

## Artigo

**Briquetes de Bagaço de Cana-de-Açúcar e Pó de Lixa de *Eucalyptus* spp: Caracterização e Equilíbrio Higroscópico****Aló, L. L.; Konishi, P. A.; Belini, G. B.; Silva, J. P.; Martins, M. P.; Nakashima, G. T.; Caraschi, J.C.; Yamaji, F. M.\****Rev. Virtual Quim.*, 2017, 9 (2), 774-785. Data de publicação na Web: 10 de fevereiro de 2017<http://rvq.sbq.org.br>**Briquettes of Sugarcane Bagasse and *Eucalyptus* spp Sawdust: Characterization and Hygroscopic Equilibrium**

**Abstract:** The knowledge of the hygroscopic behavior is an important factor in the characterization of compacted biomass. The aim of this study was to characterize blends of sawdust and sugar cane bagasse briquettes in different storage conditions. The proportions of sawdust and sugarcane bagasse were determined so that the blends reached moisture contents that defined 4 treatments: T1 (22.5%): 30% sawdust and 70% sugar cane bagasse; T2 (17.5%): 50% sawdust and 50% sugar cane bagasse; T3 (13.8%): 65% sawdust and 35% sugar cane bagasse e T4 (10.0%): 80% sawdust and 20% sugar cane bagasse. After compaction the briquettes were subjected to three different conditions: A1 (63% UR), A2 (75% UR) e A3 (45% UR). They were produced 30 briquettes for each treatment. The briquettes were left in storage for 10 days. The analysis of the briquettes was performed by determining the weight variation, longitudinal expansion and mechanical strength. It was observed that the briquettes of treatment T3 (13.8%) showed the best results on the longitudinal expansion (3.45%) and obtained the highest mechanical resistance (1.10 MPa). The storage of briquettes in A1 (63% UR) and A3 (45% UR) resulted in lower longitudinal expansion and greater mechanical resistance. The results confirmed that the addition of sawdust, in different proportions, in the compaction of sugarcane bagasse, decreased the high hygroscopicity of sugarcane bagasse, resulting in dimensional stability and resistant briquettes, and it is an alternative to energetic reuse of these wastes.

**Keywords:** Bioenergy; biomass; residues.

**Resumo**

O conhecimento do comportamento higroscópico é um fator importante para a caracterização da biomassa compactada. O objetivo deste trabalho foi caracterizar briquetes de blendas de pó de lixa e bagaço de cana-de-açúcar em diferentes condições de armazenamento. As proporções de pó de lixa e bagaço de cana-de-açúcar foram determinadas de modo que as blendas atingissem teores de umidade que definiram 4 tratamentos: T1(22,5%): 30% pó de lixa e 70% bagaço de cana-de-açúcar; T2 (17,5%): 50% pó de lixa e 50% bagaço de cana-de-açúcar; T3 (13,8%): 65% pó de lixa e 35% bagaço de cana-de-açúcar e T4 (10,0%): 80% pó de lixa e 20% bagaço de cana-de-açúcar. Após a compactação os briquetes foram submetidos a três condições de armazenamento: A1(63% UR), A2 (75% UR) e A3 (45% UR). Para cada tratamento foram confeccionados 30 briquetes, dos quais 10 foram submetidos a cada um dos três acondicionamentos por 10 dias. A análise dos briquetes foi realizada por meio da determinação da variação de massa, expansão longitudinal e resistência mecânica. Observou-se que os briquetes do tratamento T3 (13,8%) apresentaram os melhores resultados quanto à expansão longitudinal (3,45%) e obtiveram a maior resistência mecânica (1,10 MPa). Observou-se também que o armazenamento dos briquetes em A1 (63% UR) e A3 (45% UR) resultou nas menores expansões longitudinais e maiores resistências mecânicas. Os resultados confirmaram que a adição do pó de lixa, em diferentes proporções, na compactação do bagaço de cana-de-açúcar diminuiu a alta higroscopicidade inerente ao bagaço de cana-de-açúcar, resultando em briquetes dimensionalmente estáveis e resistentes, além de ser uma alternativa para o reaproveitamento energético desses resíduos.

**Palavras-chave:** Bioenergia; biomassa; resíduos.

\* 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: [10.21577/1984-6835.20170048](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20170048)

## Briquetes de Bagaço de Cana-de-Açúcar e Pó de Lixa de *Eucalyptus* spp: Caracterização e Equilíbrio Higroscópico

Livia L. Aló,<sup>a</sup> Paula A. Konishi,<sup>a</sup> Gabriela B. Belini,<sup>a</sup> Juliette P. da Silva,<sup>a</sup> Mariana P. Martins,<sup>a</sup> Gabriela T. Nakashima,<sup>a</sup> José C. Caraschi,<sup>b</sup> Fabio 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> Universidade Estadual Paulista, Campus Itapeva, Itapeva-SP, Brasil.

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

*Recebido em 4 de novembro de 2016. Aceito para publicação em 7 de fevereiro de 2017*

### 1. Introdução

### 2. Material e Métodos

#### 2.1. Material

#### 2.2. Classificação granulométrica

#### 2.3. Moagem

#### 2.4. Teor de umidade e densidade a granel

#### 2.5. Análise química imediata

#### 2.6. Determinação do poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI)

#### 2.7. Descrição dos tratamentos

#### 2.8. Produção de briquetes

#### 2.9. Ensaio mecânico

#### 2.10. Análise estatística

### 3. Resultados e Discussão

### 4. Conclusão

## 1. Introdução

A utilização de resíduos agroindustriais como fonte de energia funciona como uma alternativa aos combustíveis sólidos convencionais como a lenha e o carvão. O Brasil, um grande produtor de biomassa vegetal, produz cerca de 167 milhões de

toneladas de bagaço de cana-de-açúcar por ano.<sup>1-3</sup> Segundo um levantamento do Ministério do Meio Ambiente<sup>4</sup> estima-se que são gerados no Brasil, aproximadamente, 30 milhões de toneladas de resíduos de madeira por ano, tendo como principal fonte geradora a indústria madeireira, principalmente na forma de serragem, costaneiras, pontas de toras, pó de serra e de lixa.<sup>4</sup>

Nesse contexto, destaca-se a briquetagem, processo de compactação da biomassa para fins energéticos.<sup>5</sup> É um método eficiente para elevar a densidade dos resíduos, fornecendo um biocombustível sólido com uma maior concentração de energia por unidade de volume, o que favorece o seu manuseio, transporte e estocagem.<sup>6,7</sup>

O teor de umidade da biomassa é um dos parâmetros mais importantes no processo de briquetagem.<sup>8</sup> Na compactação dos resíduos lignocelulósicos, por exemplo, a água atua tanto como um ligante, favorecendo as interações intermoleculares ao ampliar a área de contato entre as partículas, como também como agente lubrificante, que aliado à lignina apresenta um papel fundamental na adesão da biomassa na forma de briquete.<sup>9,10</sup>

De acordo com Quirino<sup>5</sup> a faixa ideal do teor de umidade para o processo de briquetagem está entre 10 e 20%. A biomassa com umidade abaixo ou acima dos valores adequados prejudica o empacotamento do material, produzindo briquetes de baixa estabilidade. Outro fator que deve ser avaliado é a higroscopicidade da biomassa, visto que em virtude da umidade ambiente a que é exposta, a biomassa pode adsorver ou perder água para o ambiente até atingir um equilíbrio dinâmico, o que afeta diretamente a estabilidade dimensional e durabilidade da biomassa compactada na forma de briquete.<sup>11</sup>

Yamaji e colaboradores<sup>12</sup> avaliaram o comportamento higroscópico de briquetes de diversas biomassas predominantes nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. Nesse trabalho, observou-se que o bagaço de cana-de-açúcar foi o resíduo com a maior higroscopicidade, apresentando uma adsorção de água de 11,56%, quando armazenados por 94 dias em três fases de acondicionamento, com diferentes temperaturas e umidades relativas, o que acarretou em uma grande expansão longitudinal dos briquetes, tornando-os frágeis e quebradiços.

Uma alternativa para contornar esse

problema e permitir a compactação eficiente do resíduo de bagaço de cana-de-açúcar é a confecção de blendas, ou seja, de briquetes compostos, produzidos com mais de um tipo de biomassa com diferentes propriedades higroscópicas, de modo a se obter uma média ponderada da higroscopicidade final em função da composição percentual de cada biomassa que constitui a blenda.<sup>13</sup> Resíduos como serragens de *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp., folha de coqueiro e acículas de *Pinus* sp. e *Araucaria angustifolia* são exemplos de materiais possíveis de serem empregados na confecção das blendas por apresentarem menor higroscopicidade em relação ao bagaço de cana-de-açúcar.<sup>12</sup>

Este trabalho teve como objetivo a confecção de briquetes com blendas de bagaço de cana-de-açúcar e pó de lixa em diferentes proporções e umidades. Os objetivos específicos foram avaliar o comportamento higroscópico desses briquetes quando submetidos a diferentes armazenamentos, bem como sua estabilidade dimensional e a resistência mecânica.

## 2. Material e Métodos

### 2.1. Material

Os resíduos utilizados neste estudo foram o pó de lixa da madeira de *Eucalyptus* spp., obtido na empresa Celmar, indústria do setor moveleiro localizada no município de Salto de Pirapora-SP, e o bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) obtido em uma usina de álcool localizada em João Pinheiro-MG.

### 2.2. Classificação granulométrica

O pó de lixa e o bagaço de cana-de-açúcar coletados passaram por um agitador orbital de peneiras com batidas intermitentes no topo, modelo MA 750, durante 5 minutos.

Foram utilizadas as peneiras: 20 mesh, 35 mesh, 60 mesh, 100 mesh e 200 mesh.

### 2.3. Moagem

O bagaço de cana-de-açúcar foi triturado utilizando-se um moinho de rotor vertical com facas móveis e fixas Willey MA-340. O objetivo foi a redução do tamanho das partículas para adaptação ao molde. Foram utilizados todos os tamanhos de partículas resultantes da moagem.

### 2.4. Teor de umidade e densidade a granel

Para a determinação do teor de umidade dos materiais foi utilizada uma balança determinadora de umidade MX-50. A densidade a granel dos resíduos foi determinada com base na norma ABNT NBR 6922/81.<sup>14</sup> Ambos os procedimentos foram realizados em triplicata para cada tratamento.

$$PCI = PCS - 600(9H/100) \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

PCI: Poder calorífico inferior ( $\text{kcal.kg}^{-1}$ );

PCS: Poder calorífico superior ( $\text{kcal.kg}^{-1}$ );

H: Teor de hidrogênio.

### 2.7. Descrição dos tratamentos

Para o preparo das blendas foram realizados quatro tratamentos com quantidades variadas de pó de lixa (5,3% de teor de umidade no momento da coleta) e bagaço de cana-de-açúcar (30,1% de teor de umidade no momento da coleta). As proporções das biomassas empregadas em

### 2.5. Análise química imediata

A análise química imediata (teores de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo) foi realizada em triplicata, conforme a norma ASTM D3172-89.<sup>15</sup>

### 2.6. Determinação do poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI)

O poder calorífico superior dos resíduos e das blendas foi obtido conforme a norma ASTM D5865-13,<sup>16</sup> no Laboratório de Análises Calorimétricas da Universidade Estadual Paulista (Unesp), campus Itapeva, em uma bomba calorimétrica C5000 IKA® WERKE.

O poder calorífico inferior (PCI) foi determinado, considerando 6% de teor de hidrogênio na madeira, a partir da equação (Eq. 1) utilizada por Gonçalves e colaboradores<sup>17</sup> e Moreira e colaboradores<sup>18</sup>:

cada tratamento e suas umidades são apresentadas na Tabela 1.

O teor de umidade adequado para a compactação de resíduos lignocelulósicos é de 10-20%.<sup>5</sup> O bagaço de cana-de-açúcar apresentou teor de umidade elevado (30,1%), enquanto o teor de umidade verificado para o pó de lixa foi baixo (5,3%), dessa forma, ambas as condições não são as ideais e, isoladamente, não poderiam ser utilizadas para a produção de briquetes. Esses resultados indicam a viabilidade da mistura dessas biomassas para a confecção de blendas com teores de umidade adequados sem a necessidade de procedimentos de secagem ou umidificação das matérias-primas.

**Tabela 1.** Umidade final e porcentagens de pó de lixa e bagaço de cana-de-açúcar para cada tratamento

Tratamento	Umidade (%)	Proporção da blenda (%)	
		Pó de lixa	Bagaço de cana
T1	22,5	30	70
T2	17,5	50	50
T3	13,8	65	35
T4	10,0	80	20

## 2.8. Produção de briquetes

As blendas foram homogeneizadas manualmente, por cerca de 20 minutos, e deixadas em repouso por 24 horas para equilíbrio do sistema. No processo de briquetagem, utilizou-se uma prensa hidráulica Marconi- MA 098 e um molde de aço inox com 3,50 cm de diâmetro e 16,00 cm de altura. Para cada tratamento foram adicionados ao molde 20 g da mistura de biomassa, compactados a uma pressão de 1250 kgf.cm<sup>-2</sup> durante 30 segundos. Com o auxílio de um paquímetro, mediu-se a altura de cada briquete logo após a prensagem.

Após a produção, os briquetes foram levados para o armazenamento. Foram testados três tipos de acondicionamento em umidades relativas (UR) diferentes: (A1) umidade ambiente de 63% (testemunha); (A2) umidade relativa de 75% (ambiente úmido), criada a partir da utilização de uma solução saturada de NaCl dentro de um dessecador com ventilação interna e à temperatura de 23 °C e (A3) umidade relativa de 45% (ambiente seco), criada utilizando-se sílica dentro de um dessecador com ventilação interna e à temperatura de 23 °C. Foram confeccionados 30 briquetes de cada tratamento, distribuídos nos três tipos de acondicionamento (10 briquetes em cada).

Durante o período de acondicionamento, acompanharam-se as alterações da massa e da altura (expansão) dos briquetes em cada situação.

## 2.9. Ensaio mecânico

Após 10 dias, a resistência mecânica dos briquetes foi determinada por meio do ensaio mecânico de tração por compressão diametral, adaptado da norma ABNT NBR 7222/11,<sup>19</sup> utilizando-se uma máquina universal de ensaios EMIC com capacidade máxima de 300 kN, com uma célula de carga de 500 N a uma velocidade de 3 mm/min. A carga foi aplicada no sentido transversal da amostra, perpendicular à pressão de compactação.

## 2.10. Análise estatística

Os resultados de resistência mecânica e análise química imediata foram submetidos à análise de variância a 5% de significância. Nas propriedades em que a hipótese nula foi rejeitada, as médias foram comparadas também a 5% de significância pelo teste de Tukey. Para as análises estatísticas foi utilizado o software R.

## 3. Resultados e Discussão

A tabela 2 apresenta a distribuição granulométrica do pó de lixa e bagaço de cana-de-açúcar, após o material ser coletado.

**Tabela 2.** Distribuição granulométrica do pó de lixa e do bagaço de cana-de-açúcar

Mesh	Pó de lixa (%)	Bagaço de cana (%)
20	0,00	27,70
35	0,30	41,80
60	25,20	16,70
100	49,10	7,70
200	21,00	4,80
Coletor	4,40	1,30

Os resultados da classificação granulométrica mostraram que o pó de lixa apresentou partículas com tamanho menor que 0,50 mm (35 mesh), não havendo necessidade de moagem para a briquetagem. A distribuição granulométrica do bagaço de cana-de-açúcar evidenciou a heterogeneidade do material coletado, com

partículas maiores que 0,84 mm (20 mesh) até menores que 0,07 mm (200 mesh). Desta forma, para homogeneizar e adequar as partículas ao tamanho do molde, passou-se este material por um moinho de facas.

Os resultados obtidos das densidades a granel das biomassas isoladas e das blendas obtidas estão descritos na Tabela 3.

**Tabela 3.** Densidade a granel dos resíduos

Material	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )
Bagaço de cana	0,10
Pó de lixa	0,27
T1	0,13
T2	0,17
T3	0,20
T4	0,25

O pó de lixa apresentou uma densidade a granel de 0,27 g.cm<sup>-3</sup>, que corresponde a aproximadamente o triplo da densidade a granel obtida para o bagaço de cana-de-açúcar, de 0,10 g.cm<sup>-3</sup>. Analisando-se as densidades das blendas na Tabela 3, foi possível observar que quanto maior o teor de pó de lixa, maior foi a densidade a granel obtida. Uma elevada densidade a granel é essencial para a viabilidade econômica de um combustível, pois favorece a sua densidade

energética e reduz os custos relacionados ao seu transporte e estocagem.<sup>20</sup> Além disso, o maior teor de pó de lixa resultou em uma umidade menor, e assim, também contribuindo com o aumento do poder calorífico.

Na Tabela 4 são apresentadas a análise química imediata (teores de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo) das blendas, o respectivo poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI).

**Tabela 4.** Análise química imediata, poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI) para cada tratamento

Material	Teores de cinzas (%)	Materiais voláteis (%)	Carbono fixo (%)	PCS (kcal.kg <sup>-1</sup> )	PCI (kcal.kg <sup>-1</sup> )
Bagaço de cana	2,54 f	83,33 a	14,13 f	3812,94	3488,94
Pó de lixa	4,39 a	77,25 f	18,37 a	4115,43	3791,43
T1	3,22 e	80,20 c	16,58 d	4050,43	3726,43
T2	3,51 d	81,41 b	15,08 e	3962,58	3638,58
T3	3,84 c	79,27 d	16,89 c	4008,20	3684,20
T4	4,02 b	78,24 e	17,74 b	4056,58	3732,58

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey.

Houve diferença significativa a 5% entre os tratamentos na análise química imediata (teores de cinzas, materiais voláteis, carbono fixo).

Os teores de materiais voláteis determinados para as biomassas utilizadas neste trabalho mostraram-se dentro do intervalo 76-86% apresentado por Obernberger e Thek.<sup>21</sup> O maior teor de cinzas determinado para o pó de lixa (4,39%) comparado ao bagaço de cana-de-açúcar (2,54%) indica uma desvantagem desse material para a produção de briquetes, uma vez que as cinzas não participam da combustão da biomassa e colaboram para o desgaste acelerado dos moldes e pistões usados na briquetagem.<sup>22</sup> Os teores de carbono fixo das biomassas mostraram-se inferiores aos obtidos por Paula,<sup>23</sup> de 17,16% para o bagaço de cana-de-açúcar e 21,03% para serragem de madeira.

Os resultados obtidos pelo poder calorífico superior e inferior estão conforme o esperado. A diferença apresentada no tratamento T1 indica que houve uma falha no preparo ou na coleta do material para a realização da análise. De acordo com Brand,<sup>24</sup> para a geração de energia são consideradas significativas somente diferenças superiores a 300 kcal.kg<sup>-1</sup>. Observou-se que quanto maior a proporção de pó de lixa, maior foi o poder calorífico encontrado. Dessa forma, concluiu-

se que a proporção de pó de lixa influenciou diretamente na densidade e no poder calorífico das blendas. Os resultados foram obtidos de acordo com a norma ASTM D5865-13,<sup>16</sup> ou seja, com o material seco. Caso fossem considerados os teores de umidade dos tratamentos, as diferenças nos resultados seriam maiores.

### Confecção e avaliação dos briquetes

O tratamento T1 (22,5% de umidade) não permitiu a formação adequada dos briquetes, resultando em briquetes frágeis que expandiram rapidamente, inclusive esfarelando logo após a sua compactação. Esse resultado confirma que a biomassa com um teor de umidade acima de 20% apresenta dificuldade na compactação dos briquetes. Dessa forma, o tratamento T1 foi descartado, visto que não foi possível avaliar o comportamento higroscópico dos briquetes.

Para os tratamentos T2, T3 e T4 foi possível realizar a compactação das blendas, com a formação de briquetes estáveis. Após a prensagem dos briquetes foi medida a altura e a massa de cada corpo de prova, sendo calculada a média para cada blenda. Os resultados obtidos nas medições realizadas logo após a compactação das blendas são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5.** Análise das alturas e das massas médias dos briquetes resultantes das blendas T2, T3 e T4 logo após a prensagem

Tratamentos	Altura média (cm)	Massa média (g)
T2	21,8	19,9
T3	20,0	20,1
T4	20,2	20,2

A altura média dos briquetes logo após a compactação (Tabela 5) mostra que os três tratamentos tiveram uma boa formação dos briquetes. O tratamento T2 (17,5% de umidade) foi o que apresentou o pior desempenho na compactação sendo 9% inferior em relação ao melhor tratamento (T3).

Após a prensagem, os briquetes das blendas T2, T3 e T4 foram divididos em grupos de 10 briquetes, sendo que cada

grupo foi armazenado em ambientes com umidade relativa controlada: A1(63%); A2 (75%) e A3 (45%). Para cada ambiente, determinou-se a umidade de equilíbrio em função da temperatura e da umidade relativa do ambiente fazendo-se uso de tabelas pré-determinadas.<sup>25</sup> Os dados de umidade relativa do ambiente e a umidade de equilíbrio para cada acondicionamento à temperatura de 21,1 °C são apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6.** Umidade ambiente e de equilíbrio a 21,1 °C para cada acondicionamento testado

Acondicionamento	Umidade relativa (%)	Umidade de equilíbrio (%)
A1	63,0	12,0
A2	75,0	14,5
A3	45,0	8,5

Os briquetes permaneceram em cada acondicionamento até que fosse alcançado o equilíbrio, ou seja, quando suas massas atingiram um valor constante. Após esse

período de 10 dias, foram então medidas a massa e a altura dos briquetes, sendo calculadas as suas variações percentuais, apresentadas na Tabela 7.

**Tabela 7.** Análise da variação percentual da massa e da altura dos briquetes (T2, T3 e T4) após 10 dias de armazenamento

	Variação na massa (%)			Variação na altura (%)		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
T2	-7,24	-4,73	-8,37	3,27	3,29	2,07
T3	-3,55	-1,94	-9,72	3,76	5,46	1,13
T4	0,31	3,16	0,60	6,67	13,73	4,59

Na Tabela 7, os valores negativos indicam redução na massa dos briquetes durante o período de armazenamento, justificada pela perda de água para os tratamentos T2 (17,5% de umidade) e T3 (13,8% de umidade). O teor de umidade inicial desses tratamentos era maior do que a umidade de equilíbrio para cada acondicionamento (Tabela 6): A1

(12,0%), A2 (14,5%) e A3 (8,5%). Assim, para atingir o equilíbrio essas blendas tendem a perder umidade. Observou-se também que ocorreu uma expansão dos briquetes dos tratamentos T2 e T3 inversamente proporcional à perda de água. Isso pode ser justificado devido a menor adesão entre as partículas compactadas, além do



relaxamento inerente às fibras de biomassa que ocorre quando a pressão de compactação é liberada.

Um comportamento contrário foi observado para os briquetes confeccionados a partir do tratamento T4 (10,0% de umidade) que apresentaram uma variação positiva na massa dos briquetes para os três acondicionamentos. O equilíbrio ocorreu a partir da adsorção de água do ambiente, o

que favoreceu a maior expansão desses briquetes, com um valor médio de 8,33%.

A perda ou ganho de massa referente ao comportamento higroscópico das blendas interfere na estabilidade e na resistência dos briquetes.<sup>26</sup> Assim, avaliou-se a resistência mecânica dos briquetes por meio do ensaio de tração por compressão diametral. Os resultados dos tratamentos T2, T3 e T4 nos diferentes acondicionamentos (A1, A2 e A3) são apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8.** Valores médios obtidos no ensaio de tração por compressão diametral dos briquetes resultantes dos tratamentos T2, T3 e T4

Tratamentos	Acondicionamentos	Tensão máxima (MPa)
T2	A1	0,72 b
	A2	0,67 c
	A3	0,77 a
T3	A1	1,14 b
	A2	0,97 b
	A3	1,18 a
T4	A1	0,69 b
	A2	0,50 c
	A3	0,87 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula para cada tratamento não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey.

Como pode ser observado na Tabela 8, os briquetes do tratamento T3 (13,8%) apresentaram a maior resistência mecânica, com uma média de 1,10 MPa, enquanto os briquetes das blendas T2 e T4 apresentaram médias de 0,72 e 0,69 MPa, respectivamente.

Quanto aos diferentes acondicionamentos testados, observou-se que quanto menor a expansão sofrida pelos briquetes, maior resistência mecânica apresentaram. Desse modo, como os briquetes armazenados em sílica (A3) apresentaram a menor expansão média (2,59 cm), foram os mais resistentes para os três tratamentos, com uma resistência média de 0,94 MPa, enquanto os

briquetes armazenados em A1 e A2 apresentaram uma resistência média de 0,85 e 0,71 MPa, respectivamente.

Tanto o T2 como T4 apresentaram diferenças significativas nas resistências entre todos os acondicionamentos. Já com o T3, não houve diferença com os acondicionamentos de A1 e A2, umidades de equilíbrio de 12,0% e 14,5%, respectivamente.

A tabela 9 apresenta também a resistência por compressão diametral, no entanto, considerando o comportamento dos tratamentos nos diferentes acondicionamentos.

**Tabela 9.** Valores médios obtidos no ensaio de tração por compressão diametral dos briquetes resultantes dos acondicionamentos A1, A2 e A3

Acondicionamento	Tratamentos	Tensão máxima (MPa)
A1	T2	0,72 c
	T3	1,14 a
	T4	0,50 b
A2	T2	0,77 c
	T3	1,18 a
	T4	0,59 b
A3	T2	0,67 b
	T3	0,97 a
	T4	0,87 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey.

Todos os tratamentos apresentaram diferença significativa nos acondicionamentos A1 e A2. No acondicionamento A3, não houve diferença entre os tratamentos T3 e T4. Isto mostra que na formação das blendas deve ser considerado o ambiente em que o material será estocado (acondicionado).

#### 4. Conclusão

A mistura de bagaço de cana-de-açúcar e pó de lixa permitiu a obtenção de blendas com teores de umidade controlados (17,5%; 13,8% e 10%) considerados ideais para a formação de briquetes. Desta forma, o emprego de blendas comprovou ser uma alternativa eficiente para corrigir o teor de umidade das biomassas, evitando o processo de secagem.

Com relação aos acondicionamentos testados, observou-se que os briquetes armazenados em A3 (45% UR) apresentaram a menor expansão. Isso demonstra que as condições ambientais influenciam na estabilidade dos briquetes e que briquetes com menor expansão possuem melhor resistência mecânica com menores riscos de desintegração.

#### Referências Bibliográficas

- <sup>1</sup> Felfli, F. F.; Mesap, J. M.; Rocha, J. D.; Fillipeto, D.; Luengo, C. A.; Pippo, W. A. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. *Biomass and Bioenergy* **2011**, *35*, 236. [CrossRef]
- <sup>2</sup> União da Indústria de Cana-de-açúcar. Moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol - safra2015/2016. 2009. [Link]
- <sup>3</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: 25 setembro 2016.
- <sup>4</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: 24 setembro 2016.
- <sup>5</sup> Quirino, W. F. Briquetagem de resíduos lignocelulósicos. Brasília, DF: LPF/IBAMA, 1991. 18 p. (Série técnica, 13). [Link]

- <sup>6</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. [[Link](#)]
- <sup>7</sup> Santos, R. C.; Carneiro, A. C. O.; Castro, R. V. O.; Pimenta, A. S.; Castro, A. F. N. M.; Marinho, I. V.; Boas, M. A. V. Potencial de briquetagem de resíduos florestais da região do Seridó, no Rio Grande do Norte. *Pesquisa Florestal Brasileira* **2011**, *31*, 285. [[Link](#)]
- <sup>8</sup> Arshadi, M.; Gref, R.; Geladi, P.; Dahlquist, S.-A.; Lestander, T. The influence of raw materials characteristics on the industrial pelletizing process and pellet quality. *Fuel Processing Technology* **2008**, *89*, 1142. [[CrossRef](#)]
- <sup>9</sup> Ryu, C.; Finney, K.; Sharifi, V. N.; Swithenbank, J. Pelletised fuel production from coal tailings and spent mushroom compost - Part I Identification of pelletisation parameters. *Fuel Processing Technology* **2008**, *89*, 269. [[CrossRef](#)]
- <sup>10</sup> Stelte, W.; Holm, J. K.; Sanadi, A. R.; Barsberg, S.; Ahrenfeldt, J.; Henriksen, U. B. A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources. *Biomass and Bioenergy* **2011**, *35*, 910. [[CrossRef](#)]
- <sup>11</sup> Kaliyan, N.; Morey, R. V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy* **2009**, *33*, 337. [[CrossRef](#)]
- <sup>12</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>13</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>14</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6922 - Carvão vegetal - ensaios físicos - determinação da massa específica (densidade a granel). 1981. [[Link](#)]
- <sup>15</sup> American Society for Testing and Materials ASTM D3172-89. Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke, 1997. [[Link](#)]
- <sup>16</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>17</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. [[Link](#)]
- <sup>18</sup> Moreira, J. M. M. A. P.; Lima, E. A. de; Goulart, I. C. G. dos R. Impacto do teor de umidade e da espécie florestal no custo da energia útil obtida a partir da queima da lenha. *Comunicado Técnico* 293, 2012. [[Link](#)]
- <sup>19</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7222 - Concreto e argamassa - determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos: método de ensaio. 2011. [[Link](#)]
- <sup>20</sup> Protásio, T. P.; Alves, I. C. N.; Trugilho, P. F.; Silva, V. O.; Baliza, A. E. R. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. *Pesquisa Florestal Brasileira* **2011**, *31*, 273. [[CrossRef](#)]
- <sup>21</sup> Obernberger, I.; Thek, G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior. *Biomass and Bioenergy* **2004**, *27*, 653. [[CrossRef](#)]
- <sup>22</sup> Yaman, S. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. *Energy Conversion & Management* **2004**, *45*, 651. [[CrossRef](#)]
- <sup>23</sup> Paula, L. E. R.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Lavras, 2010. [[Link](#)]
- <sup>24</sup> Brand, M. A. *Energia da biomassa florestal*, 1a. ed., Interciência: Rio de Janeiro, 2010.
- <sup>25</sup> Simpson, W. T. Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models. *Wood and Fiber* **1973**, *5*, 41. [[Link](#)]

<sup>26</sup> Silva, D. A.; Yamaji, F. M., Barros, J. L., Róz, A. L., Nakashima, G. T. Caracterização de biomassas para a briquetagem. *Floresta* **2015**, *45*, 713. [[CrossRef](#)]