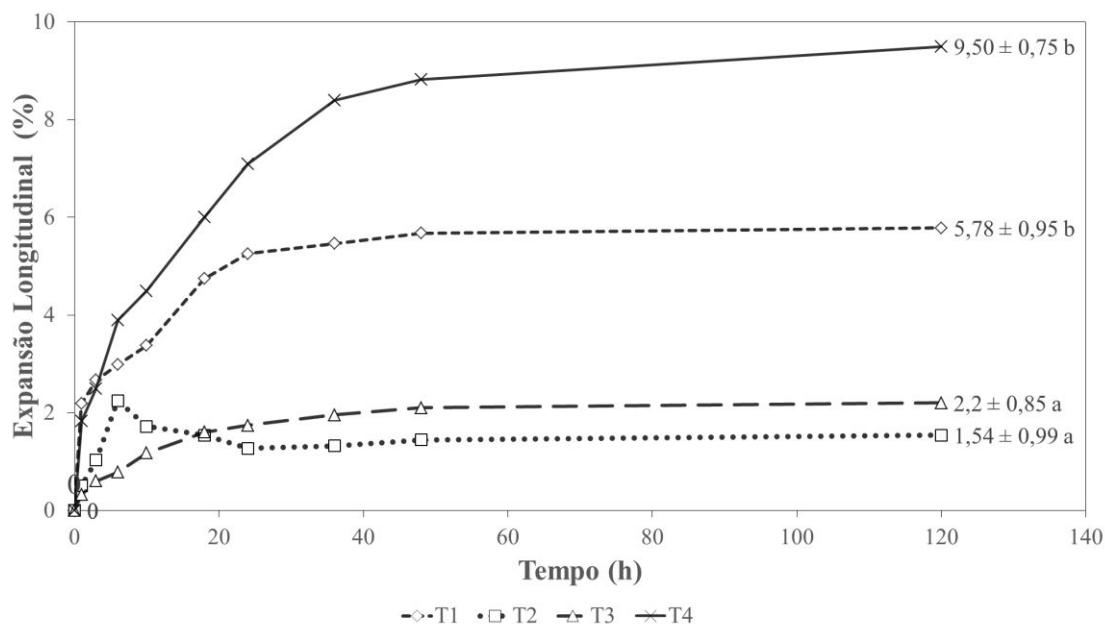
O teor de cinzas e o teor de carbono fixo de um material apresentam uma relação

inversamente proporcional. Desta forma, quanto maior o carbono fixo, melhor o potencial energético do material.<sup>37</sup> De acordo com Brito *et al.*,<sup>38</sup> o teor de carbono fixo e o teor de voláteis para biomassas devem ser de 15 a 25% e 75 a 85%, respectivamente, para serem considerados de boa qualidade para fins energéticos. Os valores médios obtidos na blenda estudada foram de 21,52% (carbono fixo) e 71,91% (teor de voláteis).

O poder calorífico superior (PCS) encontrado para a blenda foi de 18,17 MJ.kg<sup>-1</sup> considerado satisfatório quando comparado ao desempenho energético de outras espécies. Na literatura, o PCS observado para o eucalipto apresenta-se em torno de 20,04 MJ.kg<sup>-1</sup>,<sup>39</sup> enquanto que para o bagaço da cana-de-açúcar, cerca de 16,13 MJ.kg<sup>-1</sup>,<sup>40</sup> indicando que o poder calorífico da blenda está dentro do intervalo esperado.

A UR média do ambiente no tratamento T2 foi de 50,8% durante o período analisado, resultando em um briquete com teor de umidade de equilíbrio em torno de 8,2%. No tratamento T3 a umidade dos briquetes estabilizou em 7,8% no dessecador com 40% de UR, ou seja, as umidades finais dos briquetes T2 e T3 comparadas com a inicial (12,5%) diminuíram durante o período analisado. O recipiente hermeticamente fechado (T1) manteve a umidade de 12,5% nos briquetes e a câmara climática com 75% de UR aumentou a umidade dos briquetes de 12,5% a 13,4%. Tal padrão evidencia que a UR do ambiente de armazenamento alterou a umidade de equilíbrio dos briquetes.

Pode ser observado na Figura 2 que todos os briquetes da blenda estudada atingiram estabilidade dimensional (expansão longitudinal) em aproximadamente 48 horas após briquetagem para todos os tratamentos.



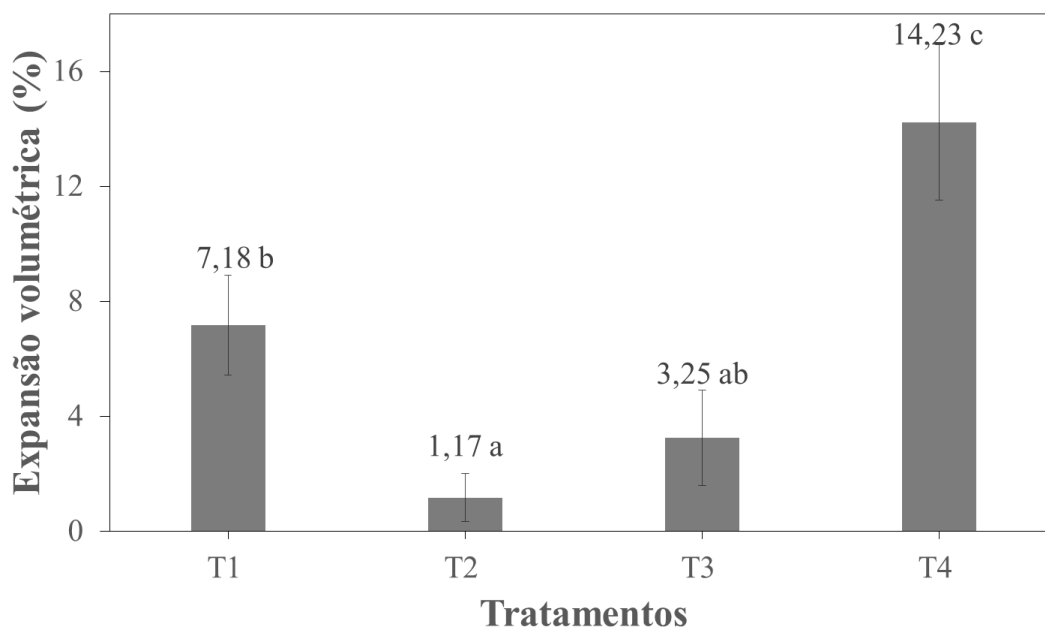
**Figura 2.** Expansão longitudinal média dos briquetes para cada tratamento. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey

As análises estatísticas demonstraram que não houve diferença significativa entre os tratamentos T2 e T3, que apresentaram as taxas mais baixas de expansão longitudinal (valores finais médios de 1,54% e 2,20%, respectivamente). De forma semelhante, não se observou diferença significativa entre os tratamentos T1 e T4 cujos valores de expansão longitudinal foram os mais altos observados (valores finais médios de 5,78% e 9,50%, respectivamente).

Embora a expansão longitudinal dos briquetes dos tratamentos T1 e T4 foram as maiores observadas, esses valores são menores que o encontrado por Padilla *et al.*<sup>41</sup> Os autores obtiveram uma expansão de 13,47% para briquetes de 100% palha de cana-de-açúcar armazenados em ambiente com 65% de UR. Briquetes que sofrem maior expansão longitudinal e volumétrica exigem maior cuidado no transporte e armazenamento.<sup>42</sup>

A expansão volumétrica dos briquetes ao longo do tempo pode ser ocasionada por diversos fatores, como a natureza da matéria-prima, a magnitude e o modo de densificação, a geometria do material compactado e sua condição de armazenamento.<sup>43</sup> A Figura 3 mostra a expansão volumétrica dos briquetes por tratamentos.

Uma das decorrências da expansão volumétrica é a diminuição da densidade aparente dos briquetes. Conforme mostrado na Figura 3, o tratamento T4 foi o que apresentou maior expansão volumétrica devido ao armazenamento dos briquetes ter ocorrido no ambiente com a maior umidade relativa (75% de UR), resultando também na maior umidade de equilíbrio obtida nos briquetes desse tratamento. Segundo Protásio *et al.*<sup>33</sup> variações volumétricas elevadas dos briquetes podem contribuir com a diminuição da resistência mecânica dos biocombustíveis sólidos.



**Figura 3.** Expansão volumétrica média dos briquetes para cada tratamento. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey

A densidade aparente dos briquetes é um parâmetro muito importante haja vista que define as condições de estocagem, armazenamento e transporte, além de influenciar diretamente a densidade energética dos mesmos. Ao analisar a Figura 4, que mostra os resultados obtidos neste trabalho quanto à densidade aparente, percebeu-se que os valores médios referentes à densidade aparente final variaram entre  $0,94 \text{ g.cm}^{-3}$  e  $1,03 \text{ g.cm}^{-3}$ , os quais diferiram estatisticamente entre si.

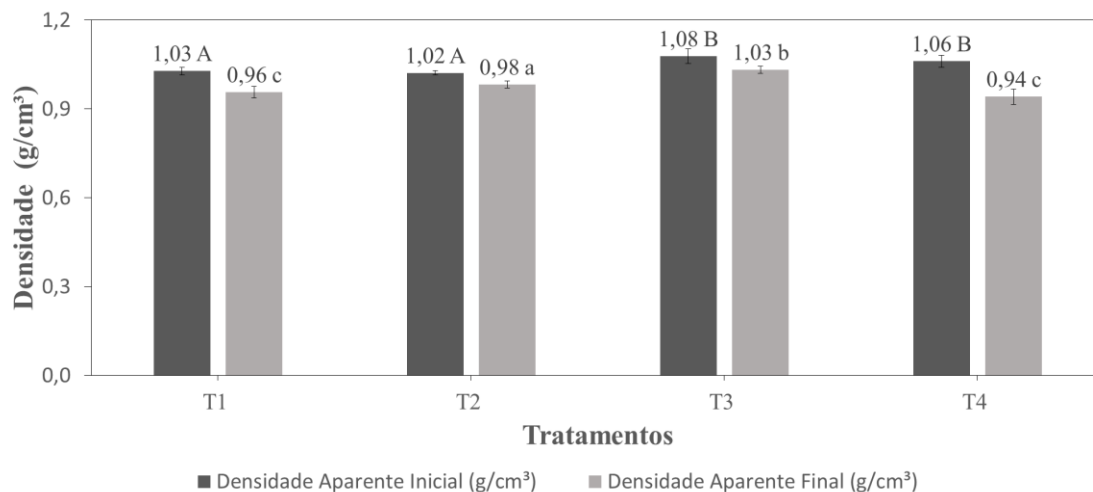
A maior variação da densidade aparente do tratamento T4 pode ser explicada pela maior expansão volumétrica observada neste tratamento. Especificamente para briquetes da blenda estudada não se encontraram valores de densidade na literatura, no entanto, os resultados obtidos neste estudo

foram próximos aos de Rodrigues<sup>44</sup> e Paula<sup>45</sup> que encontraram densidades aparentes de  $1,10 \text{ g.cm}^{-3}$  e  $0,606 \text{ g.cm}^{-3}$  para briquetes de serragem de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar, respectivamente.

Os resultados dos tratamentos T1 e T4, para a expansão longitudinal, a expansão volumétrica e a densidade aparente indicam que o ambiente/tratamento mais úmido pode afetar negativamente as propriedades dos briquetes, pois altas UR aumentam a umidade de equilíbrio dos briquetes, produzindo briquetes instáveis ou frágeis.

A Tabela 2 mostra os resultados de resistência à compressão e força máxima dos briquetes para cada tratamento, encontrados nos ensaios mecânico. A resistência a compressão máxima média de todos os briquetes da blenda foi de 1,10 MPa.





**Figura 4.** Densidade aparente inicial e final média dos briquetes para cada tratamento. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey

**Tabela 2.** Dados do ensaio mecânico para cada tratamento. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey

Tratamento	Resistência Máx. (MPa)	Força Máx. (kN)
T1	1,03± 0,07 a	1,23 ± 20,9
T2	1,02± 0,04 a	1,16 ± 10,4
T3	1,33± 0,06 b	1,46 ± 20,2
T4	1,05± 0,08 a	1,28 ± 20,5

Este tipo de ensaio indica a resistência do briquete aos esforços, que ocorrem principalmente, na estocagem, ou seja, determina qual é a resistência à compressão média que cada briquete pode suportar antes que ocorra uma ruptura durante o armazenamento.<sup>46</sup>

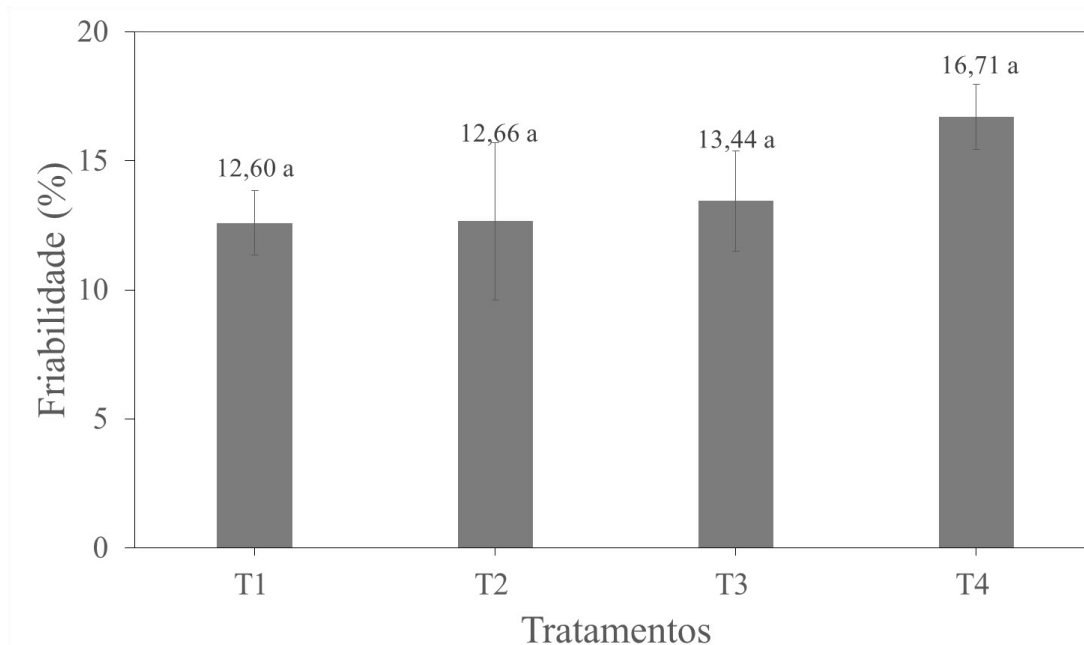
Todos os briquetes da blenda estudada, sem importar o armazenamento, obtiveram valores de resistências máxima média superiores às encontrados por Brasil *et al.*<sup>31</sup>, que produziu briquetes da blenda de serragem de candeia e bagaço de cana-de-açúcar em diferentes proporções, a 12% de umidade, e encontrou resistências máxima média entre 0,23 e 0,94 MPa. Outro estudo relatou que briquetes de *Eucalyptus* sp. a 12% de umidade, resistência máxima média de 1,12 MPa,<sup>47</sup> valor semelhante aos apresentados na Tabela 2 encontrados no presente trabalho.

A análise estatística dos resultados mostrou que a resistência máxima dos briquetes armazenados no dessecador com 40% de UR (tratamento T3) diferiu pelo teste de Tukey a 5% de significância dos demais valores encontrados. Dessa forma, observou-se que o ambiente com UR mais baixa favoreceu a resistência mecânica dos briquetes. Contudo, este resultado não desqualifica os valores de resistência mecânica dos briquetes armazenados nos outros ambientes, visto que apresentaram valores considerados satisfatórios.

O ensaio de friabilidade pode fornecer informação complementar ao ensaio de tração por compressão diametral. Esse ensaio é um bom método para prever o comportamento dos briquetes durante sua cadeia de fornecimento, portanto, a friabilidade indica a capacidade dos briquetes para resistir ao manuseio e transporte.<sup>46</sup> Os

resultados de friabilidade dos briquetes da blenda estudada para cada tratamento podem ser visualizados na Figura 5. O índice

de friabilidade médio considerando todos os tratamentos foi de 13,85%.



**Figura 5.** Índices de friabilidade médio dos briquetes para cada tratamento. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey

Segundo estudos de Gonçalves *et al.*,<sup>48</sup> para briquetes de *Eucalyptus* sp. a 12% de umidade, foi encontrado um índice de friabilidade de 24,75%, valor maior do que a média de 13,85% encontrada no presente trabalho, demonstrando maior resistência (menor friabilidade) nos briquetes da blendas de bagaço de cana-de-açúcar e pó de lixa de eucalipto. De acordo com a classificação Cetec,<sup>30</sup> o tratamento T4 é definido como “pouco friável” e os demais como “muito pouco friável”.

O maior índice de friabilidade foi encontrado nos briquetes armazenados no tratamento T4 (75% UR), confirmando que a UR do ambiente de armazenamento altera a umidade de equilíbrio, afetando a estabilidade e a friabilidade dos briquetes. Entretanto, pelo teste da ANOVA, conclui-se que não houve diferença significativa entre os quatro tratamentos para o índice de friabilidade. Assim, a estocagem dos

briquetes em um ambiente com até 75% de UR, embora tenha interferido na expansão longitudinal, volumétrica e a densidade aparente, não interferiu significativamente nas propriedades mecânicas e manteve os briquetes em condições adequadas para o uso.

#### 4. Conclusão

O teor de cinzas (6,57%) dos briquetes pode ser considerado alto, o que inviabiliza, por exemplo, o seu uso no mercado externo. O mercado de pellets na Europa permite um teor de cinzas máximo de 2%. Entretanto o teor de voláteis, carbono fixo e PCS da blenda estão dentro do intervalo considerado satisfatório quando comparado a outras espécies.

As condições da estocagem se mostrou

um aspecto importante nas características físico-mecânicas dos briquetes. A umidade relativa (UR) do ambiente de armazenamento dos briquetes alterou a umidade de equilíbrio dos briquetes. A estocagem dos briquetes em diferentes ambientes, embora tenha interferido nas propriedades, mantiveram condições adequadas para o uso.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio concedido pelo grupo de pesquisa Biomassa Bioenergia da UFSCar-campus Sorocaba para a realização do presente trabalho e ao professor Dr. Walter R. Waldman pela orientação na disciplina de escrita científica.

## Referências Bibliográficas

<sup>1</sup> Dias, J. M. C. S.; Souza, D. T.; 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*, 1. [Link]

<sup>2</sup> Brand, M. A.; Klock, U.; Muñis, G. I. B.; Silva, D. A. Avaliação do processo produtivo de uma indústria de manufatur de painéis por meio do balanço de material e do rendimento da matéria-prima. *Árvore* **2004**, *28*, 553. [CrossRef]

<sup>3</sup> Felfli, F. F.; Mesa P, J. M.; Rocha, J. D.; Filippetto, D.; Luengo, C. A.; Pippo, W. A. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. *Biomass and Bioenergy* **2011**, *35*, 236. [CrossRef]

<sup>4</sup> União da Indústria de Cana-de-açúcar. Moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol - safra2015/2016. 2009. [Link]

<sup>5</sup> União da Indústria de Cana-de-açúcar. Bioeletricidade: a energia verde e inteligente do Brasil. Disponível em: <[http://www.unica.com.br/download.php?id\\_Secao=17&id=35980339](http://www.unica.com.br/download.php?id_Secao=17&id=35980339)>. Acesso em: 16 fevereiro 2017.

<sup>6</sup> Ministério do Meio Ambiente. Levantamento Sobre a Geração de Resíduos Provenientes da Atividade Madeireira e Proposição de Diretrizes para Políticas, Normas e Condutas Técnicas para Promover o seu Uso Adequado. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/164/\\_publicacao/164\\_publicacao10012011032535.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011032535.pdf)>. Acesso em: 16 fevereiro 2017.

<sup>7</sup> Vinterbäck, J. Pellets: the first world conference on pellets. *Biomass and Bioenergy* **2004**, *27*, 513. [CrossRef]

<sup>8</sup> Kaliyan, N; Morey, R. V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy* **2009**, *33*, 337. [CrossRef]

<sup>9</sup> Portugal-Pereira, J.; Soria, R.; Rathmann, R.; Schaeffer, R.; Szklo, A. Agriculture and agro-industrial residues-to-energy: Techno-economic and environmental assessment in Brazil. *Biomass and Bioenergy* **2015**, *81*, 521. [CrossRef]

<sup>10</sup> Silva, D. A.; Nakashima, G. T.; Barros, J. L.; Da Roz, A. L.; Yamaji, F. M. Caracterização de biomassas para a briquetagem. *Revista Floresta* **2015**, *45*, 713. [CrossRef]

<sup>11</sup> Forster-Carneiro, T.; Berni, M. D.; Dorileo, I. L.; Rostagno, M. A. Biorefinery study of availability of agriculture residues and wastes for integrated biorefineries in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling* **2013**, *77*, 78. [CrossRef]

<sup>12</sup> Alvarenga, T. H. P.; Sartori, S.; Campos, L. M. S.; Rodriguez, C. M. T. Briquette production and its contribution for the energy sustainability: A case study in Brazil. *Espacios* **2016**, *37*, 18. [Link]

<sup>13</sup> Chin, O. C.; Siddiqui, K. M. Characteristics of some biomass briquettes prepared under modest die pressures. *Biomass and Bioenergy* **2000**, *18*, 223. [CrossRef]

<sup>14</sup> Wamukonya, L.; Jenkins, B. Durability and relaxation of sawdust and wheat-straw briquettes as possible fuels for Kenya. *Biomass and Bioenergy* **1995**, *8*, 175. [CrossRef]

<sup>15</sup> Antwi-Boasiako, C.; Acheampong, B. B. Strength properties and calorific values of sawdust-briquettes as wood-residue energy generation source from tropical hardwoods

- of different densities. *Biomass and Bioenergy* **2016**, *85*, 144. [[CrossRef](#)]
- <sup>16</sup> Quirino, W. F.; Vale, A. T.; Andrade, A. P. A.; Abreu, V. L. S.; Azevedo; A. C. S. Poder calorífico da madeira e dos resíduos lignocelulósicos. *Renabio* **2004**, *1*, 173. [[Link](#)]
- <sup>17</sup> Nyakuma, B. B.; Johari, A.; Ahmad, A.; Amran, T.; Abdullah, T. Comparative Analysis of the calorific fuel properties of empty fruit bunch fiber and briquette. *Energy Procedia* **2014**, *52*, 466. [[CrossRef](#)]
- <sup>18</sup> Gonçalves, J. E.; *Tese de doutorado*, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010. [[Link](#)]
- <sup>19</sup> Yamaji, F. M.; Bonduelle, A. A utilização da serragem na produção de compósitos de plástico-madeira. *Floresta* **2004**, *34*, 59. [[CrossRef](#)]
- <sup>20</sup> Yamaji, F. M.; Vendrasco, L.; Chrisostomo, W.; Flores, W. P. Análise do comportamento higroscópico de briquetes. *Energia na Agricultura* **2013**, *28*, 11 [[CrossRef](#)]
- <sup>21</sup> Gentil, L. V. B.; *Tese de doutorado*, Universidade de Brasília, Brasília, 2008. [[Link](#)]
- <sup>22</sup> IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. [[Link](#)]
- <sup>23</sup> IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. [[Link](#)]
- <sup>24</sup> Associação Brasileira De Normas Técnicas NBR 8112/86. Carvão vegetal – Análise Imediata, 1986. [[Link](#)]
- <sup>25</sup> American Society for Testing and Materials D5865-13, Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013. [[Link](#)]
- <sup>26</sup> Hansted, A. L. S.; Nakashima, G. T.; Martins, M. P.; Yamamoto, H.; Yamaji, F. M. Comparative analyses of fast growing species in different moisture content for high quality solid fuel production. *Fuel* **2016**, *184*, 180. [[CrossRef](#)]
- <sup>27</sup> Associação Brasileira De Normas Técnicas NBR 7222. Concreto e Argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, 2011. [[Link](#)]
- <sup>28</sup> Barros, J. L.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba. 2014. [[Link](#)]
- <sup>29</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 8740. Carvão Vegetal - Determinação do índice de quebra e abrasão, 1985. [[Link](#)]
- <sup>30</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](#)]
- <sup>31</sup> Brasil, D. S.; Martins, M. P.; Nakashima, G. T.; Yamaji, F. M. Aproveitamento de resíduos de bagaço de cana-de-açúcar e candeia para a produção de biocombustíveis sólidos. *Floresta* **2015**, *45*, 185. [[CrossRef](#)]
- <sup>32</sup> Aló, L. L.; Yamaji, F. M., Souza T. R. B.; Pires, V. C. M.; Ferragutti, A. C. Resumo do Congresso de Iniciação Científica em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, São Carlos, Brasil, 2011. [[Link](#)]
- <sup>33</sup> Protásio, T. P.; Bufalino, L.; Tonoli, G. H. D.; Couto, A. M.; Trugilho, P. F.; Guimarães Junior, M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. *Pesquisa Florestal Brasileira* **2011**, *31*, 113. [[Link](#)]
- <sup>34</sup> Trugilho, P. F.; Vital, B. R.; Regazzi, A. J.; Gomide, J. L. Aplicação da análise de correlação canonica na identificação de índices de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal. *Árvore* **1997**, *21*, 259. [[Link](#)]
- <sup>35</sup> Sabatti, M.; Fabbrini, F.; Harfouchea, A.; Beritognola, I.; Mareschi, L.; Carlini, M.; Paris, P.; Scarascia-Mugnozza, G. Evaluation of biomass production potential and heating value of hybrid poplar genotypes in a short-rotation culture in Italy. *Industrial Crops and Products* **2014**, *61*, 62. [[CrossRef](#)]
- <sup>36</sup> Garcia, R.; Pizarro, C.; Lavín, A. G.; Bueno, J. L. Spanish biofuels heating value estimation. Part II: Proximate analysis data. *Fuel* **2014**, *117*, 1139. [[CrossRef](#)]
- <sup>37</sup> Quirino, W. F.; Brito, J. O. Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal. *Laboratório de Produtos Florestais* **1991**, *13*, 1. [[Link](#)]

- <sup>38</sup> Brito, J. O.; Barrichelo, L. E. G.; Seixas, F. Análise da produção energética e de carvão vegetal de espécies de eucalipto. *IPEF* **1983**, *23*, 53. [[Link](#)]
- <sup>39</sup> Arteaga-Péres, L. E.; Segur, C.; Bustamante-Garcia, V.; Cápiro, O. G.; Jiménez, R. Torrefaction of wood and bark from *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*: Focus on volatile evolution vs feasible temperatures. *Energy* **2015**, *93*, 1731. [[CrossRef](#)]
- <sup>40</sup> Ramos e Paula, L. E.; Trugilho, P. F.; Napoli, A.; Bianchi, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. *Cerne* **2011**, *17*, 237. [[CrossRef](#)]
- <sup>41</sup> Padilla, E. R. D.; Pires, I. C. S. A.; Yamaji, F. M.; Fandiño, 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](#)]
- <sup>42</sup> Morais, D. M.; *Tese de Doutorado*, Universidade de Brasília, Brasília, 2007. [[Link](#)]
- <sup>43</sup> Ndiema, C. K. W.; Manga, P. N.; Ruttoh, C. R. Densification characteristics of rice straw briquettes. *Journal of the Institute of Energy* **2002**, *75*, 11. [[Link](#)]
- <sup>44</sup> Rodrigues, V. A. J. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010. [[Link](#)]
- <sup>45</sup> Paula, L. E. R. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010. [[Link](#)]
- <sup>46</sup> Kambo, 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](#)]
- <sup>47</sup> Wanderley, C. W. C.; Yamaji, F. M.; Silva, D. A.; Konishi, P. A. Resumo do Simpósio de Meio Ambiente e Tecnologia Florestal, Sorocaba, Brasil, 2012. [[Link](#)]
- <sup>48</sup> Gonçalves, B. F.; Yamaji, F. M.; Fernandez, B. O.; Róz, A. L.; Floriano, F. S. Caracterização e comparação entre diferentes granulometrias de serragem de *Eucalyptus grandis* para confecção de briquetes. *Revista do Instituto Florestal* **2013**, *25*, 205. [[Link](#)]