

Produção de briquetes de moinha de carvão vegetal e
resíduos lignocelulósicos visando uso bioenergéticoProduction briquettes from the fines of Charcoal and
Lignocellulosic residues for bioenergetics useAnanias Francisco Dias Júnior¹, Azarias Machado de Andrade²,
Alexandre Monteiro de Carvalho², Elizabeth Lemos Benício³ e José Otávio Brito⁴

Resumo

Este trabalho teve por objetivo analisar a qualidade de briquetes produzidos com misturas de resíduos de bambu, resíduos de pasta celulósica e moinha de carvão vegetal, sob diferentes formulações. Foi determinada a umidade, a densidade aparente, o poder calorífico superior e inferior, a resistência à compressão, a friabilidade e realizada análise imediata dos briquetes. Os resultados foram interpretados por meio de análise uni e multivariada. Observou-se que os briquetes produzidos somente com moinha de carvão vegetal apresentaram valores mais elevados de densidade aparente, resistência à compressão e menor friabilidade. Os briquetes produzidos com resíduos de bambu e moinha de carvão vegetal apresentaram valores mais elevados de umidade, de materiais voláteis e poder calorífico. Briquetes produzidos com resíduos celulósicos apresentaram teores mais elevados de carbono fixo e de teor de cinza. De forma geral, os briquetes produzidos a partir de resíduos lignocelulósicos apresentaram características para utilização bioenergética, porém recomendam-se estudos quali-quantitativos dos gases da combustão quando o intuito for uso para cocção de alimentos.

Palavras-chave: energia de biomassa; resíduo de bambu; resíduo celulósico; densificação.

Abstract

This research aimed to analyze the quality of briquettes made from mixtures of bamboo waste, cellulosic pulp residues and charcoal fines wastes under different formulations. Determined were: the moisture content, bulk density and the calorific value of briquettes. Briquettes were subjected to compressive strength tests and rotation and chemical analysis. The results were interpreted by univariate and multivariate analysis. Briquettes produced only with charcoal wastes fines showed higher values of bulk density and compressive strength and lower friability. Briquettes produced with bamboo waste and coal chaff showed higher moisture content, volatile materials content and calorific value. Briquettes produced from cellulose residues showed higher levels of fixed carbon and ash content. In general, briquettes produced from lingo-cellulosic waste presented characteristics for bioenergetics use, however qualitative and quantitative studies of combustion gases are recommended, when the objective is use for food cooking.

Keywords: biomass energy; bamboo waste; cellulosic residue; densification.

INTRODUÇÃO

As dificuldades energéticas apresentadas pelo país impõem a necessidade da ampliação de estudos de fontes renováveis de energia, a ser utilizada em diversos segmentos industriais.

Segundo Paula et al. (2011), a geração de resíduos provenientes da biomassa agroflorestal no Brasil é muito elevada e, muitas vezes, condicionadas de forma inadequada ao ambiente. Contudo, há referências indicando que tais resíduos podem ser submetidos ao processo de briquetagem, proporcionando padronização em relação à densidade, teor de umidade, dimensão, forma e poder calorífico, convertendo-os em combustíveis mais limpos e eficientes energeticamente (CHIN; SIDDIQUI, 2000; DIAS JÚNIOR et al., 2014).

1Doutorando em Recursos Florestais. USP - Universidade de São Paulo / ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Av Pádua Dias, 11 - São Dimas -13418900 - Piracicaba, SP, Brasil. E-mail: ananiasjr@usp.br.

2Professor Associado do Departamento de Produtos Florestais. UFRRJ - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro / Instituto de Florestas. BR 465, km 7 - 23890-000 - Seropédica, RJ, Brasil. E-mail: azarias@ufrj.br; amcarvalho@ufrj.br.

3Doutoranda em Química. UFRRJ - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. BR 465, km 7 - 23890-000 - Seropédica, RJ, Brasil. E-mail: beth.benicio@yahoo.com.br.

4Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais. USP - Universidade de São Paulo / ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Av Pádua Dias, 11 - São Dimas -13418900 - Piracicaba, SP, Brasil. E-mail: jobrito@usp.br.

A vantagem da briquetagem de resíduos de biomassa tem sido apontada ainda sob o ponto de vista ambiental e econômico, considerando a alta disponibilidade desses materiais. Além disso, espera-se que os mesmos apresentem homogeneidade das suas características e maior densidade energética (KALIYAN; MOREY, 2010; PAULA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2012).

A briquetagem consiste na densificação da biomassa, através da aplicação de pressão a uma massa de partículas, com ou sem a adição de ligante e com ou sem tratamento térmico posterior, constituindo uma forma de convertê-la em um combustível de melhor qualidade (QUIRINO et al., 1989; QUIRINO; BRITO, 1991; ALBUQUERQUE; ANDRADE, 1997; ANDRADE; CARVALHO, 1998; PEREIRA et al., 2009).

Segundo o relatório da Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (2015), o Brasil é o quarto maior produtor de celulose e o nono em produção de papel, com produção anual em torno de 15 milhões de toneladas de celulose. Almeida et al. (2007), cita que são dois os resíduos provenientes das indústrias de papel e celulose: a lama de cal e o “dregs”. A lama de cal possui coloração clara e é constituída basicamente por carbonatos de cálcio (CaCO_3), enquanto o “dregs” possui cor acinzentada e é constituído por carbonatos, hidróxidos e sulfetos, sobretudo de Na e de Ca (NURMES-NIEMI et al., 2005; ALMEIDA et al., 2007). Devido a essas características e a grande quantidade de resíduo gerado, estes materiais apresentam baixo custo e têm sido adicionados aos solos agrícolas com intuito de ajuste da acidez e de propriedades físicas. No caso da briquetagem, Demirbas (1999) cita que os materiais celulósicos poderiam ser incorporados aos briquetes com intuito de torná-los mecanicamente resistentes.

Outro resíduo produzido em grande quantidade no Brasil é o de bambu, gênero *Bambusa*. Este vem sendo cultivado em larga escala no nordeste brasileiro, sobretudo nos Estados do Maranhão, Pernambuco e Paraíba. A produção de biomassa pelo bambu pode variar de 50 a 100 t ano⁻¹, dependendo da espécie e das condições locais. Tais valores demonstram que o bambu apresenta um elevado potencial para ser utilizado para fins energéticos, além de outros usos relatados para esse gênero, como por exemplo, construção civil, revestimentos internos, artesanatos, produção de papel e etc (COSTA, 2004; BERALDO; AZZINI, 2004). Além disso, em 2011, o governo brasileiro sancionou um projeto de lei que instituiu a Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu, a “Lei do Bambu” n.º 12.484. Essa medida tem como objetivo estimular o manejo sustentado e o cultivo do bambu em pequenas e médias propriedades, incentivando conseqüentemente, a sua utilização (TIBURTINO et al., 2015).

No ano de 2014, a produção de carvão vegetal no Brasil alcançou 6,3 milhões de toneladas (BEN, 2015). No entanto, decorrente da sua elevada friabilidade, o mesmo gera uma grande quantidade de finos, que pode chegar a 25% do total produzido. Este material, devido à sua baixa granulometria, passa a ser considerado um resíduo industrial que, deve ser direcionado para outras finalidades (COUTINHO; FERRAZ, 1988; ANDRADE; GONÇALVES, 1999).

O uso de resíduos de biomassa vegetal para fins energéticos, sobretudo na forma de briquetes, carece de estudos mais aprofundados visando às diversas utilidades desses produtos para uso bioenergético, e na avaliação da qualidade dos briquetes produzidos, pois tal limitação implica que as informações sobre um tipo de amostra de biomassa não possam ser generalizadas para outras fontes.

Diante o exposto, este trabalho teve por objetivo avaliar os briquetes produzidos a partir da mistura de dois tipos de resíduos lignocelulósicos (resíduo de bambu e resíduo celulósico) e moinha de carvão vegetal, sob diferentes formulações visando uso bioenergético.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a produção dos briquetes foram utilizados moinha de carvão vegetal (finos de carvão), resíduos de bambu e resíduo proveniente da produção de celulose, denominado neste trabalho de “resíduo celulósico”. A moinha de carvão foi coletada após a carbonização (temperatura final de 500 °C) de lenha de *Eucalyptus* spp em um forno de alvenaria de superfície com capacidade de 5 st, sendo classificada como de baixa qualidade (DIAS JÚNIOR et al., 2014).

Os resíduos de bambu foram fornecidos pela empresa D. Maria, instalada no município de Nazaré da Mata, estado de Pernambuco, obtidos após o beneficiamento de *Bambusa* spp, para produção de espetos para churrasco. A Empresa adquire bambu de diferentes espécies de *Bambusa* a

partir de produtores locais. Os mesmos tiveram sua granulometria e umidade homogêneas, por passagem em peneira com a malha de 3 mm e secagem ao ar livre até umidade de 15%.

O resíduo celulósico foi fornecido pela indústria de papéis Schweitzer-Mauduit do Brasil, situada no município de Barra do Piraí, no Estado do Rio de Janeiro. O laudo técnico fornecido pela empresa informou as seguintes características do resíduo após processo de polpação Kraft: umidade de 65%; 15 a 20% dos sólidos são fibras de celulose; sólidos fixos de 16% a 20%; sólidos voláteis de 3%; cálcio entre 750 e 800 mg kg⁻¹ e alumínio entre 105 e 250 mg kg⁻¹. Este resíduo foi usado em sua forma *in natura*.

Produção dos briquetes

Para a produção dos briquetes foram utilizadas diferentes misturas, constituídas por moinha de carvão vegetal e resíduos lignocelulósicos. Foram analisados os tratamentos a seguir:

- T1: Briquetes com 100% de moinha de carvão vegetal.
- T2: Briquetes com 20% de resíduos de bambu e 80% de moinha de carvão vegetal.
- T3: Briquetes com 40% de resíduos de bambu e 60% de moinha de carvão vegetal.
- T4: Briquetes com 50% de resíduos de bambu e 50% de moinha de carvão vegetal.
- T5: Briquetes com 20% de resíduo celulósico e 80% de moinha de carvão vegetal.
- T6: Briquetes com 40% de resíduo celulósico e 60% de moinha de carvão vegetal.
- T7: Briquetes com 50% de resíduo celulósico e 50% de moinha de carvão vegetal.

A briquetagem (prensagem) dos resíduos lignocelulósicos foi efetuada por uma prensa hidráulica de 15 t no interior de um molde metálico cilíndrico com, aproximadamente 10 cm de comprimento, diâmetro interno de 6 cm e paredes com espessura de um centímetro, confeccionado em aço inoxidável. As misturas da moinha de carvão vegetal com os resíduos lignocelulósicos foram realizadas para a homogeneização, resultando num material uniforme, com uma consistência que permitia a formação dos briquetes.

Para a produção de cada briquete, o volume total do molde (282,75 cm³) foi preenchido com o material homogeneizado. Para a prensagem dos materiais adotou-se a carga de 0,052 MPa, mantida por um período de três minutos, conforme recomendação de DIAS JÚNIOR et al. (2014). Como agente aglutinante utilizou-se a carboximetilcelulose a 3% (CMC), ou seja, na concentração de 30 g L⁻¹ para todos os tratamentos. Após a prensagem, os briquetes foram secos ao ar, até atingirem a umidade de equilíbrio com o ambiente.

Ensaio realizados nos briquetes

O teor de umidade foi obtido pelo método gravimétrico, após um período de trinta dias aclimatados em câmara com condições de umidade relativa de 65% e a temperatura ambiente de 20 °C. A densidade aparente (g cm⁻³) dos briquetes foi determinada de acordo com a metodologia descrita pela norma NBR 11941 (ABNT, 2003), adaptada por Trugilho et al. (1990). Para tanto, o volume do briquete foi obtido pelo método hidrostático de deslocamento de líquido, segundo o princípio de Arquimedes.

A análise imediata dos briquetes foi efetuada com base na norma brasileira NBR 8112 (ABNT, 1986). Foram determinados os teores de materiais voláteis (TMV), de cinza (TCZ) e de carbono fixo (TCF).

Determinou-se o poder calorífico superior (PCS) dos briquetes produzidos, utilizando-se uma bomba calorimétrica modelo Ika C200 seguindo os procedimentos descritos pela norma NBR 8633 (ABNT, 1984). O poder calorífico inferior (PCI) dos briquetes foi determinado com auxílio da Equação 1.

$$PCI_{kcal/kg}^{-1} = \{(PCS - 25,11 \times U) / [(100 + U) \times 100]\} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: U = teor de umidade médio dos briquetes, em base úmida (%).

Os testes de resistência à compressão dos briquetes foram realizados utilizando-se uma máquina universal de ensaios da marca Contenco - UMC 300, com a capacidade de 30 t. Os procedimentos adotados foram os descritos por Quirino e Brito (1991) e por Paula et al. (2011). Dessa forma, foi utilizada uma célula de carga de 10 toneladas-força, carregamento de 0,03 cm min⁻¹, aplicada no sentido diametral dos briquetes.

Para análise da friabilidade dos briquetes realizou-se o teste do tamboramento, de acordo com os procedimentos descritos pela norma NBR 7402 (ABNT, 1982) e por Oliveira et al. (1982). Após o tamboramento, os briquetes foram classificados em peneiras com quatro diferentes malhas (25 mm, 15 mm, 5 mm e 1,5 mm).

Análise dos dados

Os valores obtidos após os ensaios foram submetidos ao teste de Kolmogorov-Smirnov para verificar a normalidade dos dados. Para verificar a proximidade das variâncias foi aplicado o teste de Levene, pois umas das suposições para a análise de variância é a presença de normalidade dos dados e que as variâncias sejam próximas para a categoria analisada. Verificadas essas suposições, os ensaios foram conduzidos seguindo um delineamento inteiramente aleatorizado (DIA), com sete tratamentos e cinco repetições. Para o teste de comparação múltipla de médias foi utilizado o teste Tukey. Todos os testes foram executados ao nível de 5% de significância.

Realizou-se ainda, a análise de componentes principais (ACP) a fim de explicar a estrutura de variância do vetor aleatório composto pelas características avaliadas nos briquetes estudados, conforme descrições de Manly (2008). Foram consideradas as médias de cada variável dentro de cada tratamento. A matriz utilizada foi a de correlação dos dados. As combinações lineares estabelecidas foram interpretadas por meio dos autovetores normalizados e das correlações entre as variáveis originais e as componentes principais. Todos os dados foram analisados com auxílio do software Minitab 16.1*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nota-se que os briquetes dos resíduos lignocelulósicos apresentaram valores médios de umidade entre 10,79% e 15,98%, observando que, os briquetes de resíduos de bambu (T2, T3 e T4) apresentaram valores estatisticamente superiores aos briquetes de resíduos celulósicos (T5, T6 e T7) e aos briquetes produzidos somente com moinha de carvão vegetal (T1). Possivelmente, isso esteja relacionado ao fato de que os resíduos de bambu não sofreram anteriormente nenhum tipo de processo, diferentemente dos resíduos celulósicos e da moinha de carvão vegetal, decorrentes de um processo de polpação kraft e de carbonização, respectivamente. Tais processos podem ter interferindo na capacidade absorptiva desses materiais. Outro fato a ser considerado é que, supostamente a força de compactação aplicada aos resíduos de bambu, permitiu menor compactação e, conseqüentemente, favoreceu a ocorrência de maior porosidade para esses briquetes e assim, maior absorção de umidade.

Tabela 1. Valores médios das características dos briquetes lignocelulósicos.

Table 1. Mean values of the characteristics of lingo-cellulosic briquettes.

Tratamento	U (%)	DAP (g cm ⁻³)	TMV (%)	TCZ (%)	TCF (%)	PCS (kcal kg ⁻¹)	PCI (kcal kg ⁻¹)
T1	11,25b	0,85a	31,67b	25,00ab	43,33ab	4371b	4067c
EP	0,666	0,023	1,667	2,887	3,333	31,090	1,856
T2	14,31a	0,47d	43,33ab	18,33ab	38,33b	6496a	5323a
EP	0,236	0,003	7,265	4,410	3,333	134,381	2,434
T3	14,88a	0,36e	51,67a	15,00ab	33,33c	6343a	5234a
EP	0,019	0,004	4,410	2,887	4,410	115,212	0,040
T4	15,98a	0,30e	63,33a	8,33c	28,33c	6600a	5419a
EP	0,147	0,001	1,667	1,667	1,667	117,541	0,268
T5	11,52b	0,68c	26,67b	26,67ab	46,67a	4687b	4383b
EP	0,618	0,012	3,333	4,410	1,667	10,409	0,736
T6	10,93b	0,77b	26,67b	26,67ab	46,67a	4426b	4122bc
EP	0,275	0,025	1,667	1,667	1,667	8,272	1,091
T7	10,79b	0,67c	30,00b	30,00a	40,00b	4241b	3937c
EP	0,270	0,012	2,887	7,638	5,001	2,068	0,067

EP = Corresponde ao erro padrão da média de cada tratamento. Médias seguidas por uma mesma letra na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Os briquetes do tratamento T1 (100% moinha de carvão) apresentaram valores estatisticamente superiores de densidade aparente, enquanto que os briquetes do tratamento T4 (50% de resíduos de

bambu e 50% de moinha de carvão) apresentaram os menores valores. A densidade dos briquetes diminuiu à medida que se aumentou a percentagem de ambos resíduos lignocelulósicos analisados.

Dias Júnior et al. (2014), encontraram densidade aparente média de $0,247 \text{ g cm}^{-3}$ para briquetes produzidos com 100% de resíduos de bambu. Benício (2011), por sua vez, ao produzir briquetes com uma mistura de 60% de moinha de carvão e 40% de resíduos provenientes da fabricação de papel, obteve uma densidade média de $0,663 \text{ g cm}^{-3}$, valor bastante próximo do observado no tratamento T7, em que se utilizou a mistura de 50% de moinha de carvão e 50% de resíduo celulósico ($0,670 \text{ g cm}^{-3}$).

A análise imediata confirmou a existência de elevados teores de materiais voláteis nos briquetes com as maiores quantidades de resíduos de bambu na composição e menores valores para os demais briquetes. Todavia, Andrade e Gonçalves (1999), consideraram percentuais entre 30% a 40% de materiais voláteis normais para diversas aplicações bioenergéticas, podendo ainda maiores valores ser encontrados, uma vez que a referida característica é fortemente influenciada pela matéria-prima de origem. De acordo com DIAS JÚNIOR et al. (2014), altos teores de matérias voláteis são desejados em situações que necessitem de formações de labaredas comolareiras, olarias, fornalhas e etc, sendo dessa forma, recomendados para os referidos usos.

Os teores de carbono fixo observados, se apresentaram abaixo da média considerada ideal para fins de cocção, sendo de 75,00% para carvão vegetal e para briquetes (AFNOR, 2005; DIAS JÚNIOR et al., 2015). Dias Júnior et al. (2014), argumentam que, nos usos onde não seria recomendável a formação de chamas durante o aquecimento, como naslareiras e forjas, os briquetes mais indicados são aqueles com os teores mais elevados de carbono fixo, neste caso, os briquetes com resíduos celulósicos e moinha de carvão vegetal na composição.

Os poderes caloríficos superiores e inferiores apresentados pelos briquetes denotam que os mesmos apresentam potencial para diversas aplicações bionergéticas. Valores significativamente elevados de poder calorífico foram identificados nos briquetes com teores mais elevados de resíduo de bambu na composição, possivelmente em decorrência dos seus maiores teores de materiais voláteis. Por outro lado, os poderes caloríficos dos briquetes com os teores mais elevados de resíduos celulósico na composição, embora tenham se mostrado inferiores do ponto de vista estatístico, também se apresentaram em níveis satisfatórios para vários usos bionergéticos, considerando-se valores acima de $4.200 \text{ kcal kg}^{-1}$ (valor base para madeira).

Segundo Furtado et al. (2010), existe uma pressão de briquetagem adequada para cada tipo de material a ser briquetado, onde, melhores resultados para poder calorífico podem ser obtidos desde que a matéria-prima seja previamente estudada. Gonçalves et al. (2009), encontraram poder calorífico superior de $2.123 \text{ kcal kg}^{-1}$ para briquetes produzidos com 25% de resíduos sólidos urbanos e 75% de serragem de madeira. Protásio et al. (2012), obtiveram $1.800 \text{ kcal kg}^{-1}$ para briquetes produzidos com casca de café. Tais resultados são inferiores aos encontrados na presente pesquisa, o que contribui para a afirmação de que a briquetagem dos resíduos ora analisados se mostrou um processo viável na melhoria da qualidade do combustível produzido.

A Figura 1 apresenta os valores médios da resistência à compressão diametral dos briquetes (MPa), dentro dos respectivos tratamentos.

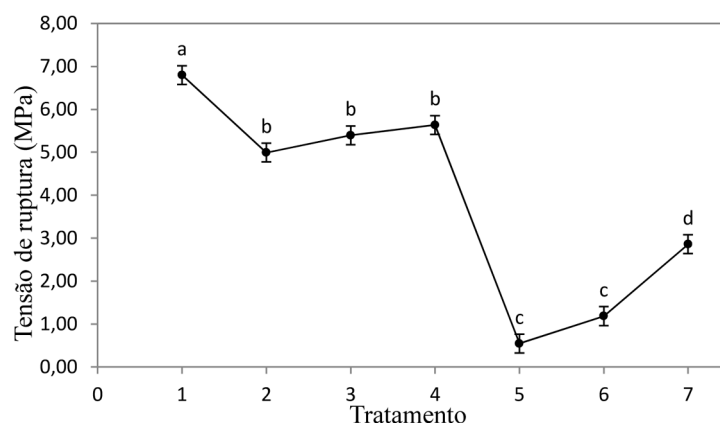


Figura 1. Tensões de rupturas dos briquetes submetidos à compressão.

Figure 1. Briquettes' ruptures strength tested in a diametrical compression.

Os briquetes produzidos com 100% de moinha de carvão (T1) apresentaram o maior valor médio de resistência à compressão e os briquetes produzidos com resíduos de bambu obtiveram o segundo maior valor de resistência. Entretanto, quando os resíduos celulósicos foram incluídos na composição dos briquetes, houve uma queda significativa da carga de ruptura dos mesmos ao serem submetidos ao teste de compressão, sendo eles inferiores aos demais briquetes produzidos.

No caso dos tratamentos T5 e T6, incrementos nos teores de resíduos celulósicos foram acompanhados por sensíveis aumentos na resistência dos briquetes à compressão, onde em seguida, a composição do tratamento T7, apresentou maior média quando comparado aos dois anteriores. É provável que este comportamento tenha sido ocasionado por uma melhor interação entre os materiais e que tal tendência persistiria até a situação em que o briquete fosse composto por 100% de resíduo celulósico. É relevante salientar que os resíduos celulósicos foram utilizados em sua forma *in natura*, com elevados teores de umidade (65%). Resultados superiores de resistência à compressão foram encontrados por Yaman et al. (2000) ao briquetarem resíduos celulósicos após a secagem (umidade entre 5 e 15%). Estes autores encontraram elevados valores de resistência à compressão que variaram de 7,99 a 12,73 MPa.

Os briquetes devem apresentar elevada resistência mecânica, sobretudo ao se considerar que os mesmos são constantemente submetidos a impactos e quedas nas etapas de manuseio, empacotamento, transporte e armazenamento, sem que ocorra o comprometimento do seu uso. Na Tabela 2, são apresentados os valores médios das variações granulométricas dos briquetes de resíduos lignocelulósicos (%) submetidos ao teste de tamboramento.

Tabela 2. Distribuição média do tamanho do material particulado dos briquetes de resíduos lignocelulósicos (%), após o ensaio de tamboramento.

Table 2. Mean size distribution of the particulate material of lingo-cellulosic waste briquettes (%) after rotation test.

Tratamento	Distribuição (mm)				
	25	15	5	1,5	< 1,5
	Classificação granulométrica (%)				
T1	95,90	2,00	0,00	1,40	0,70
T2	13,13	41,24	3,43	42,2	0,00
T3	50,63	14,62	6,18	28,57	0,00
T4	58,6	16,32	3,05	22,03	0,00
T5	0,00	3,16	7,38	81,47	7,99
T6	76,9	13,68	4,73	2,69	2,00
T7	24,56	16,73	20,84	9,27	28,60

Nota-se baixa friabilidade para os briquetes do tratamento T1 (100% moinha de carvão vegetal). Tal comportamento pode estar relacionado à boa conformação das partículas de carvão vegetal, justapondo-se entre si de uma forma mais organizada, durante a formação do briquete (DIAS JÚNIOR et al., 2014). Entretanto, de uma forma mais abrangente, parece que a friabilidade esteja relacionada a uma série de fatores e interações entre os mesmos e não somente às matérias-primas utilizadas na composição dos briquetes. Assim sendo, não foi possível o estabelecimento de uma tendência nítida em relação ao comportamento da friabilidade dos briquetes em função da composição dos mesmos. Para Benício (2011), é possível obter-se a diminuição da friabilidade de briquetes diminuindo-se a umidade ou aumentando-se a pressão de compactação, uma vez que estes fatores exercem reais interferências nas interações moleculares observadas na estrutura dos mesmos.

Análise multivariada

Na Tabela 3, encontram-se os autovetores das duas primeiras componentes principais obtidas por meio da matriz de correlação das variáveis originais, a variância explicada acumulada e autovalores.

As duas primeiras componentes explicam aproximadamente 81% da variância total dos dados. Optou-se no presente estudo por considerar apenas duas componentes principais devido à grande parcela da variância explicada por elas.

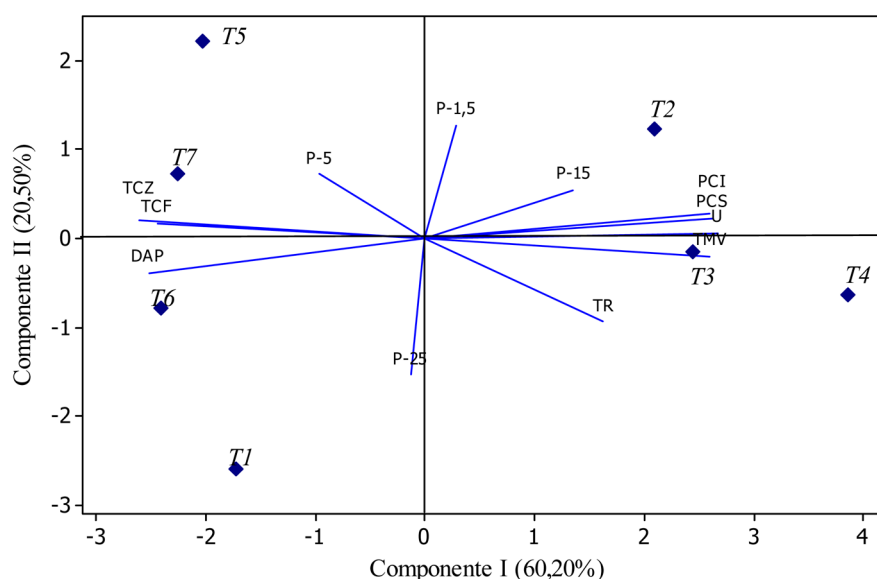
A primeira componente principal pode ser considerada um índice de desempenho global para a avaliação dos briquetes lignocelulósicos, onde os mais elevados coeficientes da componente principal, em módulo, são relativos ao teor de umidade, poder calorífico, teor de cinza e teor de materiais voláteis. Pode-se inferir que essa componente reúne as melhores características para avaliação preliminar dos briquetes produzidos por materiais lignocelulósicos visando o seu uso bioenergético.

Tabela 3. Autovetores das duas primeiras componentes principais.
Table 3. Eigenvectors of the first two principal components.

Variável	Componente 1	Componente 2
U - Umidade (%)	0,370	0,023
DAP - Densidade aparente (g cm ⁻³)	-0,349	-0,161
TMV - Teor de materiais voláteis (%)	0,360	-0,082
TCZ - Teor de cinza (%)	-0,360	0,086
TCF - Teor de carbono fixo (%)	-0,338	0,071
PCS - Poder calorífico superior (kcal kg ⁻¹)	0,364	0,090
PCI - Poder calorífico inferior (kcal kg ⁻¹)	0,360	0,111
TR – Tensão de ruptura (MPa)	0,225	-0,382
P-25 - Material retido em granulometria 25 mm	-0,018	-0,624
P-15 - Material retido em granulometria 15 mm	0,187	0,218
P-5 - Material retido em granulometria 5 mm	-0,134	0,292
P-1,5 - Material retido em granulometria 1,5 mm	0,040	0,515
Variância explicada (%)	60,20	20,50
Variância explicada acumulada (%)	60,20	80,70
Autovalores	7,22	2,46

A segunda componente principal pode ser interpretada como um índice que pode refletir na resistência à mecânica dos briquetes, uma vez que elevados valores dessa componente (escores) estão associados à carga de ruptura e granulometria retida na peneira de maior abertura (25 mm), característica favorável ao empacotamento, manuseio e transporte do material.

Na Figura 3, encontra-se o diagrama de ordenação das variáveis originais e os escores das duas primeiras componentes principais.



Em que: U= Teor de umidade (%), DAP= Densidade aparente (g cm⁻³), TMV= Teor de materiais voláteis (%), TCZ = Teor de cinzas (%), TCF= Teor de carbono fixo (%), PCS= Poder calorífico superior (kcal kg⁻¹), PCI = Poder calorífico inferior (kcal kg⁻¹), TR= Tensão de ruptura (MPa), P-15 = Material retido em peneira de granulometria 15 mm, P-5= Material retido em peneira de granulometria 5 mm, P-1,5= Material retido em peneira de granulometria 1,5 mm.

Figura 2. Diagrama de ordenação dos tratamentos avaliados considerando os escores e autovetores das componentes principais 1 e 2.

Figure 2. Diagram sorting of treatment studied, considering the scores and eigenvectors of principal components 1 and 2.

Pelos valores dos escores calculados para a primeira componente principal (maiores escores), percebe-se que os briquetes produzidos a partir de resíduos de bambu se destacaram em relação aos briquetes produzidos com resíduos celulósicos. Os tratamentos T5, T6 e T7 apresentaram os menores escores, apresentando ainda significativos valores de densidade aparente e de carbono fixo, quando comparados aos demais. Devido aos valores inferiores dos escores, briquetes com 100% de moinha de carvão apresentaram posição isolada dos demais.

Os tratamentos T5 e T2 apresentaram os maiores escores da componente principal 2, por possuírem o mesmo teor de moinha de carvão vegetal na composição. Observa-se que os grupos podem ser formados pelos escores das duas componentes principais consideradas, assim, o tratamento T1, tratamento T5 e tratamento T4 formam grupos distintos. Já os tratamentos T2 e T3 e os tratamentos T6 e T7 podem ser agrupados em um único grupo par a par, respectivamente, devido às suas características similares.

CONCLUSÕES

Os briquetes constituídos por 100% de moinha de carvão vegetal apresentaram densidades aparentes mais elevadas, maior resistência à compressão e menor friabilidade.

Os briquetes produzidos com resíduos de bambu e moinha de carvão vegetal apresentaram valores mais elevados de umidade, teor de materiais voláteis e poder calorífico, além de elevadas resistência à compressão comparando-os com os produzidos de resíduos celulósicos.

Os briquetes produzidos com resíduos de celulósicos na composição apresentam poderes caloríficos, teores de cinzas e teores de carbono fixo equiparáveis aos dos briquetes com 100% de moinha de carvão vegetal, recomendados para diversos usos bioenergéticos.

Os briquetes produzidos a partir de resíduos lignocelulósicos apresentaram características para utilização bioenergética, porém recomendam-se estudos quali-quantitativos dos gases da combustão quando o intuito for uso para cocção de alimentos.

AGRADECIMENTOS

À Fábrica de Espetos D. Maria e à Indústria de Papeis Schweitzer-Mauduit pela disponibilização e envio dos resíduos, e à CAPES e Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF) pelas concessões das bolsas de estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7402**: carvão vegetal-determinação granulométrica. Rio de Janeiro, 1982.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: carvão vegetal – determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003.

AFNOR. ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **NF EM 1860-2-Appareils, combustibles solides et allume-barbecue pour la cuisson au barbecue**. Saint Denis, 2005. 29 p.

ALBUQUERQUE, C. E. C.; ANDRADE, A. M. Briquetagem: visão histórica e perspectiva futura. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 4, p. 104-109, 1997.

ALMEIDA, H. C.; SILVEIRA, C. B.; ERNANI, P. R.; CAMPOS, M. L.; ALMEIDA, D. Composição química de um resíduo alcalino da indústria de papel e celulose (dregs). **Química Nova**, v. 30, p.1669-1672, 2007.

ANDRADE, A. M.; CARVALHO, L. M. Potencialidades energéticas de oito espécies florestais do Estado do Rio de Janeiro. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 5, n. 1, p. 24-42, jan./dez. 1998.

- ANDRADE, A. M.; GONÇALVES, F. G. Adaptação de um forno para o aproveitamento dos subprodutos da carbonização. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 241-247, 1999.
- BENÍCIO, E. L. **Utilização de resíduo celulósico na composição de briquetes de finos de carvão vegetal**. 2011. 55 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2011.
- BERALDO, A. L.; AZZINI, A. **Bambu: características e aplicações**. Guaíba: Agropecuária, 2004. 127 p.
- BRASIL. **Balço Energético Nacional 2015: ano base 2014**. Rio de Janeiro: EPE, 2015. Disponível em: < https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf>. Acesso em: 28 out. 2015.
- CHIN, O. C.; SIDDIQUI, K. M. Characteristics of some biomass briquettes prepared under modest die pressures. *Biomass and Bioenergy*, Oxford, v. 18, n. 3, p. 223-228, 2000.
- COSTA, T. M. S. **Estudo da viabilidade técnica do emprego do bambu da espécie *Bambusa vulgaris* Schrad como carvão vegetal**. 2004. 62 p. Dissertação (Mestrado em Ciência em Tecnologia Nuclear-Materiais) – Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- COUTINHO, A. R.; FERRAZ, E. S. B. Determinação da friabilidade do carvão vegetal em função do diâmetro das árvores e temperatura de carbonização. *IPEF*, Piracicaba, n. 38, p. 33-37, 1988.
- DEMIRBAS, A. Properties of charcoal derived from hazelnut shell and the production of briquettes using pyrolytic oil. *Energy*, v. 24, n. 2, p. 141-150, 1999.
- DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, A. M.; COSTA JR., D. S. Caracterização de briquetes produzidos com resíduos agroflorestais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, v. 34, n. 79, p. 225-234, 2014.
- DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, C. R.; BRITO, J. O.; MILAN, M. Desdobramento da função de qualidade (QFD) na avaliação da qualidade do carvão vegetal utilizado para cocção de alimentos. *Floresta & Ambiente*, Seropédica, v. 22, n. 2, p. 262-270, 2015.
- 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*, Colombo, v. 30, n. 62, p. 101-106, 2010.
- GONÇALVES, J. E.; SARTORI, M. M. P.; LEÃO, A. Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 13, n. 5, p. 657-661, 2009.
- IBÁ. INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual: ano base 2014**. São Paulo: EPE, 2015. Disponível em: < http://www.iba.org/images/shared/iba_2015.pdf >. Acesso em: 28 out. 2015.
- KALIYAN, N.; R. MOREY, V. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. *Bioresource Technology*, Essex, v. 101, n. 3, p.1082-1090, 2010.
- MANLY, B. J. F. **Métodos estatísticos multivariados: uma introdução**. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2008. 229 p.
- NURMESNIEMI, H.; POYKIO, R.; PERAMAKI, P.; KUOKKANEN, T. The use of a sequential leaching procedure for heavy metal fractionation in green liquor dregs from a causticizing process at a pulp mill. *Chemosphere*, v. 61, n. 10, p. 1475-1484, 2005.

OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. Estudos preliminares de normalização de testes de controle de qualidade do carvão vegetal. In: FUNDAÇÃO CETEC. **Carvão vegetal: destilação, propriedades e controle de qualidade**. Belo Horizonte, 1982. p. 7-38. (Série de Publicações Técnicas, 6).

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**, Colombo, v. 31, n. 61, p. 103-112, 2011.

PEREIRA, F. A.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M.; PATRICIO JR., W.; BIANCHE, J. J. Propriedades físico-químicas de briquetes aglutinados com adesivo de silicato de sódio. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 16, n. 1, p. 23-29, 2009.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; MENDES, R. F.; RIBEIRO, M. X.; TRUGILHO, P. F.; LEITE, E. R. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 11, p. 1252-1258, 2012.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. Brasília: LPF/IBAMA, 1991. 18 p. (Série Técnica, 13).

QUIRINO, W. F.; FONTES, P. J. P.; OKINO, E. Y. A. **Aspectos técnicos da briquetagem de carvão no Brasil**. Brasília: LPF/IBAMA, 1989. 14 p. (Série Técnica, 1).

TIBURTINO, R. F.; PAES, J. B.; BERALDO, A. L.; ARANTES, M. D. C.; BROCCO, V. F. Tratamento Preservativo de Duas Espécies de Bambu por Imersão Prolongada e Boucherie Modificado. **Floresta & Ambiente**, Seropédica, v. 22, n. 1, p. 124-133. 2015.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A.; FRAZÃO, F. J. L.; MATOS, J. L. M. Comparação de métodos de determinação de densidade básica em madeiras. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 20, p. 307-319, 1990.

YAMAN, S.; SAHAN, M.; HAYKIRI-ACMA, H.; SESEN, K.; KUCUKBAYRAK, S. Production of fuel briquettes from olive refuse and paper mill waste. **Fuel Processing Technology**, v. 68, n. 1, p. 23-31, 2000.

Recebido em 08/02/2015

Aceito para publicação em 10/12/2015