

## Artigo

## Qualidade de Briquetes de Cana-de-Açúcar Produzidos com Aglutinante Amido de Milho

Fernandez, B. O.; Da Róz, A. L.; Gonçalves, B. F.; Nakashima, G. T.; Yamaji, F. M.\*

Rev. Virtual Quim., 2018, 10 (1), 142-154. Data de publicação na Web: 15 de janeiro de 2018

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

### The Quality of Sugarcane Briquettes Produced with Cornstarch Binder

**Abstract:** A growing demand for renewable energy makes the production of briquettes a good alternative source of energy. This study aims to evaluate the effect of using commercial cornstarch as a binder in the production of briquettes from sugarcane bagasse. Analysis of specific weight, gross calorific value, moisture content, volatile and ash content were performed for both materials. Also, particle size characterization was performed for the biomass. The mixtures of raw materials determined the treatments: T1 (only bagasse), T2 (bagasse + 2.5 % starch), T3 (bagasse + 5 % starch) and T4 (bagasse + 10 % starch) which were then compressed in hydraulic press without heating. Aspects of mechanical resistance and longitudinal expansion of the produced briquettes were measured. A reduction of 17 times over the material density was obtained. Values of ash and volatile for sugarcane bagasse were 3.9% and 87.7%, while for starch were 0.09% and 94.65%, respectively. The gross calorific value was of 3,593 kcal.kg<sup>-1</sup> (sugarcane bagasse) and 3,637 kcal.kg<sup>-1</sup> (starch). The highest mechanical strength was found for T1 (0.607 MPa), which presented lowest moisture content and expansion values (10.81% and 14.9%, respectively). It can be concluded that the cornstarch did not act as a binder in the production of briquettes.

**Keywords:** Bioenergy; Biomass; Additive; Agricultural waste.

### Resumo

Uma crescente demanda por fontes de energia renováveis faz da produção de briquetes uma boa fonte alternativa de energia. Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito do uso de amido de milho comercial como aglutinante na produção de briquetes de bagaço de cana-de-açúcar. Análises de massa específica, poder calorífico superior, teor de umidade, teor de voláteis e cinzas foram realizadas para os materiais. Foi também realizada caracterização granulométrica da biomassa. As misturas de matérias-primas determinaram os tratamentos T1 (apenas bagaço), T2 (bagaço + 2,5% de amido), T3 (bagaço + 5% de amido) e T4 (bagaço + 10% de amido) que foram compactadas em prensa hidráulica, sem uso de aquecimento. Foram mensurados aspectos de resistência mecânica e expansão longitudinal dos briquetes produzidos. Alcançou-se uma redução de 17 vezes em relação a massa específica do material original. Os teores de cinzas e de voláteis do bagaço de cana-de-açúcar foram de 3,9% e 87,7%, enquanto para o amido foram de 0,09% e 94,65%, respectivamente. O poder calorífico superior foi de 3593 kcal.kg<sup>-1</sup> (bagaço de cana-de-açúcar) e 3637 kcal.kg<sup>-1</sup> (amido). O maior valor de resistência mecânica foi para o T1(0,607MPa), o qual apresentou os menores valores de umidade e expansão longitudinal (10,81% e 14,9%, respectivamente). Pode-se concluir que o amido de milho não atuou como aglutinante na produção dos briquetes.

**Palavras-chave:** Bioenergia; Biomassa; Aditivo; Resíduos Agrícolas.

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

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

DOI: [10.21577/1984-6835.20180013](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180013)

## Qualidade de Briquetes de Cana-de-Açúcar Produzidos com Aglutinante Amido de Milho

Bianca O. Fernandez,<sup>a</sup> Alessandra L. Da Róz,<sup>b</sup> Bruna F. Gonçalves,<sup>a</sup>  
Gabriela T. Nakashima,<sup>a</sup> Fábio M. Yamaji<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Ciências Ambientais, Campus de Sorocaba, 18052-780, Sorocaba-SP, Brasil.

<sup>b</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Itapetininga, 18202-000, Itapetininga-SP, Brasil.

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

*Recebido em 6 de outubro de 2017. Aceito para publicação em 9 de janeiro de 2018*

### 1. Introdução

### 2. Material e métodos

#### 2.1. Material

#### 2.2. Caracterização da matéria-prima

#### 2.3. Confeção dos briquetes

#### 2.4. Caracterização dos briquetes

### 3. Resultados e discussão

#### 3.1. Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar

#### 3.2. Confeção dos briquetes

#### 3.3. Caracterização dos briquetes

### 4. Conclusões

## 1. Introdução

As principais fontes de energia utilizadas globalmente, como carvão e petróleo, são responsáveis pela grande emissão de monóxido de carbono, óxido nitroso, entre outros, corroborando para a poluição do planeta,<sup>1</sup> o que gera demanda por novas fontes de energia sustentáveis, principalmente aquelas renováveis e que colaborem com o ciclo de carbono no meio

ambiente.<sup>2</sup>

Segundo a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP,<sup>3</sup> a bioenergia é uma importante forma de energia limpa e alternativa, sendo a cana-de-açúcar uma cultura extremamente viável para a produção desta. Ainda, de acordo com o Ministério da Agricultura,<sup>4</sup> a safra brasileira 2017/2018 foi de aproximadamente 646 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, sendo o país com maior produção mundial desta monocotiledônea. A crescente

produção de cana-de-açúcar faz do Brasil também um grande produtor de resíduos desta cultura, como por exemplo, o bagaço de cana-de-açúcar, que vem sendo utilizado para obtenção de bioenergia.<sup>5</sup>

Os resíduos agrícolas, agroindustriais e urbanos são importantes fontes de matérias-primas para geração de energia a partir de biomassa. Resíduos da produção de grãos de soja, milho, algodão, da indústria de beneficiamento de arroz, o bagaço das usinas de cana-de-açúcar podem ser utilizados para a produção de briquetes.<sup>6</sup> Alguns autores reportaram a viabilidade de produção de briquetes a partir de resíduos de poda urbana,<sup>7</sup> serragem de eucalipto e pinus,<sup>8</sup> eucaliptos de curta rotação,<sup>9</sup> angelim-vermelho,<sup>10</sup> leucena.<sup>11</sup> De acordo com Quirino e Brito,<sup>12</sup> a briquetagem é uma maneira eficiente para concentrar a energia disponível da biomassa: 1m<sup>3</sup> de briquetes contém pelo menos cinco vezes mais energia que 1m<sup>3</sup> de resíduos.

O uso de aditivos aglutinantes é uma forma de melhor aproveitamento das propriedades dos briquetes. Vários trabalhos encontrados na literatura utilizam-se de aglutinantes a fim de melhorar características de briquetes como resistência e redução de finos.<sup>13-15</sup> Segundo Saleme,<sup>16</sup> as principais características dos aglutinantes, para à produção de briquetes, devem apresentar: alta taxa aglomerante, inexistência de material inerte em sua composição, preço baixo, abundância, resistência mecânica, resistência à umidade e boas condições de operacionalidade. O amido, o melão de cana-de-açúcar, o alcatrão, as resinas sintéticas, entre outros, são os ligantes mais empregados.<sup>6</sup> Fontes e colaboradores<sup>14</sup> elucidam que briquetes produzidos para uso doméstico nos EUA e Europa possuem amido como aglutinante, o que demonstra a viabilidade da utilização do amido em escala comercial de produção. A propriedade aglutinante do amido depende da gelatinização de suas moléculas, processo de perda de orientação devido à quebra de sua estrutura cristalina.<sup>15</sup> De acordo com Souza e Andrade,<sup>17</sup> a temperatura de gelatinização do

amido de milho é de 70 °C, a partir desse ponto os grânulos de amido desestruturam-se.

Esse estudo teve como objetivo analisar o potencial energético do bagaço de cana-de-açúcar e do amido de milho comercial na produção de briquetes, bem como realizar comparação das características físico-mecânicas destes.

## 2. Material e métodos

### 2.1. Material

A biomassa utilizada foi o bagaço de cana-de-açúcar, coletado na usina de Santa Rosa, localizada no Município de Porto Feliz (SP). O material foi então mantido em recipiente plástico selado até o momento das análises laboratoriais a fim de manter suas características. O aglutinante utilizado foi o amido de milho comercial da marca Quero, empregado sem modificação.

### 2.2. Caracterização da matéria-prima

#### 2.2.1. Distribuição granulométrica

Foram realizadas duas classificações granulométricas da biomassa: primeiramente, nas condições em que foi coletada na usina e posteriormente à moagem em laboratório. Para a realização da classificação granulométrica, 100 g do material foi depositado em agitador orbital de peneiras com batidas intermitentes Bertela justado para operar durante cinco minutos. As porções do material retido em cada peneira foram determinadas utilizando-se balança semi-analítica. Com o objetivo de obtenção de partículas menores para compactação do material, este foi então moído em moinho de rotor vertical com facas móveis e fixas, Marconi/modelo MA 340, do tipo Willey.

### 2.2.2. Teor de umidade (base seca)

Amostras de bagaço de cana-de-açúcar e de amido de milho tiveram suas umidades determinadas em um analisador de umidade MX-50 da marca A&D. Para tanto, uma grama de cada material foi depositado sobre o prato de pesagem do equipamento e as amostras foram mantidas sobre aquecimento de, no máximo 110 °C, até que atingissem massa constante.

### 2.2.3. Densidade a granel

A determinação da densidade a granel da

$$\rho_g = \frac{M_a}{V_r}$$

Eq. 1

Sendo que:  $\rho_g$  é a densidade a granel, em  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;  $M_a$  é a massa da amostra, em g e  $V_r$  é o volume do recipiente, em  $\text{cm}^3$ .

### 2.2.4. Teor de voláteis e cinzas

O teor de voláteis foi realizado baseando-se na norma NBR 8112,<sup>21</sup> para carvão vegetal, de acordo com o descrito por Gonçalves e colaboradores.<sup>19</sup> O teste de teor de cinzas foi realizado segundo norma da ASTM D1102-84,<sup>20</sup> de forma adaptada, como reportado por Gonçalves e colaboradores.<sup>19</sup>

### 2.2.5. Poder calorífico superior (PCS)

A análise de poder calorífico superior foi realizada segundo a norma NBR 8633,<sup>22</sup> para carvão vegetal, de forma adaptada. O poder calorífico superior (PCS) dos materiais foram determinados com teor de umidade utilizado no processo de confecção dos briquetes (10% de umidade para o bagaço de cana-de-açúcar

biomassa foi realizada de acordo com o descrito por Gonçalves e colaboradores.<sup>19</sup> A densidade foi mensurada nas condições de granulometria em que se encontravam disponíveis na fonte geradora (9 e 35 mesh) e após sua moagem (menores que 35 mesh) utilizando uma caixa de madeira com dimensões de 10 cm de arestas.

Para a determinação da densidade a granel do amido de milho utilizou-se uma proveta graduada de 100 mL e uma balança semi-analítica. O amido com umidade de 13% foi adicionado à proveta de modo que ficasse nivelada a marca de 100 mL. A densidade do material foi determinada conforme a equação 1.

e 13% para o amido). Para realização das análises de PCS foram utilizados calorímetro e bomba calorimétrica da marca IKA Werke modelo C5003.

## 2.3. Confecção dos briquetes

Segundo delineamento estatístico, foram confeccionados seis briquetes de cada tratamento, totalizando 24 briquetes. A confecção dos briquetes seguiu metodologia utilizada por Chrisostomo e Nakashima e colaboradores.<sup>23,24</sup> Foi empregado 20 g de bagaço de cana-de-açúcar (T1) ou da mistura (bagaço + amido), utilizando-se um molde de aço cilíndrico de 3,5 cm de diâmetro e 16,0 cm de altura. A compactação foi realizada em uma prensa hidráulica, sem uso de aquecimento, com aplicação de pressão constante de aproximadamente  $1300 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$  durante 30 segundos.

Foram realizados quatro tratamentos para a produção dos briquetes, apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Constituição dos tratamentos utilizados na produção dos briquetes

Tratamentos	Bagaço de cana-de-açúcar (%)	Amido (%)	Umidade (%)
T1	100,0	0,0	10,0
T2	97,5	2,5	15,0
T3	95,0	5,0	15,0
T4	90,0	10,0	15,0

Os tratamentos tiveram suas umidades ajustadas de acordo com metodologia de Chrisosotomo,<sup>23</sup> utilizando estufa e auxílio de borrifador contendo água. O bagaço de cana-de-açúcar do tratamento T1 teve sua umidade ajustada a 10%. Os demais tratamentos (T2, T3 e T4) tiveram sua umidade ajustada para 15%, pois para o amido atuar como aglutinante, necessita de maior umidade. Após a compactação de cada briquete (T2, T3 e T4) estes foram mantidos em estufa ajustada a uma temperatura de 125 °C durante 10 minutos, com a finalidade de promover a gelatinização das moléculas de amido a um baixo teor de umidade;<sup>17</sup> tal modificação pode promover efeito aglutinante destas moléculas tornando os briquetes mais resistentes.<sup>13,14</sup>

## 2.4. Caracterização dos briquetes

### 2.4.1. Expansão longitudinal

Para a sua determinação, os briquetes foram medidos longitudinalmente com o auxílio de um paquímetro digital INSIZE logo após sua confecção e de 10 em 10 minutos, até que não houvesse alteração significativa nas medidas dos briquetes. Estes foram condicionados em dessecar de sílica-gel até serem novamente medidos após um período de aproximadamente 8 dias, momento em que foi realizado o teste de resistência de tração por compressão diametral. A diferença entre as medidas iniciais e finais do briquete em porcentagem é considerada como sua expansão longitudinal.

### 2.4.2. Densidade aparente

A densidade aparente foi determinada empregando-se o quociente entre massa e volume de cada briquete. A massa de cada briquete foi determinada em balança semi-analítica e o volume estimado, com base nas dimensões, obtidas com auxílio de paquímetro digital. Os valores foram mensurados no momento do ensaio de tração por compressão diametral

### 2.4.3. Resistência à tração por compressão diametral

O teste foi realizado segundo adaptação da norma NBR 7222,<sup>25</sup> para concretos, após 8 dias da confecção dos briquetes. Para realização do teste utilizou-se a máquina universal de ensaios modelo EMIC DL30000N a uma velocidade de 3mm/min, sendo a carga de 500 kgf aplicada no sentido longitudinal dos briquetes. No ensaio foram verificados os valores de tensão máxima de cada briquete segundo cada tratamento.

### 2.4.4. Teor de umidade dos briquetes

Após a realização do ensaio de tração por compressão diametral, foram analisados os teores de umidade de cada briquete. Para isto, cada briquete foi desintegrado e teve 1 g (material particulado do interior do briquete) analisado em balança determinadora de umidade, a qual manteve as amostras a aquecimento máximo de 110 °C até massa constante.

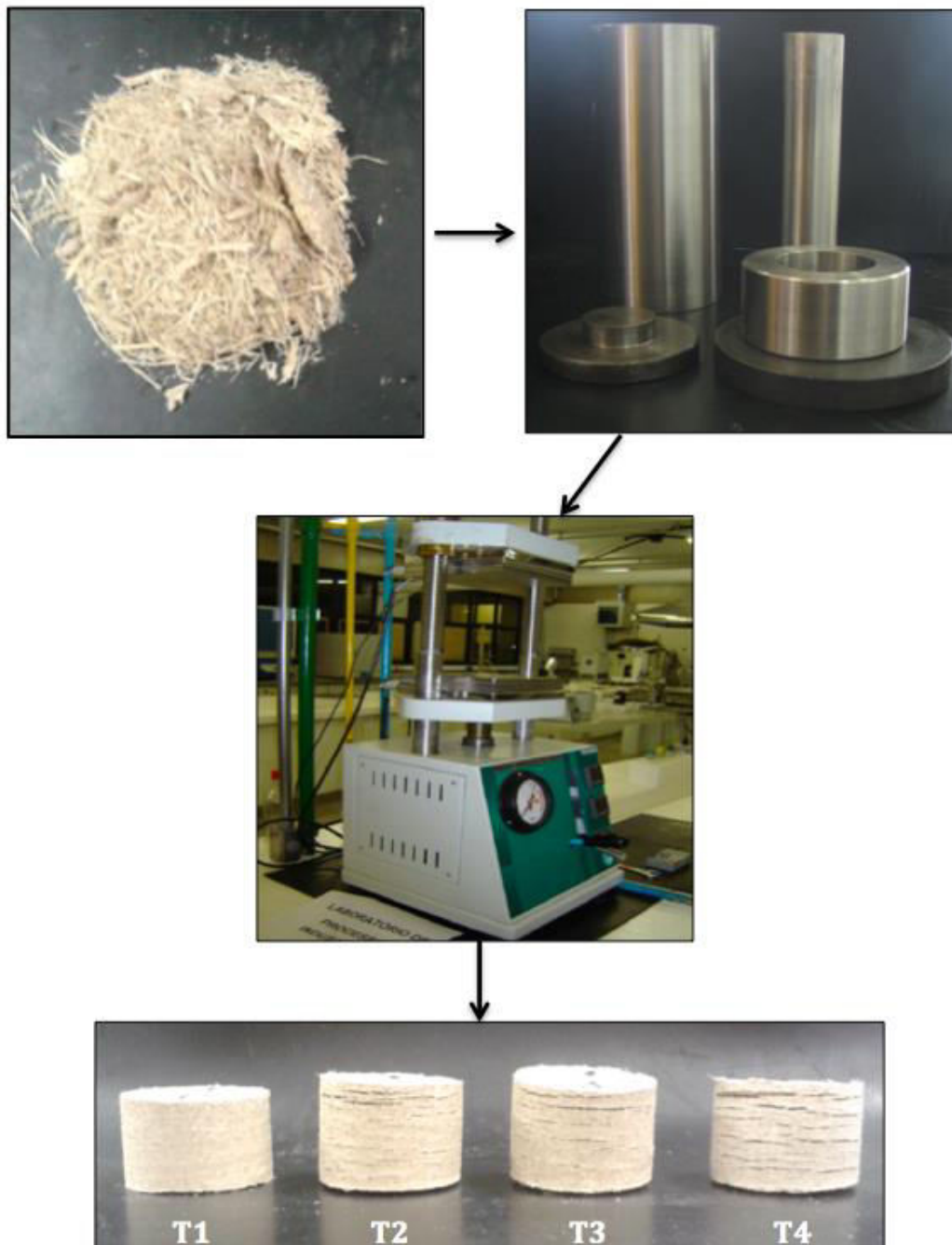


Figura 1. Organograma ilustrativo da produção dos briquetes

### 3. Resultados e discussão

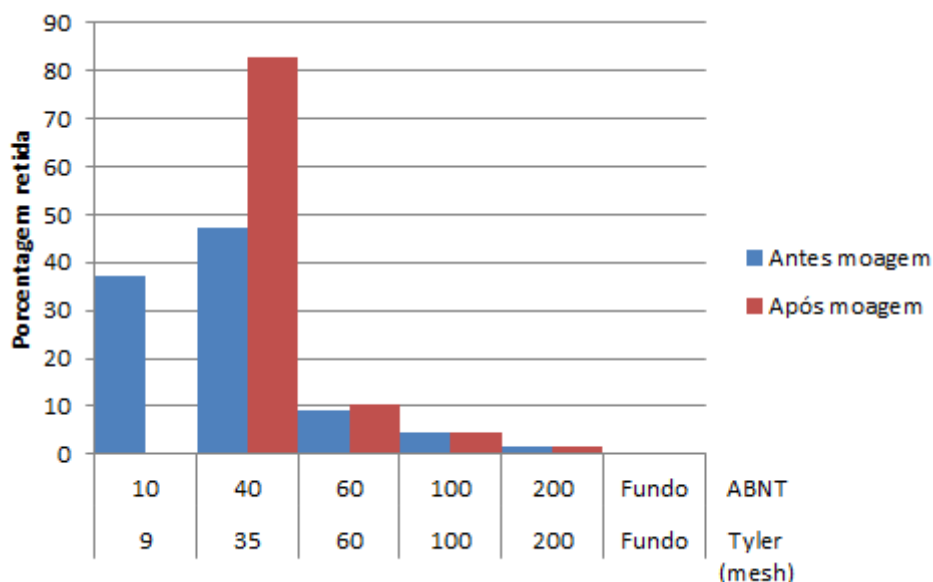
#### 3.1. Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar

##### 3.1.1. Distribuição granulométrica

Analisando a distribuição granulométrica da biomassa obtida após a primeira moagem, observou-se que a maior retenção de partículas se deu nas peneiras de 9 e 35 mesh, demonstrando que o material é majoritariamente composto por partículas grandes para a compactação. Assim, procedeu-se a moagem do material. Após a

moagem, a maior concentração das partículas foi retida na peneira de 35 mesh, sem que houvesse retenção do material em peneiras de maior abertura, mostrando a

diminuição do tamanho da partícula com o processo de moagem. A Figura 2 apresenta a distribuição granulométrica do material.



**Figura 2.** Distribuição granulométrica do bagaço de cana-de-açúcar

### 3.1.2. Teor de umidade dos materiais

O bagaço de cana-de-açúcar apresenta granulometria diretamente da fonte fornecedora apresentou teor de umidade de 28,4%, mostrando-se muito acima do citado como ideal para a compactação, que segundo Grover e Mishra,<sup>26</sup> se encontra na faixa entre 8 a 10%. Este resultado indica a necessidade de secagem do material para procedera compactação do resíduo. Já o amido de milho apresentou teor de umidade de 13% e, apesar de se encontrar um pouco acima desta faixa de umidade ideal para compactação (entre 8 e 10%), não se justificava necessidade de nenhum tratamento para ajuste deste teor de umidade antes da preparação dos briquetes devido à pequena quantidade deste polissacarídeo nos briquetes.

### 3.1.3. Densidade a granel

A densidade a granel do bagaço de cana-de-açúcar na forma em que chegou ao laboratório foi de  $52 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . A densidade a granel do material depois de moído e com umidade ajustada para aproximadamente 10% foi de  $125 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Valores próximos aos encontrados para densidade a granel de bagaço de cana-de-açúcar em seu estado natural e depois de triturado foram de 46 a  $180 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  com teores de umidade de 12,7 e 50%, respectivamente.<sup>27</sup>

O resultado para massa específica do amido de milho utilizado neste trabalho foi de  $597 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , valor próximo ao encontrado por Daiuto e Cereda,<sup>35</sup> que reportaram um valor de  $521 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

### 3.1.4. Teor de voláteis, cinzas e PCS

Na Tabela 2 estão apresentados resultados para o teor de cinzas, voláteis e PCS do bagaço de cana-de-açúcar e do amido.

**Tabela 2.** Resultados do teste de teor de voláteis, cinzas e PCS

Material	Teor de cinzas (%)	Teor de voláteis (%)	Poder calorífico superior (kcal·kg <sup>-1</sup> )
Bagaço de cana-de-açúcar	3,9± 0,4	87,7 ± 1,3	3593 ± 3
Amido	0,1 ± 0,01	94,6 ± 1,1	3637 ± 6

O teor de voláteis encontrado para o bagaço de cana-de-açúcar está próximo ao encontrado na literatura, podendo variar entre 75,56% e 98%.<sup>10, 28</sup> O teor de voláteis encontrado para o amido está de acordo com o esperado pela própria constituição do material, que quando puro, se constitui de moléculas de glicose.<sup>29</sup>

O teor de cinzas encontrado para o amido está de acordo com a literatura, que segundo Souza e Andrade,<sup>17</sup> apresenta-se entre 0,10% a 0,14%, em decorrência do baixo teor de matéria inorgânica em sua constituição. Esta característica do material é muito importante já que sua queima no briquete resulta na produção de pouquíssimo resíduo, o que diminui a necessidade de manutenção dos sistemas de aquecimento. O bagaço de cana-de-açúcar apresentou valor de cinzas de acordo ao encontrado na literatura, que varia de 3.5% até 15,52%.<sup>30, 23</sup> A literatura reporta que a variação nos resultados observada para o teor de cinzas e de voláteis de materiais lignocelulósicos é grande devido a heterogeneidade das amostras e materiais, que podem conter diferentes concentrações de extrativos, material inorgânico, entre outros.

Houve diferença estatística entre os valores de PCS do bagaço de cana-de-açúcar e amido, com o maior valor para o segundo. O valor determinado para o bagaço de cana-de-açúcar está próximo ao valor encontrado por Silva e Morais,<sup>31</sup> de 3641 kcal·kg<sup>-1</sup>. Quanto maior o valor de PCS, melhor o material é considerado para o uso para produção de energia, pois maior é o calor gerado durante a queima do combustível. O poder calorífico superior considera também o calor derivado da condensação da água.<sup>32</sup>

### 3.2. Confecção dos briquetes

Foi possível realizar a compactação das matérias-primas, com a formação de briquetes, nas umidades utilizadas neste estudo, de 10 e 15%. Entretanto, os briquetes produzidos com um teor de umidade mais alto, de 15%, necessário para a gelatinização do amido, se tornaram produtos de baixa estabilidade, não demonstrando qualidade necessária ao transporte e armazenamento. Estes resultados também foram demonstrados nos trabalhos de Quirino e Chrisostomo onde, briquetes produzidos com matéria-prima em umidade fora da faixa ideal, entre 10 a 12%,<sup>27,23</sup> ou seja, a partir de resíduos muito secos ou de alta umidade, apresentam baixa estabilidade devido à dificuldade no empacotamento do material.

### 3.3. Caracterização dos briquetes

#### 3.3.1. Expansão longitudinal

A Tabela 3 apresenta os resultados de expansão longitudinal dos briquetes produzidos segundo cada tratamento. Pode-se observar que os briquetes produzidos apenas com bagaço de cana-de-açúcar e que não passaram pelo regime de temperatura em estufa (T1) foram os que apresentaram menor taxa de expansão; além disso, este resultado foi significativamente diferente dos demais tratamentos que tiveram como resposta ao condicionamento uma expansão rápida que se estabilizou após sua retirada da estufa.



**Tabela 3.** Resultados da expansão longitudinal média dos briquetes. Os números seguintes aos resultados representam o desvio-padrão da média

Expansão longitudinal média (mm)			
Tratamentos	Pós-compactação	Momento do ensaio	Expansão (%)
T1	19,88 ± 0,17	22,85 ± 0,12	14,94 ± 0,17 (a)
T2	21,32 ± 0,13	26,87 ± 0,97	26,03 ± 1,03 (b)
T3	21,37 ± 0,17	26,57 ± 0,74	24,33 ± 0,81 (b)
T4	20,80 ± 0,42	25,98 ± 0,82	24,90 ± 0,82 (b)

Letras diferentes representam diferença estatística de acordo com o Teste de Tukey ao nível de significância de 5%.

Estes resultados da expansão longitudinal podem ser explicados pelo comportamento do material ao condicionamento em câmara climática (21 °C e 65% UR). Os resultados também indicam que o aglutinante do amido nas partículas de biomassa não teve o efeito esperado. Segundo Pereira,<sup>15</sup> a gelatinização da farinha de milho caracteriza-se pela perda da orientação da molécula de amido devido à quebra da estrutura cristalina do grânulo, quando aquecida a sua faixa de temperatura específica ou acima desta. Assim, a exigência de alta temperatura e o baixo teor de umidade explicam a ineficiência do efeito

aglutinante do amido nas condições estudadas.

### 3.3.2. Densidade específica

Os resultados médios de densidade específica estão apresentados na Tabela 4. Pode-se observar que os briquetes produzidos apenas com bagaço de cana-de-açúcar apresentaram valor de densidade específica significativamente superior aos demais tratamentos.

**Tabela 4.** Valores médios de massa específica dos briquetes

Tratamentos	Média (kg·m <sup>-3</sup> )
T1	875 ± 6 (a)
T2	606 ± 29 (b)
T3	725 ± 23 (b)
T4	752 ± 37 (b)

Letras diferentes representam diferença estatística de acordo com o Teste de Tukey ao nível de significância de 5%.

No tratamento T1, o valor encontrado está próximo ao da literatura, que segundo Chrisostomo é de 840 kg·m<sup>-3</sup>.<sup>23</sup> O aumento da densidade a granel (52 kg·m<sup>-3</sup>) para a densidade aparente do produto final (875 kg·m<sup>-3</sup>) representa uma compactação de aproximadamente 17 vezes do material pelo do processo de briquetagem.

Os valores obtidos para a densidade aparente estão de acordo com o esperado e podem ser explicados pelos seguintes fatores: i) taxa de expansão, ou seja, espaço livre disponível entre as partículas de bagaço de cana-de-açúcar e/ou ii) teor de amido que possui mais alta densidade a granel que o bagaço de cana-de-açúcar e promove efeito

aglutinante das partículas de biomassa. O tratamento que apresentou maior densidade foi T1, devido a menor taxa de expansão. Quanto aos outros três tratamentos, devido à alta taxa de expansão inicial, estes foram menos densos que T1 e quanto maior o teor de amido utilizado no tratamento, maior a densidade do briquete.

### 3.3.3. Resistência à tração por compressão diametral

A média dos resultados do ensaio de resistência mecânica dos briquetes estão apresentados na Tabela 5. Pode-se observar que os briquetes produzidos apenas com bagaço de cana-de-açúcar obtiveram média significativamente mais alta que os produzidos com amido, sendo estes os mais resistentes quando comparado aos demais tratamentos.

**Tabela 5.** Resultados obtidos para o ensaio de tração por compressão diametral

Tratamentos	Tensão Máxima Média (MPa)
T1	0,607 ± 0,030 (a)
T2	0,413 ± 0,059 (b)
T3	0,407 ± 0,061 (b)
T4	0,481 ± 0,075 (b)

Letras diferentes representam diferença estatística de acordo com o Teste de Tukey ao nível de significância de 5%.

A diferença entre os resultados de resistência encontrada entre o tratamento T1 e os demais tratamentos pode ser devida a dois motivos principais: i) ao teor de umidade mais alto utilizado na produção daqueles que possuíam amido de milho na sua composição, uma vez que a umidade ideal, segundo a literatura, está situada na faixa entre 8 e 12%;<sup>20</sup> e/ou ii) a alta taxa de expansão destes quando retirados do regime de aquecimento (estufa), indicando que não houve boa interação entre as partículas, resultando na diminuição da resistência mecânica dos briquetes.<sup>23,26</sup> Resultados similares foram reportados por Benício,<sup>13</sup> para briquetes produzidos a partir de carvão vegetal.

Uma vez que o condicionamento dos briquetes em estufa demonstrou efeito

negativo sob a qualidade destes, o uso de uma metodologia alternativa se faz necessária. Furtado e colaboradores e Paula e colaboradores utilizaram temperatura durante prensagem de resíduos florestais e casca de arroz, respectivamente, na obtenção de briquetes viáveis e com alta resistência mecânica. Assim, o uso de temperatura durante o processo de briquetagem parece ser uma boa alternativa, permitindo a ação aglutinante do amido.<sup>33,34</sup>

### 3.3.4. Teor de umidade dos briquetes

O teor de umidade médio encontrado para os briquetes estão apresentados na Tabela 6, para cada tratamento.

**Tabela 6.** Média e desvio-padrão do teor de umidade dos briquetes para cada tratamento

Tratamentos	Umidade Média (%)
T1	10,81 ± 0,28 (a)
T2	13,64 ± 0,34 (b)
T3	13,70 ± 0,29 (b)
T4	13,76 ± 0,34 (b)

Letras diferentes representam diferença estatística de acordo com o Teste de Tukey ao nível de significância de 5%. Letras iguais após as médias indicam médias que não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey com  $\alpha=5\%$ .

Pode-se observar que no momento da compactação e após 8 dias, no ensaio de resistência, os briquetes produzidos com o bagaço de cana-de-açúcar (T1= 10% teor de umidade inicial) tiveram um ligeiro aumento no teor de umidade (10,81 %). Os briquetes que continham a mistura de bagaço de cana-de-açúcar e amido (T2, T3 e T4), com teor de umidade inicial de 15%, perderam umidade. Esse comportamento pode ser explicado pelo acondicionamento na câmara climática (21 °C e 65% UR) que resultava numa umidade de equilíbrio de 12%. Os resultados mostram que o tempo de acondicionamento de 8 dias não foi suficiente para os briquetes atingirem o equilíbrio higroscópico dentro da câmara climática.

#### 4. Conclusões

Todas as condições de tratamento empregadas neste estudo produziram briquetes com características que possibilitam o seu uso para a produção de energia. O tratamento composto apenas pelo bagaço de cana-de-açúcar foi o que apresentou as melhores características para a produção do briquete: maior resistência e menor taxa de expansão, características que facilitam no armazenamento e transporte do produto. Os outros tratamentos apresentaram desempenho inferior devido ao fato de serem menos resistentes e possuírem maior expansão longitudinal.

Pode-se concluir que o bagaço de cana-de-açúcar e o amido de milho não apresentaram uma boa interação na produção de briquetes em função da necessidade de alto teor de umidade para o amido agir como aglutinante enquanto que a compactação da biomassa exige baixo teor de umidade. Os resultados preliminares do presente trabalho permitem estabelecer a importância do estudo de possíveis materiais e técnicas a serem utilizados na produção de briquetes.

#### Agradecimentos

Ao CNPQ e à CAPES (PNPD 02880/09-1) pelas bolsas concedidas.

#### Referências Bibliográficas

- <sup>1</sup> Machado, P. L. O. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. *Química Nova* **2005**, *28*, 329. [CrossRef]
- <sup>2</sup> Goldemberg, J. Biomassa e energia. *Química Nova* **2009**, *32*, 582. [CrossRef]
- <sup>3</sup> Fundação De Amparo À Pesquisa Do Estado De São Paulo - FAPESP. Bioenergy: The Brazilian experience. Brazilian research on bioenergy. Disponível em: <[http://www.fapesp.br/publicacoes/pasta\\_bi](http://www.fapesp.br/publicacoes/pasta_bi)

- oen\_jun2012.pdf >. Acesso em: 17 dezembro 2017.
- <sup>4</sup> Brasil. Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento. Cana-de-açúcar. Brasília, DF. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17\\_08\\_24\\_08\\_59\\_54\\_boletim\\_cana\\_portugues\\_-\\_2o\\_lev\\_-\\_17-18.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_08_24_08_59_54_boletim_cana_portugues_-_2o_lev_-_17-18.pdf)>. Acesso em: 17 dezembro 2017.
- <sup>5</sup> Goldemberg, J.; Lucon, O. Energia e meio ambiente no Brasil. *Estudos Avançados* **2007**, *21*, 7. [Link]
- <sup>6</sup> Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Briquetagem e peletização de resíduos agrícolas e florestais. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/web/mobile/publicacoes/-/publicacao/932713/briquetagem-e-peletizacao-de-residuos-agricolas-e-florestais>>. Acesso em: 17 dezembro 2017.
- <sup>7</sup> Fernandez, B. O.; Yamaji, F. M.; Gonçalves, B. F.; Oliveira, I. W. Biomassa aumenta opção na matriz energética. *Revista da Madeira* **2014**, *139*, 40. [Link]
- <sup>8</sup> Silva, D. A.; Da Róz, A. L.; Pires, A. A. F.; Carvalho, A. M.; Nakashima, G. T.; Pádua, F. A.; Yamaji, F. M. A influência da umidade em propriedades mecânicas de briquetes produzidos com resíduos de madeira (*Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp.). *Revista Virtual de Química* **2017**, *9*, 1078. [CrossRef]
- <sup>9</sup> Eufraide Junior, H. J.; Nakashima, G. T.; Yamaji, F. M.; Guerra, S. P. S.; Ballarin, A. W. Eucalyptus short-rotation coppice for solid fuel production. *Industrial Crops and Products* **2017**, *108*, 636. [CrossRef]
- <sup>10</sup> Fernandez, B. O.; Gonçalves, B. F.; Pereira, A. C. C.; Hansted, A. L. S.; Pádua, F. A., Da Róz, A. L.; Yamaji, F. M. Características mecânicas e energéticas de briquetes produzidos a partir de diferentes tipos de biomassa. *Revista Virtual de Química* **2017**, *9*, 29. [CrossRef]
- <sup>11</sup> Hansted, A. L. S.; Nakashima, G. T.; Martins, M. P.; Yamaji, F. M. Caracterização Físico-Química da Biomassa de *Leucaena leucocephala* para Produção de Combustível Sólido. *Revista Virtual de Química* **2016**, *8*, 1449. [CrossRef]
- <sup>12</sup> Quirino, W. F.; Brito, J. O. Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal. *Laboratório de Produtos Florestais – Séria Técnica* 1991. [Link]
- <sup>13</sup> Benício, E. L.; Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2011. [Link]
- <sup>14</sup> Fontes, P. J. P.; Quirino, W. F.; Brito, J. O. Aglutinantes para briquetagem de carvão vegetal. Disponível em: <<http://www.funtec.org.br/arquivos/aglutinantes.pdf>>. Acesso em: 17 dezembro 2017.
- <sup>15</sup> Pereira, F. A. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, 2009. [Link]
- <sup>16</sup> Saleme, J. E. F. Estudo básico para a briquetagem de carvão vegetal. Ouro Preto: Escola de Minas e Metalurgia, 1992. p.,19.
- <sup>17</sup> Souza, R. C. R.; Andrade, C. T. Gelatinização e extrusão de amido. *Polímeros: Ciência e Tecnologia* **2000**, *10*, 24. [Link]
- <sup>18</sup> Fundação De Estudos E Pesquisas Aquáticas – FUNDESPA. Plano Ambiental Diretor de Porto Feliz, SP. Disponível em: <<http://www.portofeliz.sp.gov.br>>. Acesso em: 21 agosto 2015.
- <sup>19</sup> Gonçalves, B. F.; Yamaji, F. M.; Fernandez, B. O.; da 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]
- <sup>20</sup> American Society for Testing and Materials – ASTM. ASTM D1102-84 - Standard Test Method for Ash in Wood. Disponível em: <<http://www.astm.org/Standards/D1102>>. Acesso em: 17 dezembro 2017.
- <sup>21</sup> Associação Brasileira De Normas Técnicas – ABNT. NBR 8112 – Carvão vegetal: análise imediata. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=7339>>. Acesso em: 19 dezembro 2017.
- <sup>22</sup> Associação Brasileira De Normas Técnicas – ABNT. NBR 8633 - Carvão vegetal - Determinação do poder calorífico. Disponível em:

<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=6882>>. Acesso em: 19 dezembro 2017.

<sup>23</sup> Chrisostomo, W; Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 2011. [Link]

<sup>24</sup> Nakashima, G. T.; Adhmann, I. C. S.; Hansted, A. L. S.; Belini, G. B.; Waldman, W.R.; Yamaji, F.M. Materiais Lignocelulósicos: Caracterização e Produção de Briquetes. *Revista Virtual de Química* **2017**, *9*, 150. [CrossRef]

<sup>25</sup> Associação Brasileira De Normas Técnicas. – ABNT. NBR 7222 – Argamassa e concretos: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Disponível em:<<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=87151>>. Acesso em: 19 dezembro 2017.

<sup>26</sup> Grover, P. D.; Mishra, S. K. Biomass Briquetting: technology and practices. Disponível em:<<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.583.8594&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 17 dezembro 2017.

<sup>27</sup> Quirino, W. F. Briquetagem de resíduos lignocelulósicos. Disponível em:<[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/leresiduos3\\_000g823ugcv02wx5ok0u5nfp9o181zj.pdf](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/leresiduos3_000g823ugcv02wx5ok0u5nfp9o181zj.pdf)>. Acesso em: 17 dezembro 2017.

<sup>28</sup> Chaves, C. V. L.; Villar, S.; Tavares Neto, J. I. H.; Ramos, A. P.; Carvalho, S. H. V.; Soletti, J. I. Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis, Brasil, 2014. [Link]

<sup>29</sup> Zobel, H. F. Molecules to granules: a comprehensive starch review. *Starch* **1988**, *40*, 44. [CrossRef]

<sup>30</sup> Capote F. G.; Muniz, G. I. B.; Watzlawick, L. F.; Quirino, W. F.; Brand, M. A.; Vecchiatto, W. W. D.; Galvan, M. C.; Moreira, M. A. C. Análise comparativa das características físico-químicas entre três amostras de briquete. *Revista ABIB Brasil biomassa e bioenergia, woodchips, pellets e briquetes* **2002**, *37*. [Link]

<sup>31</sup> Silva, M. B.; Morais, A. S. Resumos do Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro, Brasil, 2008. [Link]

<sup>32</sup> Quirino, W.F.; Vale, A.T.; Andrade, A.P.; Abreu, V.L.S.; Azevedo, A.C.S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. *Revista da Madeira* **2005**, *89*, 100. [Link]

<sup>33</sup> Furtado, T. S.; Valin, M.; Brand, M. A.; Bellote, A. F. J. Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. *Pesquisa Florestal Brasileira* **2010**, *30*, 101. [CrossRef]

<sup>34</sup> Paula, L. E. R.; 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]

<sup>35</sup> Daiuto, E. R; Cereda, M. P. Influência da granulometria de grânulos de sobre a densidade aparente de extratos atomizados. *Revista de Ciências Farmacêuticas Básica e Aplicadas* **2006**, *27*, 51. [Link]