

# CARACTERIZAÇÃO E COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES GRANULOMETRIAS DE SERRAGEM DE *Eucalyptus grandis* PARA CONFECCÃO DE BRIQUETES<sup>1</sup>

## CHARACTERIZATION AND COMPARISON BETWEEN DIFFERENT SIZES OF *Eucalyptus grandis* SAWDUST FOR BRIQUETTES CONFECTION

Bruna Farrapo GONÇALVES<sup>2,3</sup>; Fábio Minoru YAMAJI<sup>2</sup>; Bianca Oliveira FERNANDEZ<sup>2</sup>; Alessandra Luzia Da RÓZ<sup>2</sup>; Francielly Siqueira FLORIANO<sup>2</sup>

**RESUMO** – A grande geração de resíduos lignocelulósicos, a partir de processos industriais e da agricultura, torna o uso da biomassa uma fonte de energia térmica viável; sua compactação aumenta sua densidade, seu poder calorífico e sua resistência. O objetivo da pesquisa consistiu na comparação entre briquetes produzidos a partir de diferentes granulometrias de serragens de *Eucalyptus grandis*. Os tratamentos foram: T1 = serragem que passou pela peneira de 10 mesh e ficou retida na de 20 mesh (10 a 20); T2 = 20 a 60; T3 = 60 a 100; T4 = 10 a 100. As características da matéria-prima mostraram-se viáveis para a produção de briquetes, com teor de umidade de 12%, 88,65% de voláteis, 0,44% de cinzas, 10,80% de carbono fixo e poder calorífico de 4.229 kcal.kg<sup>-1</sup>. As comparações realizadas entre os tratamentos foram feitas a partir da expansão (diametral e longitudinal) e de ensaios de compressão diametral para força máxima e tensão de força máxima dos briquetes. O tratamento T4 foi o que apresentou os melhores resultados nesses testes (1,04%; 15,06%; 90,22 kgf; 0,6714 MPa, respectivamente), diferindo significativamente, a nível de 5% dos outros tratamentos. A produção em larga escala do tratamento T4 viabiliza a produção dos briquetes, pois não é necessário o processo de separação granulométrica.

Palavras-chave: serragem; briquetes; bioenergia.

**ABSTRACT** – The great generation of lignocellulose wastes from industrial processes and agriculture makes the use of biomass a source of viable thermal energy; its compaction increases its density, its calorific value and its strength. The objective of the research consisted in comparing briquettes produced from different particle sizes of sawdust of *Eucalyptus grandis*. The treatments were: T1 = sawdust that passed through 10 mesh sieve and was retained on the 20 mesh (10 to 20); T2 = 20 to 60; T3 = 60 to 100; T4 = 10 to 100. The characteristics of the raw material proved feasibility to produce briquettes, with moisture content of 12%, 88.65% of volatile, 0.44% of ash, 10.80% of fixed carbon and calorific value of 4,229 kcal.kg<sup>-1</sup>. The comparisons between treatments were from the expansion (diametric and longitudinal) and diametrical compression tests for maximum strength and maximum power voltage of briquettes. The treatment T4 showed the best results in these tests (1.04%, 15.06%, 90.22 kgf; 0.6714 MPa, respectively), differing significantly, to a level of 5% to other treatments. The large-scale production of T4 treatment enables the production of briquettes as the process of particle size separation is not necessary.

Keywords: sawdust; briquettes; bioenergy.

<sup>1</sup> Recebido para análise em 03.09.13. Aceito para publicação em 06.03.14. Artigo proveniente do III SIMATEF – Simpósio de Meio Ambiente e Tecnologia Florestal, realizado na UFSCar – campus Sorocaba, no período de 22 a 24 de maio de 2013, Sorocaba, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Campus Sorocaba, Rodovia João Leme dos Santos (SP-264), Km 110, Bairro do Itinga, 18052-780 Sorocaba, São Paulo, Brasil.

<sup>3</sup> Autor para correspondência: Bruna Farrapo Gonçalves – bruna\_bfg@hotmail.com

## 1 INTRODUÇÃO

A energia utilizada no Brasil é proveniente da biomassa, água (hidráulica), lenha, carvão, lixo, petróleo, gás natural, urânio, entre outras. Essas formas de energia são divididas em renováveis (44,1%), que se regeneram naturalmente num curto espaço de tempo, e não renováveis (55,9%), as quais demoram milhões de anos para se transformarem em combustível. (Brasil, 2012).

Fontes alternativas e sustentáveis de energia tornaram-se uma área de pesquisa de grande importância. Nesse contexto, a utilização da biomassa para gerar energia é estudada como uma das alternativas para a substituição de combustíveis fósseis. A biomassa pode ser convertida em combustível gasoso, líquido e sólido (Chrisostomo, 2011).

A grande geração de resíduos lignocelulósicos, a partir de processos industriais e da agricultura, torna o uso da biomassa uma fonte de energia térmica viável. Portanto, se a matéria-prima florestal for explorada e utilizada corretamente, causará menor impacto ao meio ambiente, por se tratar de um recurso natural renovável (Lima e Silva, 2005).

Um dos gêneros que mais geram resíduos no Brasil é o *Eucalyptus*, o qual inclui mais de 700 espécies, quase todas originárias da Austrália. A área plantada com as espécies de *Eucalyptus* sp. totaliza 4,87 milhões de hectares no Brasil. Os principais produtos derivados dessa espécie de reflorestamento são o papel, a celulose, os painéis de madeira industrializada, a madeira mecanicamente processada, a lenha, paletes e a madeira tratada. As espécies de *Eucalyptus* possuem alta taxa de crescimento por ha no Brasil (40,1 m<sup>3</sup>/ha.ano) em contraste com outros países, como a Suécia (5,5 m<sup>3</sup>/ha.ano) (Associação Brasileira dos Produtores de Florestas Plantadas – ABRAF, 2012).

Em geral, a utilização de resíduo agroflorestal *in natura* como combustível possui baixa eficiência energética, resultado de sua baixa densidade, alta umidade, baixo poder calorífico e diferenças granulométricas (Salame, 1992).

Uma das formas de se utilizar os resíduos lignocelulósicos, mitigando as desvantagens dos resíduos *in natura*, é pela sua compactação, produzindo briquetes ou paletes. A compactação dos resíduos aumenta sua densidade, seu poder calorífico (quantidade de calor liberadas na combustão completa de uma unidade de massa do combustível) e sua resistência. Devido à dimensão e às grandes distâncias internas do país, o aspecto concentração energética assume grande importância. A briquetagem consiste na aplicação de pressão a uma massa de partículas com ou sem adição de ligantes e/ou tratamento térmico (Quirino, 2002).

Nesse contexto, o objetivo da pesquisa consistiu na comparação entre briquetes produzidos a partir de diferentes granulometrias de serragens de *Eucalyptus grandis*.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no laboratório de bioenergia da Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba. A biomassa utilizada para a produção dos briquetes foi a serragem de *Eucalyptus grandis*, coletada em uma serraria na região de Itapetininga–SP.

### 2.1 Preparação do Material para a Briquetagem

Inicialmente, a serragem de *Eucalyptus grandis* foi moída no moinho do tipo Willey MA-340, pois a granulometria do material não se encontrava ideal para a briquetagem.

O material foi separado para que se obtivesse sua classificação granulométrica por peneiras de 9 mesh (10 ABNT), 20 mesh (20 ABNT), 35 mesh (40 ABNT), 60 mesh (60 ABNT), 100 mesh (100 ABNT), 200 mesh (200 ABNT) e coletor, com o auxílio do agitador orbital de peneiras com batidas intermitentes MARCONI. Após a classificação, o material para cada tratamento foi devidamente separado.

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

Tabela 1. Diferença granulométrica entre os tratamentos, sendo o primeiro número a granulometria em que o material passou e o segundo a granulometria da peneira no qual o material ficou retido.

Table 1. Particle size difference between treatments, the first number means the sieve size in which the material has passed through and the second number means the sieve size that retained the material.

Tratamentos	Granulometria (mesh)
T1	10 – 20
T2	20 – 60
T3	60 – 100
T4	10 – 100

## 2.2 Caracterização da Matéria-Prima

### 2.2.1 Determinação do teor de umidade

A umidade da serragem de todos os tratamentos foi obtida com a utilização da balança determinadora de umidade A & D.

### 2.2.2 Determinação da densidade

A densidade da serragem pré-briquetagem foi obtida para cada tratamento preenchendo-se um cubo de madeira, com dimensões de 10 cm de arestas, com serragem e medindo a massa contida no recipiente.

### 2.2.3 Determinação do teor de voláteis

Para a determinação do teor de voláteis, com base na norma NBR 8112 da ABNT (D - 1762 - 64 da ASTM) para carvão, utilizou-se a serragem que passou pela peneira de 35 mesh e ficou retida na peneira de 60 mesh. Cerca de 1 g de serragem totalmente seca foi depositada num cadinho já calcinado. O cadinho tampado, contendo a amostra, foi posicionado na porta da mufla BRAVAC previamente aquecida a  $950 \pm 10$  °C, permanecendo nesta posição durante 2 minutos; em seguida, o cadinho foi colocado na borda da parte de dentro da mufla por 3 minutos. Por fim, o cadinho foi introduzido no interior da mufla, à temperatura de  $950 \pm 10$  °C, com a porta fechada, durante 6 minutos. Após o aquecimento, o cadinho foi esfriado em dessecador com sílica gel até massa constante.

O cálculo para se obter o teor de voláteis é dado pela equação 1:

$$TVoláteis = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 \quad (1)$$

em que:  $P_i$  e  $P_f$  são as massas iniciais e finais da amostra de serragem contida no cadinho, respectivamente.

### 2.2.4 Determinação do teor de cinzas

A determinação do teor de cinzas foi realizada segundo a NBR 8112 da ABNT (D - 1762 - 64 da ASTM) para carvão. A amostra foi posicionada dentro da mufla BRAVAC previamente aquecida a  $750 \pm 10$  °C, durante 6 horas. Após este período, o cadinho foi esfriado em dessecador com sílica gel durante 1 hora. Por fim, o material foi pesado. O cálculo para se obter o teor de voláteis foi obtido empregando-se a equação 2:

$$TCinzas = \frac{P_c}{P_i} \times 100 \quad (2)$$

em que:  $P_c$  é a massa da amostra que ficou retida no cadinho após o processo e  $P_i$  é massa inicial (antes de ser efetuada o teor de voláteis) da amostra de serragem.

### 2.2.5 Determinação do poder calorífico superior – PCS

O poder calorífico foi obtido com o auxílio do Calorímetro IKAWERKE C5003. Inicialmente, um fio de algodão foi fixado à base da bomba calorimétrica de modo a ficar em contato com a amostra de serragem de eucalipto (60 mesh) contida no cadinho de quartzo. A bomba calorimétrica, já montada, foi imersa em uma solução de água com um produto (1 mL/L) que facilita a condutividade térmica no calorímetro. O ar ambiente (com 21% de  $O_2$ ) contido na bomba calorimétrica é retirado e o  $O_2$  é então adicionado (a 30 bar de pressão). Por fim, a temperatura da água é homogeneizada e ocorre a liberação de energia (ignição) para dar partida na combustão. A elevação da temperatura da água é calculada para obtermos o poder calorífico superior.

## 2.3 Confecção dos Briquetes

Com a utilização de um molde de metal cilíndrico de 3,5 cm de diâmetro e 16 cm de altura, foram confeccionados 10 briquetes, com 20 g de serragem (com 12% de umidade) cada, para cada tratamento. O material foi compactado sem aquecimento com o auxílio de uma briquetadeira Marcon MPH-15 a 12 ton, durante 30 segundos. Após a formação de cada briquete, mediu-se, com o suporte de um paquímetro digital INSIZE, sua altura e diâmetro.

## 2.4 Caracterização dos Briquetes

### 2.4.1 Determinação do teor de umidade

O teor de umidade pós-testes foi obtido com a ajuda da balança determinadora de umidade A & D, a fim de observar se houve perda ou ganho de umidade.

### 2.4.2 Determinação da densidade

A densidade do briquete foi obtida medindo-se a altura e o diâmetro de cada briquete.

### 2.4.3 Cálculo do teor de carbono fixo

O cálculo do teor de carbono fixo ( $TC_{fixo}$ ) pode ser obtido empregando-se a equação 3:

$$TC_{Fixo} = 100 - (TVoláteis + TCinzas) \quad (3)$$

### 2.4.4 Aferição da expansão

Após 15 dias da confecção dos briquetes, mediram-se novamente, com a ajuda de um paquímetro digital INSIZE, suas alturas e seus diâmetros, a fim de verificar a taxa de expansão na confecção dos briquetes dos diferentes tratamentos.

### 2.4.5 Ensaios de compressão diametral

Após 14 dias da confecção dos briquetes (os quais permaneceram a uma ventilação constante

para evitar um aumento em sua umidade) realizou-se o Teste de Tração por Compressão Diametral, adaptado da norma ABNT NBR 7222 para concretos, empregando-se uma máquina universal de ensaios EMIC DL30000N, com o intuito de verificar a resistência mecânica (tensão força máxima) dos briquetes. O teste foi realizado a uma velocidade de 3 mm/min. A análise estatística inteiramente ao acaso (ANOVA), seguida do teste de Tukey, foi realizada a nível de 5% de significância para verificar se houve diferenças entre os teores de expansão dos briquetes e as resistências dos diferentes tratamentos.

### 2.4.6 Ensaio de tamboramento

Após oito semanas, realizou-se o teste de tamboramento; neste teste, três briquetes foram inseridos em uma caixa de dimensão 50 x 50 x 10 cm, a qual girou a 55 rpm durante 14 minutos (770 voltas). Por fim, mediu-se a massa da serragem que se despedaçou do briquete e, já tendo a massa dos briquetes inteiros, o cálculo a seguir foi feito empregando-se a equação 4.

$$\%Perda = \frac{Ms}{Mi} \times 100 \quad (4)$$

em que:  $M_s$  é a massa da serragem que se despedaçou e  $M_i$  é a massa inicial dos briquetes.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Preparação do Material para a Briquetagem

Na Tabela 2, estão apresentados os resultados da distribuição das partículas após análise granulométrica. Pode ser observado que a serragem de *Eucalyptus grandis*, depois de ser moída, possuiu, em sua maioria, uma granulometria que passou na peneira de 20 mesh e ficou retida na peneira de 35 mesh.

Tabela 2. Quantidade (%) de serragem retida por peneira (mesh e ABNT).

Table 2. Amount (%) of sawdust retained by sieve (mesh and ABNT).

Mesh	ABNT	Quantidade (%)
9	10	5,20
20	20	18,30
35	40	26,20
60	60	14,20
100	100	23,00
200	200	11,30
Coletor	Coletor	1,80

### 3.2.1 Determinação do teor de umidade

O teor de umidade foi ajustado a 12% para que houvesse uma melhor formação do produto.

### 3.2.2 Determinação do teor de voláteis

O desenvolvimento dos voláteis com a temperatura se dá nas seguintes etapas: de 100 à 200 °C há volatilização da água presente; de 200 à 280 °C há evolução de gases de moléculas leves (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O), alcatrão (fenóis, ácidos orgânicos), ácido acético, metanol, entre outros; de 280 à 450 °C há hidrocarbonetos pesados, H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> (Martins, 1990).

O resultado do teor de voláteis para *E. grandis* (88,65%) mostrou-se coerente com o da literatura (89,9%), segundo Brito e Barrichelo (1978).

### 3.2.3 Determinação do teor de cinzas

O teor de cinzas (Tabela 3) representa a quantidade de material inorgânico na madeira, que são constituídos por metais e minerais (Ren e Sun, 2010). Esse valor se mostrou inferior ao determinado por Chrisostomo (2011), que obteve um teor de cinzas de 1,32% para *E. grandis*. Esse resultado pode ser explicado pelo material utilizado, que se encontrava limpo (sem terra ou areia) e não havia a presença da casca. Mas se comparado a Brito e Barrichelo (1977) e a Trugilho (2001), com teores de cinzas de 0,31% e 0,3% a 0,53%, respectivamente, esse resultado se mostrou dentro dos parâmetros esperados.

### 3.2.4 Cálculo do teor de carbono fixo

Segundo Brito e Barrichelo (1978), a porcentagem de carbono fixo de *E. grandis* é de 9,6%, resultado parecido com o encontrado nesta pesquisa (10,91%). O carbono fixo refere-se à fração da serragem que queima no estado sólido e representa a massa energética contida na serragem (Leite, 2006; Chrisostomo, 2011).

Tabela 3. Variáveis de qualidade da serragem de *E. grandis* para a confecção de briquetes.

Table 3. Quality variables of *E. grandis* sawdust for the production of briquettes.

Teor de umidade	Teor de voláteis	Teor de cinzas	Carbono fixo	Poder Calorífico
12%	88,65%	0,44%	10,80%	4.229 kcal.kg <sup>-1</sup>

### 3.2.5 Determinação do poder calorífico superior – PCS

Segundo Quirino (2003), o poder calorífico refere-se à quantidade de energia liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa ou de volume de um combustível. Como descrito por Gonçalves (2006), o poder calorífico é dito superior quando a combustão se efetua a volume constante e a água formada durante a combustão é condensada.

O PCS encontrado para a serragem de *E. grandis* (Tabela 3) mostrou-se dentro do encontrado pela literatura, que é por volta de 4.651 kcal.kg<sup>-1</sup>

e 4.436 kcal.kg<sup>-1</sup>, segundo Quirino et al. (2005) e Chisostomo (2011), respectivamente, sendo esta matéria-prima adequada para uso

### 3.3 Confecção dos Briquetes

O uso da serragem como matéria-prima na produção de briquetes mostrou-se eficaz em seus diferentes tratamentos, com a formação de briquetes compactos sem desprendimento de material (Figura 1). Visualmente, os briquetes não apresentam diferenças em relação ao formato, pois foram compactados pelo mesmo molde cilíndrico de metal.

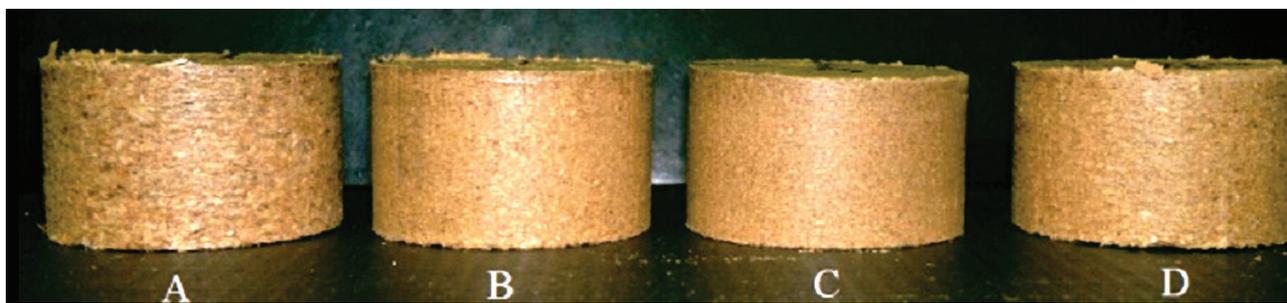


Figura 1. Fotografias dos briquetes produzidos para cada tratamento: T1 (A), T2 (B), T3 (C) e T4 (D).

Figure 1. Photographs of the briquettes produced for each treatment: T1 (A), T2 (B), T3 (C) and T4 (D).

### 3.4 Caracterização dos Briquetes

#### 3.4.1 Determinação do teor de umidade

A umidade da matéria-prima foi ajustada, na pré-briquetagem, a 12%. Porém, a umidade pós-teste de resistência se mostrou menor, aproximadamente 11,5%, devido à ventilação constante à qual o material foi submetido durante os 15 dias que antecederam o ensaio, isto mostra que houve uma perda não significativa de umidade dos briquetes durante esse tempo.

#### 3.4.2 Determinação da densidade

Como pode ser observado pela Tabela 4, a densidade dos briquetes é de 6 a 7 vezes maior comparada com a densidade da serragem, resultado da grande diminuição de seu volume.

O tratamento T1 foi o que apresentou maior aumento de densidade, pois a densidade de sua serragem era menor, devido à maior granulometria. Quanto maior a granulometria, maior os espaços vazios entre os resíduos e menor será sua densidade; com a compactação, esses espaços de ar diminuem. Houve uma gradativa diminuição do aumento da densidade entre os tratamentos T1, T2 e T3 (coluna de vezes em que a densidade aumentou após a briquetagem), que pode ser explicado pelo tamanho da granulometria de cada tratamento. Com esse resultado pode-se dizer que quanto maior a granulometria, maior o aumento da densidade pós-briquetagem.

Segundo Quirino et al. (2012), os briquetes confeccionados com uma granulometria fina (T3, com valor de densidade de 1007,70 kg.m<sup>-3</sup>), apresentam valor de densidade mais elevado que os de granulometria mais grossa, justificado pela melhor acomodação das partículas pequenas em relação às grandes.

Tabela 4. Densidade dos tratamentos antes e após a briquetagem. A quarta coluna mostra quantas vezes a densidade dos briquetes é maior que a da serragem.

Table 4. Treatments density before and after briquetting. The fourth column shows how often the density of the briquettes is greater than the sawdust.

Tratamentos	Serragem	Densidade (kg.m <sup>-3</sup> )	
		Briquete	Briquete > Serragem (vezes)
T1	129,67	968,47	7,47
T2	156,28	993,41	6,36
T3	162,59	1007,45	6,20
T4	147,38	988,70	6,71

### 3.4.3 Aferição da expansão dos briquetes

Na Tabela 5, é possível observar que o único tratamento que diferiu significativamente dos outros quanto à expansão longitudinal foi o tratamento T4. Esse resultado é atribuído à diferença granulométrica encontrada nesse tratamento, pois os espaços entre as partículas grandes, previamente ocupados por ar, no tratamento T4, passaram a ser preenchidos com as partículas de tamanho menor, o que garante uma maior adesão entre as partículas e, conseqüentemente, a menor taxa de expansão longitudinal.

Tabela 5. Representação das taxas de expansão dos briquetes durante um intervalo de 15 dias.

Table 5. Representation of the expansion rates of the briquettes during an interval of 15 days.

Tratamentos	Taxa de expansão (%)	
	Diâmetro	Altura
T1	1,32 ± 0,24 ab	22,05 ± 1,60 b
T2	1,32 ± 0,19 ab	19,85 ± 1,82 b
T3	1,41 ± 0,18 b	19,15 ± 1,51 b
T4	1,04 ± 0,38 a	15,06 ± 1,66 a

\* As letras a e b na tabela representam a diferença significativa, a nível de 5%, segundo o teste de Tukey, dos resultados obtidos.

\* Letters a and b in the table represent the significant difference at the level of 5% according to the Tukey test, to the obtained results.

A taxa de expansão de diâmetro dentre os briquetes foi menor no tratamento T4, porém, estatisticamente, permaneceu similar ao dos tratamentos T1 e T2. O tratamento T3 apresentou-se estatisticamente diferente do tratamento T4, pois o primeiro possuiu uma maior taxa de

expansão diametral, devido à menor adesão entre as partículas. Esse resultado difere do esperado pela literatura, pois segundo Quirino (2012), quanto menor o tamanho da partícula compactada, maior é a adesão entre as partículas e menor a taxa de expansão entre elas.

Pode-se concluir que devido à diferença entre o tamanho das partículas no tratamento T4, houve maior adesão entre elas; enquanto no tratamento T3, devido à homogeneidade entre os tamanhos das partículas (finas), a compactação da serragem não foi eficiente.

### 3.4.4 Ensaios de compressão diametral dos briquetes

No ensaio para se aferir a resistência mecânica dos tratamentos, a ANOVA mostrou que houve diferença significativa entre os tratamentos. A média da força máxima e da tensão da força máxima, além do desvio-padrão de cada média, estão apresentados na Tabela 6.

Os briquetes de *E. grandis* preparados com a matéria-prima com granulometria T4 apresentaram os melhores resultados de tensão suportada pelos corpos-de-prova, chegando a ser 34,28% mais resistente (em relação à força máxima) se comparada ao tratamento da porção mais grossa (T1), possivelmente devido à maior interação entre as partículas, resultado da maior proximidade e área superficial das partículas formadoras dos briquetes. Segundo Salame (1992), a resistência mecânica do briquete está associada a vários parâmetros de produção, entre eles a granulometria da matéria-prima. Outro fator atribuído à maior resistência do T4 é que ele obteve a menor expansão longitudinal, conseqüência da maior adesão entre as partículas.

Tabela 6. Resultados do teste de tração por compressão diametral; as letras minúsculas representam a diferença estatística entre cada tratamento em relação à Força Máxima, sendo que a letra a é o melhor resultado esperado; no mesmo sentido, as letras maiúsculas referem-se à Tensão da Força Máxima.

Table 6. Results of traction test for diametrical compression; small letters represent statistical difference between each treatment compared to Maximum Force, and the letter a is the best expected result, in the same sense; capital letters refer to Voltage Maximum Strength.

Tratamento	Força máxima (kgf)	Tensão da força máxima (MPa)
T1	72,95 ± 2,23 b	0,50 ± 0,01 B
T2	66,19 ± 4,38 b	0,47 ± 0,03 B
T3	68,75 ± 10,09 b	0,50 ± 0,09 B
T4	90,22 ± 2,35 a	0,67 ± 0,02 A

### 3.4.5 Ensaio de tamboramento

O teste de tamboramento mostra quais tratamentos de briquetes se apresentam mais coesos. Na Tabela 7, pode-se visualizar que o tratamento T3 foi o que obteve a menor taxa de perda de serragem. Esse resultado é devido a sua menor granulometria, que garante maior adesão entre as partículas, devido à maior superfície de contato entre elas.

O tratamento T4, mesmo mostrando maior resistência no ensaio de compressão diametral, ficou em segundo lugar no quesito de menor perda de serragem, pois, embora suas partículas mostrassem ser as mais coesas e as que possuíram menor expansão, a quebra de adesão entre elas mostrou-se maior do que no tratamento T3.

Tabela 7. Resultados do teste de tamboramento.

Table 7. Compression and rotation test results.

Tratamento	Perda (%)
T1	32,24
T2	24,75
T3	8,29
T4	18,64

## 4 CONCLUSÕES

A utilização da matéria-prima serragem de *Eucalyptus grandis* é ideal para a confecção de briquetes, segundo sua caracterização química. A granulometria que apresentou as melhores características em relação aos parâmetros analisados

foi a mistura (serragem que passou pela peneira de 10 mesh e ficou retida na peneira de 100 mesh – tratamento T4), com resultados para expansão (diametral e longitudinal) e de ensaios de compressão diametral para força máxima e tensão de força máxima dos briquetes de 1,04%, 15,06%, 90,22 kgf e 0,6714 MPa, respectivamente, diferindo de modo significativa a nível de 5% dos outros tratamentos.

O tratamento T4 mostrou ser o melhor, pois suas partículas garantiam uma grande superfície específica, o que gerou maior adesão entre as partículas. Essa adesão promoveu uma melhor compactação do material e, conseqüentemente, os melhores resultados para resistência e expansão.

Como os briquetes com granulometria heterogênea foram os que obtiveram os melhores resultados, pode-se dizer que financeiramente esses resultados são ótimos, pois para a produção de briquetes em alta escala (comercialmente) pode-se reduzir o processamento total do briquete, retirando-se o processo de separação granulométrica.

## 5 AGRADECIMENTOS

À Comissão do SIMATEF pelo apoio no trabalho, ao CNPq pelo financiamento do projeto e pelas bolsas concedidas (PIBITI 154697/2013-3 e PIBIC 123809/2013-4), à CAPES (projeto PNPd 02880/09-1), aos colegas que auxiliaram na realização da pesquisa, ao Professor Doutor Fábio Minoru Yamaji e à Doutora Alessandra Da Róz pelas orientações e à Revista Instituto Florestal pela oportunidade de publicar este artigo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2012 ano base 2011/ABRAF**. Brasília, DF, 2012. 150 p. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF12/ABRAF12-BR.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2013.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional**. Brasília, DF, 2012. 282 p.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca. **IPEF**, n. 16, p. 63-70, 1978.

\_\_\_\_\_. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: i. Densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. **IPEF**, n. 14, p. 9-20, 1977.

CHRISOSTOMO, W. **Estudo da compactação de resíduos lignocelulósicos para utilização como combustível sólido**. Sorocaba: UFSCar, 2011. 56 p.

GONÇALVES, J. **Caracterização química e energética de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis***. Botucatu: UNESP, 2006. Disponível em: <[www.athena.biblioteca.org.br/exlibris/bd/bla /33004064021P7/2006/goncalves\\_je\\_me\\_botfca.pdf](http://www.athena.biblioteca.org.br/exlibris/bd/bla /33004064021P7/2006/goncalves_je_me_botfca.pdf)>. Acesso em: 03 set. 2012.

LEITE, D.P. **Estudo para reduzir a variabilidade do carbono fixo na alimentação de duas usinas de pelletização utilizando um controlador fuzzy**. 2006. 77 f. Projeto de Graduação (Engenheiro Eletricista) – Departamento de Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

LIMA, E.G. de ; SILVA, D.A. da. Resíduos gerados em indústrias de móveis de madeira situadas no pólo moveleiro de Arapongas-PR. **Floresta**, v. 35, n. 1, 2005.

MARTINS, H. Madeira como fonte de energia. In: PENEDO, W.R. (Ed.). **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, 1990. p. 9-26. (SPT – 001).

QUIRINO, W.F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Brasília, DF: Laboratório de Produtos Florestais, IBAMA, 2002. 35 p.

\_\_\_\_\_. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Brasília, DF: LPF/IBAMA, 2003. 14 p.

\_\_\_\_\_. et al. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, n. 89, p. 100-106, abr 2005.

\_\_\_\_\_. et al. Densimetria de raios x na análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 96, p. 525-536, 2012.

REN, J.L.; SUN, R.C. **Cereal straw as a resource for sustainable biomaterials and biofuels – chemistry, extractives, lignins, hemicelluloses and cellulose**. Oxford: Elsevier, 2010. cap. 4, p. 73-76.

SALAME, J.E.F. **Estudo básico para a briquetagem de carvão vegetal**. Ouro Preto: Escola de Minas e Metalurgia, 1992. p. 19.

TRUGILHO, P.F. et al. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. **Cerne**, v. 7, n. 2, p. 104-114, 2001.