

Caracterização de briquetes produzidos com resíduos agroflorestais

Ananias Francisco Dias Júnior¹, Azarias Machado de Andrade², Djailson Silva Costa Júnior³

¹Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Av. Pádua Dias, nº 11, CEP 13418-900, Piracicaba, SP, Brasil

²Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Florestas, Rod. BR 465, Km 7, Campus Universitário, CEP 23851-970, Seropédica, RJ, Brasil

³Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN 160, Km 03, CP 7, CEP 59280-000, Distrito de Jundiá, Macaíba, RN, Brasil

*Autor correspondente:
ananiasjr@usp.br

Termos para indexação:

Bambu
Moinha de carvão
Poder calorífico
Degradação

Index terms:

Bamboo
Fines of charcoal
Calorific value
Degradation

Histórico do artigo:

Recebido em 10/11/2013
Aprovado em 24/09/2014
Publicado em 10/10/2014

doi: 10.4336/2014.pfb.34.79.613

Resumo - O presente trabalho teve por objetivo caracterizar a qualidade de briquetes de moinha de carvão vegetal e resíduos de bambu produzidos em diferentes formulações. Determinou-se a densidade básica, a massa específica aparente, a umidade de equilíbrio e a taxa de degradação térmica dos briquetes. Os briquetes foram avaliados por meio de testes de resistência à compressão e de tamboramento e o poder calorífico superior e inferior foram estimados a partir de equações ajustadas. Os briquetes produzidos com as maiores porcentagens de moinha de carvão vegetal apresentaram densidade básica, densidade aparente, teores de cinza e de carbono fixo mais elevados e menor friabilidade. Os briquetes com as maiores porcentagens de resíduos de bambu na composição apresentaram degradação térmica mais rápida, maior resistência à compressão, além de teor de materiais voláteis e poder calorífico mais elevados.

Characterization of briquettes produced with agroforestry residues

Abstract - The objective of the present was to characterize the quality of briquettes produced with fines of vegetable coal and bamboo residues, under different formulations. Specific gravity density, bulk density mass, moisture content and speed or rate of thermic degradation were evaluated. Compressive strength and rotation test were applied to the briquettes. Superior and inferior calorific values from briquettes were estimate by adjusted equations. Briquettes produced with the highest percentages of vegetable coal fines presented higher specific gravity, bulk density, ash content and fixed carbon. It also presented resistance to fall and abrasion. Briquettes with higher bamboo residues content presented faster degradation, higher compressive strength, beyond higher volatile matters and calorific value.

Introdução

A necessidade de se reduzir as emissões dos gases poluentes agravadores do efeito estufa, assim como o a redução da oferta de petróleo, aumentou nesses últimos anos a demanda por fontes de energia alternativa limpa, barata e renovável. Para Gentil (2008), é preciso incrementar o uso das fontes renováveis de energia nos diversos segmentos industriais, em virtude das dificuldades econômicas que tendem a se agravar ano após ano.

O Brasil detém uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, e mesmo assim ocupa a 13ª posição no ranking dos emissores de CO₂ da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). Com a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), o país se comprometeu a reduzir os gases de efeito estufa (GEEs) aqui gerados em mais de 35% até 2020 (Brasil, 2013).

A geração de resíduos provenientes da biomassa agroflorestal no Brasil é grande e estes podem causar problemas ambientais, como o assoreamento e a contaminação dos cursos d'água, a ocupação de amplos espaços nas indústrias e a poluição do ar durante a sua queima a céu aberto (Protássio et al., 2011). Entretanto, tais resíduos podem ser submetidos ao processo de briquetagem, que os tornam padronizados em relação à densidade, teor de umidade, dimensão, forma e poder calorífico, convertendo-os em combustíveis mais limpos e eficientes. O meio agrícola gera resíduos diversos que podem ser briquetados, como aqueles que resultam da colheita do amendoim, arroz, cana-de-açúcar, coco-da-baía, feijão e milho. No Brasil, a cultura da cana-de-açúcar é a que mais gera biomassa (bagaço), mas esta é utilizada na produção de energia térmica nas próprias destilarias e engenhos. Quanto às demais culturas agrícolas, ainda há uma grande quantidade de materiais residuais que poderiam ser utilizados como biomassa para a briquetagem (Quirino & Brito, 1991; Quirino & Vale, 2003; Brand, 2010).

O gênero *Bambusa* vem sendo cultivado em larga escala no nordeste brasileiro para as mais diversas finalidades, sobretudo nos estados do Maranhão, Pernambuco e Paraíba, devido à presença de solos ácidos e de baixa fertilidade. Esta cultura não necessita de replantio e permite corte a cada dois anos. A biomassa do bambu pode variar de 50 a 100 t ano⁻¹, dependendo da espécie e condições locais, números atrativos para também usá-la para fins energéticos, além dos diversos

usos relatados para esse gênero (Beraldo & Azzini, 2004; Costa, 2004). Paula et al. (2011) mencionam que a utilização de briquetes está intimamente relacionada à preservação ambiental, uma vez que se dá um destino aos resíduos, evitando-se o uso de lenha e de carvão vegetal. Diblasi Filho (2007), por sua vez, comenta que a utilização dos briquetes produzidos pelo aproveitamento de resíduos de biomassa pode reduzir significativamente a poluição ambiental, colaborando com a sustentabilidade energética.

O Brasil é o maior produtor e ao mesmo tempo o maior consumidor mundial de carvão vegetal. Em 2012, consumiu cerca de 33 milhões de metros cúbicos deste insumo, sendo que mais de dois terços desse volume foram destinados às indústrias de siderurgia e metalurgia, sobretudo no estado de Minas Gerais (Brasil, 2013). O carvão vegetal também é utilizado para outros fins, tais como: uso doméstico e comercial (cocção de alimentos, churrasqueiras, lareiras, pizzarias, etc.); termoelétricas; indústria cimenteira; purificação de água e bebidas; indústria farmacêutica; filtros e máscaras contra gases; dentre outros usos.

Segundo Coutinho & Ferraz (1988), Andrade & Gonçalves (1999) em decorrência da sua elevada friabilidade, o carvão vegetal gera durante as etapas de produção, transporte, manuseio e peneiramento nas usinas, uma grande quantidade de finos, que pode chegar a 25% do total produzido. Este material, devido à sua baixa granulometria média, passa a ser considerado um resíduo industrial que não pode ser aproveitado diretamente no alto-forno e, conseqüentemente, deve ser direcionado para outro uso.

A briquetagem consiste na aplicação de pressão a uma massa de partículas, com ou sem a adição de ligante, e com ou sem tratamento térmico posterior. O processo envolve forças de coesão entre sólidos, adesividade do ligante e comportamento do conjunto partícula-ligante (Quirino & Brito, 1991). A briquetagem dos finos de carvão vegetal é uma forma de convertê-los num combustível de boa qualidade (Quirino et al., 1989; Andrade & Carvalho, 1998; Pereira et al., 2009). De acordo com Benício (2011), a briquetagem faz uso da compactação de biomassas para a produção de combustíveis sólidos com boas qualidades física, química e calorífica.

Dentro desse contexto, o presente trabalho objetivou caracterizar a qualidade de briquetes produzidos com moinha de carvão vegetal de baixa qualidade e resíduos de bambu, sob diferentes formulações.

Material e métodos

Resíduos agroflorestais

Para a produção dos briquetes foram utilizados moinha de carvão vegetal (finos de carvão) e resíduos de bambu. A moinha de carvão foi coletada após a carbonização de lenha de *Eucalyptus* spp. em um forno de alvenaria de superfície do Departamento de Produtos Florestais, no Instituto de Florestas da UFRRJ. Os resíduos de bambu (obtidos após beneficiamento de *Bambusa* spp.) foram fornecidos por uma empresa produtora de espetos para churrasco, instalada no município de Nazaré da Mata, no Estado de Pernambuco. A Empresa adquire bambu, de diferentes espécies de *Bambusa* sp., de diversos produtores locais para o beneficiamento em espetos, gerando enorme quantidade de resíduos sem destino definido.

Os resíduos foram homogeneizados através da passagem por uma peneira com a malha de 3 mm. Em seguida, do material homogeneizado foram retiradas amostras simples para as análises subsequentes.

Produção dos briquetes

Para a produção dos briquetes foram utilizadas diferentes misturas, constituídas por moinha de carvão vegetal e resíduos de bambu. Na Tabela 1 são apresentados os tratamentos que foram analisados, com as suas respectivas formulações.

Tabela 1. Tratamentos analisados.

Tratamento	Composição do briquete
01	100% de moinha de carvão vegetal
02	80% de moinha de carvão vegetal e 20% de resíduos de bambu
03	60% de moinha de carvão vegetal e 40% de resíduos de bambu
04	50% de moinha de carvão vegetal e 50% de resíduos de bambu
05	40% de moinha de carvão vegetal e 60% de resíduos de bambu
06	20% de moinha de carvão vegetal e 80% de resíduos de bambu
07	100% de resíduos de bambu

A briquetagem (prensagem) dos resíduos agroflorestais foi efetuada no interior de um molde metálico cilíndrico (de aproximadamente 10 cm de comprimento, diâmetro interno de 6 cm e paredes com espessura de 1 cm), confeccionado em aço inoxidável, utilizando-se uma prensa hidráulica com a capacidade de 15

toneladas-força. Como agente aglutinante utilizou-se a carboximetilcelulose a 3% (CMC), ou seja, na concentração de 30g L⁻¹ para todos os tratamentos. As misturas dos resíduos com a CMC a 3% foram realizadas sobre uma lona plástica, com o auxílio de espátulas para a homogeneização, o que resultou num material uniforme, com uma consistência que permitia a formação dos briquetes.

Durante a fabricação de cada briquete, o volume total do molde foi preenchido com o material homogeneizado. Para a prensagem dos materiais adotou-se a carga de 15 kgf, mantida por um período de três minutos. Após a prensagem, os briquetes foram secos ao ar, por um período de 30 dias até atingirem a umidade de equilíbrio com o ambiente.

Ensaio físicos dos briquetes

Foi determinada a densidade básica (g cm⁻³) e a massa específica aparente (g cm⁻³) dos briquetes. Tais procedimentos foram realizados de acordo com a metodologia descrita na norma NBR 11941 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003), adaptada por Trugilho et al. (1990). Para tanto, o volume foi obtido pelo método hidrostático de deslocamento de líquido segundo o princípio de Arquimedes. Para determinação do volume utilizado na determinação da densidade aparente, os briquetes foram impermeabilizados, a partir do envolvimento dos corpos de prova com um filme de polietileno.

Os ritmos de degradação térmica dos briquetes (g min⁻¹) foram determinados a partir da queima dos mesmos sob a ação de um maçarico de gás butano, por um período de três minutos. O bico maçarico utilizado conta com um queimador cuja eficiência de trabalho equipara-se a dos modelos atuais tipo “leque”; consumo médio de GLP = 130 g h⁻¹; orifício do injetor = 0,25 mm; temperatura máxima da chama = 975 °C; distância entre o ponto de temperatura máxima e a extremidade do queimador = 15 mm. Para este procedimento, observou-se que a pressão de saída gerada foi suficiente para se evitar o engolimento da chama, ou seja, o retrocesso da chama para dentro do maçarico. Assim, essa perda de massa (g min⁻¹) dos briquetes foi determinada a partir de pesagens efetuadas antes e após o referido ensaio.

Ensaio mecânicos aplicado aos briquetes

Os testes de resistência à compressão simples dos briquetes foram realizados utilizando-se uma Máquina Universal de Ensaio da marca Contenco-UMC 300, com

a capacidade de 30 toneladas-força. Os procedimentos foram efetuados segundo Paula et al. (2011). Utilizou-se a célula de carga de 10 toneladas-força, com o carregamento sendo aplicado na parte superior de um dos hemisférios do briquete, na direção longitudinal, até a sua ruptura.

Para avaliação da friabilidade dos briquetes realizou-se teste do tamboramento, de acordo com os procedimentos descritos pela NBR 7402 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1982) e 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).

Ensaio químico dos briquetes

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

Após a determinação das umidades de equilíbrio foram utilizadas equações ajustadas (Sater et al., 2011) para a estimação dos poderes caloríficos superior (PCS) e inferior (PCI) dos briquetes. As equações utilizadas são apresentadas a seguir:

$$PCS_{\text{kcal kg}^{-1}} = [(82 \times \text{TCF}) + (A \times \text{TMV})] \quad (\text{Equação 1})$$

$$PCI_{\text{kcal kg}^{-1}} = \{(\text{PCS} - 25,11 \times U) / [(100 + U) \times 100]\} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: TCF = teor de carbono fixo dos briquetes (%); A = coeficiente dependente, resultante da relação $[\text{TMV} / (\text{TMV} + \text{TCZ})]$; TMV = teor de matérias voláteis dos briquetes (%); e, U = média do teor de umidade dos briquetes, com base no peso úmido (%).

Análise dos dados

A avaliação dos dados foi realizada com base em delineamento estatístico inteiramente casualizado (DIC), com sete tratamentos e doze repetições para cada avaliação ou ensaio proposto. Efetuou-se a análise de variância, adotando-se o nível de 5% de significância e utilizou-se, para a comparação entre as médias dos tratamentos, o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Resultados e discussão

A Tabela 2 apresenta os valores médios das umidades de equilíbrio higroscópico dos briquetes, após a secagem ao ar e a estabilização com a umidade ambiental.

Tabela 2. Valores médios (%) das umidades de equilíbrio higroscópico dos briquetes.

Tratamento	Umidade de equilíbrio (%)	C.V. (%)
01	13,27 a	1,24
02	14,97 a	4,03
03	14,31 a	0,31
04	14,88 a	2,25
05	15,97 a	9,21
06	15,81 a	7,97
07	15,56 a	8,84

Relação moinha de carvão/resíduo de bambu = T₁: 1/0; T₂: 4/1; T₃: 3/2; T₄: 1/1; T₅: 2/3; T₆: 1/4; e, T₇: 0/1. C.V. = Corresponde ao coeficiente de variação. Médias seguidas por uma mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Conforme se observa na Tabela 2, nas condições ambientais em que foram produzidos, os briquetes dos resíduos agroflorestais apresentaram umidade de equilíbrio higroscópico entre 13,27% e 15,56%, não sendo observada diferença significativa entre tratamentos. Tal variável, possivelmente, esteja mais relacionada ao baixo grau de compactação dos briquetes do que à sua composição propriamente dita.

Ensaio físico dos briquetes

Os valores médios de densidades aparente e básica dos briquetes de resíduos agroflorestais, em g cm⁻³, encontram-se ilustrados na Figura 1.

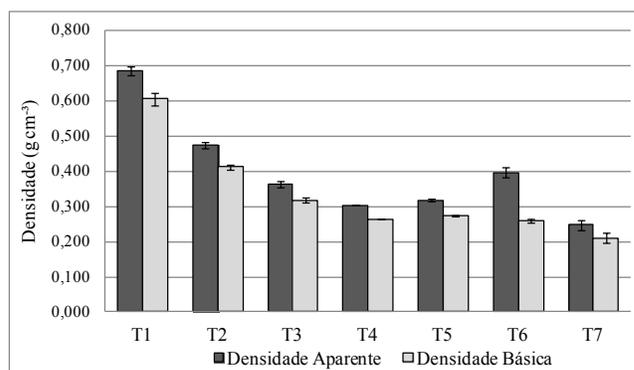


Figura 1. Densidade básica (g cm⁻³) e densidade aparente (g cm⁻³) dos briquetes. Relação moinha de carvão/resíduo de bambu = T₁: 1/0; T₂: 4/1; T₃: 3/2; T₄: 1/1; T₅: 2/3; T₆: 1/4; e, T₇: 0/1.

Observa-se, na Figura 1, que os briquetes do tratamento 1 (100% moinha de carvão) apresentaram valores superiores de densidades básica e aparente. As densidades básica e aparente dos briquetes dos demais tratamentos, apresentaram valores que oscilaram de 0,211 a 0,473 g cm⁻³. Observa-se que as densidades dos briquetes diminuíram à medida que se aumentou a percentagem de resíduos de bambu.

Em testes preliminares, constatou-se que a densidade básica média do material utilizado (*Bambusa spp.*), in natura, ou seja, antes dos colmos de bambu serem processados para a fabricação dos espetos para churrasco, foi de 0,55 g cm⁻³. Tal valor coincidiu com os valores médios encontrados por Brito et al. (1987) e por Beraldo & Azzini (2004) para o *Bambusa tuldooides*. Considerando-se que, na presente pesquisa, o resíduo de bambu foi obtido após o beneficiamento do bambu, sendo reconstituídos para formar briquetes, o resultado obtido foi considerado consistente.

Para a densidade aparente, Melo (2000), avaliando briquetes produzidos com moinha de carvão vegetal e alcatrão, encontrou um valor médio de densidade aparente de 0,620 g cm⁻³. 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 básica média de 0,663 g cm⁻³.

A Figura 2 ilustra a associação da taxa de queima ou de degradação térmica (g min⁻¹), que é uma importante variável dos briquetes de resíduos agroflorestais para fins energéticos, com a densidade aparente (g cm⁻³).

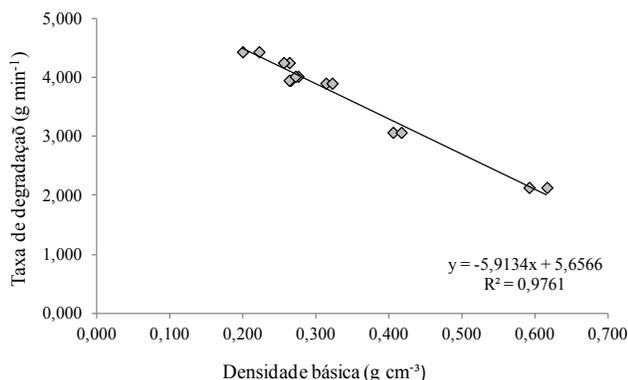


Figura 2. Correlação entre a taxa de degradação térmica e a densidade aparente dos briquetes.

Observa-se a existência de uma relação negativa, altamente significativa, entre a densidade do briquete e a taxa de queima. Assim sendo, os briquetes que apresentaram as maiores densidades básica e aparente, por exemplo, aqueles do tratamento 1 (100% de moinha de carvão vegetal), corresponderam aos que se degradaram termicamente de uma forma mais lenta. Ou seja, aqueles com as maiores densidades levarão mais tempo para se degradar termicamente, até ocorrer a completa calcinação, do que aqueles que apresentem menores densidades.

De uma maneira bastante simples pode-se afirmar que, para apresentar uma alta eficiência energética, o briquete, além de demonstrar um alto poder calorífico, deverá manter o fornecimento desta energia térmica durante o maior período de tempo possível. Tal afirmativa corrobora com Quirino & Brito (1991) que salientam que é muito importante se estimar a quantidade de calor que um briquete poderá fornecer num determinado período de tempo. Os autores mencionam também que a densidade influi diretamente nesta capacidade.

Ensaio mecânicos aplicados aos briquetes

A Tabela 3 apresenta os valores médios da resistência à compressão dos briquetes (kgf cm⁻²), dentro dos respectivos tratamentos.

Tabela 3. Valores médios das resistências dos briquetes à compressão.

Tratamento	Resistência à compressão (kgf cm ⁻²)	C.V. (%)
01	42,01 e	0,67
02	50,90 cd	1,17
03	55,02 c	0,17
04	57,48 c	1,14
05	64,09 b	0,41
06	67,94 b	1,91
07	80,40 a	0,88

Médias seguidas por uma mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. Relação moinha de carvão/resíduo de bambu = T₁: 1/0; T₂: 4/1; T₃: 3/2; T₄: 1/1; T₅: 2/3; T₆: 1/4; e, T₇: 0/1.

Observam-se aumentos significativos na resistência à compressão dos briquetes (kgf/cm²), à medida que se aumenta o teor de resíduo de bambu na composição dos mesmos (Tabela 3). A própria morfologia destes materiais pode ajudar no esclarecimento deste comportamento,

uma vez que os resíduos de bambu apresentam-se, quase sempre, na condição de fibras e resíduos fibrilares, ao passo que a moinha de carvão vegetal, devido à sua alta friabilidade, apresenta-se na forma de estruturas esféricas ou semiesféricas, bastante degradadas pelo tratamento térmico anterior. Pode-se observar essas características na Figura 3 onde são apresentadas as superfícies dos briquetes formados com 100% de moinha de carvão vegetal (tratamento 1) e 100% de resíduos de bambu (tratamento 7), após um aumento de 800X em microscópio digital.



Figura 3. Superfícies dos briquetes formados com 100% de moinha de carvão vegetal (T1) e 100% de resíduos de bambu (T7), visualizadas no aumento de 800X em microscópio digital.

Nas figuras 4 e 5 são apresentadas as correlações entre as densidades dos briquetes (g cm^{-3}) e as resistências à compressão dos mesmos (kgf cm^{-2}).

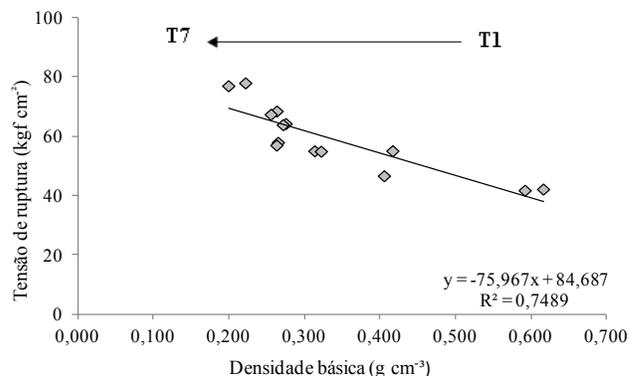


Figura 4. Correlação entre a tensão de ruptura e a densidade básica dos briquetes.

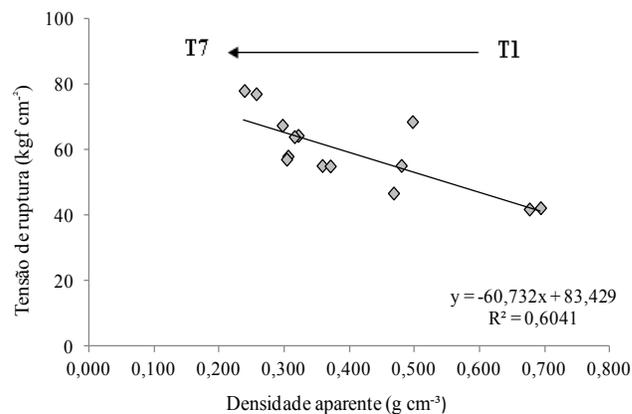


Figura 5. Correlação entre a tensão de ruptura e a densidade aparente dos briquetes.

Os valores médios das resistências dos briquetes à compressão, observados em alguns dos tratamentos analisados, se apresentaram próximos, ou até mesmo foram superiores àqueles sugeridos por Quirino et al. (1989) para fins siderúrgicos, em torno de 70 kgf cm^{-2} . Os mesmos autores esclarecem que os briquetes devem apresentar uma elevada resistência à compressão por serem constantemente submetidos a impactos, quedas e abrasões, sobretudo durante o manuseio, transporte e armazenamento.

Na Tabela 4, são apresentados os valores médios das variações granulométricas dos briquetes de resíduos agroflorestais (%), após o teste de tamboramento. Observou-se decréscimo na friabilidade dos briquetes à medida que se diminuiu a quantidade de moinha de carvão vegetal nas suas composições.

Tabela 4. Valores médios das classificações granulométricas dos briquetes de resíduos agroflorestais (%), após o ensaio de tamboramento.

Tratamento	Granulometria média (mm)			
	25	15	5	1,5
Classificação granulométrica (%)				
01	15,90	59,99	4,17	19,94
02	13,13	41,24	3,43	42,20
03	50,63	14,62	6,18	28,57
04	58,60	16,32	3,05	22,03
05	67,38	6,78	4,93	20,91
06	68,87	7,95	4,04	19,14
07	79,71	4,40	2,51	13,39

Em que: relação moinha de carvão/resíduo de bambu = T₁: 1/0; T₂: 4/1; T₃: 3/2; T₄: 1/1; T₅: 2/3; T₆: 1/4; e, T₇: 0/1.

Notou-se baixa friabilidade para os briquetes do tratamento 1 (quando a moinha de carvão vegetal foi prensada pura). É provável que tal comportamento esteja relacionado à boa conformação das partículas de carvão vegetal (Figura 3), justapondo-se entre si de uma forma mais organizada, durante a formação do briquete.

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.

Ensaio químicos dos briquetes

Na Tabela 5 são apresentados os valores médios para os teores de matérias voláteis (TMV), de cinza (TCZ) e de carbono fixo (TCF) dos briquetes. A análise química imediata confirmou a existência de altos teores de materiais voláteis nos briquetes com as maiores quantidades de resíduos de bambu na composição. Também foi possível observar que, do tratamento 1 ao tratamento 7, acompanhando o aumento gradativo do teor de resíduos de bambu na constituição dos briquetes, ocorreu, um incremento de 285,71% no teor de materiais voláteis (TMV).

A liberação de compostos voláteis, no caso dos briquetes com os maiores teores de moinha de carvão vegetal na composição, foi muito menos intensa, uma vez que os finos de carvão vegetal já haviam sido submetidos à pirólise lenta no forno de carvoejamento. Durante o processo de carvoejamento, de uma forma muito menos intensa, os gases e vapores foram eliminados da lenha de eucalipto da qual derivou a

moinha de carvão, resultando, ao final, uma estrutura carbonosa com menores teores de compostos voláteis na sua constituição química (Andrade, 1993; Andrade et al., 1994). Ou seja, a moinha de carvão vegetal já havia passado pelo processo de desvolatilização enquanto que os resíduos de bambu ainda não haviam sido submetidos a esse tratamento térmico.

Tabela 5. Valores médios dos teores de matérias voláteis (TMV), de cinza (TCZ) e de carbono fixo (TCF) dos briquetes.

Tratamento	TMV (%)	TCZ (%)	TCF (%)
01	21,00 e	27,00 a	52,00 a
02	32,00 d	22,00 ab	46,00 a
03	41,00 d	20,00 b	39,00 b
04	51,00 c	16,00 b	33,00 bc
05	63,00 b	8,00 c	29,00 c
06	73,00 a	6,00 cd	21,00 d
07	81,00 a	2,60 cd	16,40 d

Médias seguidas por uma mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. Em que: relação moinha de carvão/resíduo de bambu = T₁: 1/0; T₂: 4/1; T₃: 3/2; T₄: 1/1; T₅: 2/3; T₆: 1/4; e, T₇: 0/1.

É comum a moinha de carvão vegetal apresentar teores um pouco mais elevados de cinza na sua composição, quando comparada com o carvão graúdo produzido na mesma fornada. Segundo Andrade & Gonçalves (1999), percentuais de 30% a 40% superiores podem ser considerados normais, uma vez que o referido material tende a sedimentar-se na região inferior dos fornos, juntamente com alguma cinza gerada de combustões indesejáveis nas outras regiões. Há de se considerar, também, que ao nível do solo encontram-se os “tatus”, que correspondem às últimas aberturas que serão fechadas antes da(s) chaminé(s) de um forno e, portanto, mais susceptíveis à combustão de parte do material submetido à carbonização. No presente trabalho, além das possibilidades anteriormente apresentadas, deve-se considerar que a moinha de carvão vegetal foi coletada junto ao piso de terra batida do forno de carvoejamento, sendo provável que tenha ocorrido contaminação com materiais inorgânicos. Possivelmente, minerais como a sílica, o cálcio, o sódio e os demais elementos encontrados na base do forno se incorporaram aos finos de carvão vegetal e resultaram em aumentos significativos nos teores de cinza dos briquetes em cujas composições estavam presentes.

Como os teores de voláteis dos briquetes com as maiores percentagens de resíduo de bambu se mostraram mais elevados significativamente do que os teores de cinza nos briquetes com as maiores percentagens de moinha de carvão vegetal, os teores de carbono fixo nestes últimos foram significativamente maiores. Portanto, quanto maior o teor de moinha de carvão vegetal na composição dos briquetes, maiores foram os teores de carbono fixo. Também foi possível observar que além do aumento gradativo do teor de moinha de carvão vegetal na constituição dos briquetes do tratamento 7 ao tratamento 1, ocorreu, paralelamente, um incremento de 217,07% do menor (16,4%) para o maior (52,0%) teor de carbono fixo (TCF).

Os teores de carbono fixo observados, embora estejam abaixo da média considerada ideal para fins de cocção (74,0%), conforme descrito por Brito (2002) e Rosa et al. (2012), permitem a atribuição de diversos usos para os briquetes, tais como: queima direta em fogões, fornalhas de caldeiras, caieiras de olarias, fornos de cerâmicas e de cal, pizzarias, padarias, churrasqueiras, fornalhas de alambiques, secadores de grãos, churrasqueiras elareiras blindadas, forjas, dentre outras aplicações. Vale salientar que, quanto maior o teor de materiais voláteis no combustível, maior será a capacidade de o mesmo de gerar chamas (Brito et al., 1987; Andrade & Gonçalves, 1999). Assim sendo, no caso de usos que exijam a presença de chamas durante o aquecimento, como nas fornalhas de alambiques e de caldeiras, bem como nas caieiras de olarias, é recomendável o uso dos briquetes com os maiores teores de resíduo de bambu na composição. Por outro lado, nos usos onde não é recomendável a formação de chamas durante o aquecimento, como nas churrasqueiras, lareiras, pizzarias, padarias e forjas, os briquetes mais indicados são aqueles com os maiores teores de moinha de carvão vegetal na composição. Em ambos os casos, devido aos baixos teores de carbono observados, os briquetes de resíduos agroflorestais não são indicados como termorreduzores, por exemplo, em aplicações siderúrgicas e metalúrgicas, bem como em fornos de cimento.

Na Tabela 6, encontram-se os valores médios dos poderes caloríficos superior e inferior dos briquetes de resíduos agroflorestais.

Tabela 6. Valores médios estimados do poder calorífico superior (PCS) e do poder calorífico inferior (PCI) dos briquetes de resíduos agroflorestais.

Tratamento	PCS (kcal kg ⁻¹)	PCI (kcal kg ⁻¹)
01	6.427,01 b	5.379,88 c
02	6.620,12 b	5.431,07 c
03	6.478,32 b	5.352,70 c
04	6.786,05 b	5.581,79 bc
05	7.418,11 a	6.050,69 ab
06	7.562,04 a	6.186,86 a
07	7.824,18 a	6.280,93 a

Médias seguidas por uma mesma letra em cada coluna, não diferem estatisticamente entre si (teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade). Em que: relação moinha de carvão/resíduo de bambu = T₁: 1/0; T₂: 4/1; T₃: 3/2; T₄: 1/1; T₅: 2/3; T₆: 1/4; e, T₇: 0/1.

Segundo Andrade (1993), é importante considerar que o poder calorífico de um combustível pode ser incrementado quando se aumenta consideravelmente o teor de carbono fixo ou o teor de materiais voláteis, dependendo da qualidade dos compostos volatilizáveis. No entanto, não há como se aumentar, simultaneamente, o teor de carbono e o teor de materiais voláteis, uma vez que existe um certo antagonismo entre o comportamento destas variáveis. Esse autor menciona ainda que o poder calorífico de um combustível diminuirá se o seu teor de cinza aumentar. Neste trabalho de pesquisa, os poderes caloríficos superior e inferior dos briquetes apresentam potencial para diversas aplicações. Valores significativamente mais elevados de poder calorífico foram apresentados pelos briquetes com os maiores teores de resíduo de bambu na composição, em decorrência dos seus maiores teores de materiais voláteis. Por outro lado, os poderes caloríficos dos briquetes com os teores mais elevados de moinha de carvão vegetal na composição, embora se mostrem inferiores do ponto de vista estatístico, também se apresentaram em níveis satisfatórios para vários usos como combustível.

Valores médios de poder calorífico superior de 6.391 kcal kg⁻¹ e 4.219 kcal kg⁻¹, foram encontrados por Costa (2004) e Brito et al. (1987), respectivamente, quando avaliaram o carvão de colmos de *Bambusa vulgaris*. Tais resultados são inferiores aos encontrados na presente pesquisa, o que corrobora a afirmação de

que a briquetagem é um processo viável e que melhora a qualidade energética de resíduos agroflorestais, sobretudo daqueles com baixa densidade.

Conclusões

Briquetes produzidos com maiores porcentagens de moínha de carvão vegetal apresentam maiores valores de densidade básica e aparente, resistência à queda, teores de cinza e de carbono fixo.

Briquetes com maiores porcentagens de resíduos de bambu na composição apresentam degradação térmica mais rápida, maior resistência à compressão, além de teor de materiais voláteis e poder calorífico mais elevados.

É viável o uso de moínha de carvão vegetal com baixos teores de cinza, para a produção de briquetes com elevados teores de carbono fixo.

É recomendável a realização de estudos complementares relacionados aos resíduos de bambu, tratando da produtividade, adequação de equipamentos, custo de produção, disponibilidade e acesso à matéria-prima, tecnologia e mão-de-obra disponível.

Briquetes para serem queimados em fornalhas de caldeiras e de alambiques, fogões, olarias, cerâmicas, secadores de grãos, entre outros usos que exijam a presença de labaredas (chamas), podem ser produzidos a partir da utilização de maiores teores de resíduo de bambu.

Briquetes para serem queimados em churrasqueiras, forjas, pizzarias, padarias, entre outros usos que exijam a presença de braseiro sem chamas, são produzidos a partir da utilização de maiores teores de moínha de carvão vegetal.

Referências

- 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. **Efeito da fertilização mineral e da calagem na produção e na qualidade da madeira e do carvão de eucalipto**. 1993. 105 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- ANDRADE, A. M.; GONÇALVES, F. G. Adaptação de um forno para o aproveitamento dos subprodutos da carbonização. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 23, n. 2, p. 241-247, 1999.
- ANDRADE, A. M.; VITAL, B. R.; BARROS, N. F.; DELLA LUCIA, R. M.; CAMPOS, J. C. C.; VALENTE, O. F. Efeitos da fertilização mineral e da correção do solo na produção e na qualidade do carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 18, n. 1, p. 63-68, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7402**: carvão vegetal-determinação granulométrica. Rio de Janeiro, 1982.
- _____. **NBR 8112**: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986.
- _____. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003.
- BENICIO, E. L. **Utilização de resíduo celulósico na composição de briquetes de finos de carvão vegetal**. 2011. 55 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- BERALDO, A. L.; AZZINI, A. **Bambu**: características e aplicações. Guaíba: Agropecuária, 2004. 127 p.
- BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 2010. 114 p.
- BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço energético nacional**: ano base 2012. Brasília, DF, 2013. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2014.
- BRITO, J. O. A escolha certa do carvão. **Revista Churrasco e Churrascarias**, v. 5, n. 24, p. 16, 2002.
- BRITO, J. O.; TOMAZELLO FILHO, M.; SALGADO, A. L. B. Produção e caracterização do carvão vegetal de espécies e variedades de bambu. **IPEF**, Piracicaba, n. 36, p. 13-17, ago. 1987.
- COSTA, T. M. S. **Estudo da viabilidade técnica do emprego do bambu da espécie *Bambusa vulgaris* Schard como carvão vegetal**. 2004. 62 f. Dissertação (Mestrado em Ciência em Tecnologia Nuclear-Materiais) – Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, SP.
- 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.
- DIBLASI FILHO, I. **Ecologia geral**. São Paulo: Ciência Moderna, 2007. 52 p.
- GENTIL, L. V. B. **Tecnologia e economia de briquete de madeira**. 2008. 195 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Nacional de Brasília, Brasília, DF.
- MELO, V. P. S. **Produção de briquetes de carvão vegetal com alcatrão de madeira**. 2000. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. **Estudos preliminares de normalização de testes de controle de qualidade do carvão vegetal**. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1982.
- 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. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.66.103
- PEREIRA, F. A.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M.; PATRICIO JÚNIOR, 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.

PROTÁSSIO, T. P.; ALVES, I. C. N.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; BALIZA, A. E. R. Compactação da biomassa vegetal visando a produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 273-283, out/dez, 2011. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.68.273

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. Brasília, DF: 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, DF: LPF/IBAMA, 1989. (Série Técnica, 1).

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, São Paulo, SP, n. 89, p. 100-106, abr. 2003.

ROSA, R. A.; ARANTES, M. D. C.; PAES, J. B.; ANDRADE, S. P.; MOULIN, J. C. Qualidade do carvão vegetal para uso doméstico. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, Gurupi, v. 3, n. 2, p. 41-48, 2012.

SATER, O.; SOUZA, N. D.; ELIAS, T. F.; TAVARES, R. Estudo comparativo da carbonização de resíduos agrícolas e florestais visando à substituição da lenha no processo de secagem de grãos de café. **Revista Ceres**, Lavras, v. 58, p. 717-722, 2011.

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.