Produção e avaliação de briquetes compostos por diferentes proporções de resíduos sólidos urbanos

Este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades físicas, químicas e mecânicas de briquetes produzidos com diferentes proporções de resíduos de poda urbana, lodo de flotação, papelão ondulado e embalagens cartonadas. Os briquetes foram produzidos em escala laboratorial, utilizando pressão de 1200 PSI, temperatura 120oC e utilizando como base os resíduos de poda urbana. Para avaliação dos briquetes foram determinadas as seguintes propriedades: densidade aparente, resistência à compressão, umidade de equilíbrio higroscópico, poder calorífico, densidade energética, teor de voláteis, carbono fixo e cinzas. De acordo com os resultados, observou-se que a adição de lodo na composição dos briquetes de poda urbana proporcionou incrementos na resistência e densidade, porém reduziu o poder calorífico e aumentou o teor de cinzas. A incorporação de papelão ou embalagens cartonadas na composição dos briquetes ocasionou aumento na densidade e na resistência e uma pequena redução no poder calorífico. Os briquetes produzidos em todos os tratamentos apresentaram densidade energética entre 5.000 e 6.000 kcal.m⁻³. Conclui-se que os resíduos sólidos urbanos utilizados neste estudo apresentaram potencial para produção de briquetes, tornando-se uma alternativa sustentável para produção de energia.

Palavras-chave: Energia da biomassa; Sustentabilidade; Densidade energética; Briquetes.

Production and evaluation of briquettes composed of different proportions of solid urban waste

This work aimed to evaluate the physical, chemical and mechanical properties of briquettes produced with different proportions of waste from urban pruning, flotation sludge, corrugated cardboard and carton packs. The briquettes were produced on a laboratory scale, using a pressure of 1200 PSI, temperature 120oC and using urban pruning waste as a base. To evaluate the briquettes, the following properties were determined: bulk density, compressive strength, hygroscopic equilibrium moisture, calorific value, energy density, volatile content, fixed carbon and ash. According to the results, it was observed that the addition of sludge in the composition of urban pruning briquettes provided increases in resistance and density, but reduced the calorific value and increased the ash content. The incorporation of cardboard or carton packs in the composition of the briquettes caused an increase in density and resistance and a small reduction in calorific value. The briquettes produced in all treatments had an energy density between 5,000 and 6,000 kcal.m⁻³. It is concluded that the solid urban waste used in this study showed potential for the production of briquettes, making it a sustainable alternative for energy production.

Keywords: Biomass energy; Sustainability; Energy density; Briquettes.

Topic: **Engenharia Ambiental**

Received: **02/05/2020**

Approved: **30/06/2020**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Marina Moura de Souza
Universidade Federal de Viçosa, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/0963363182664782>
<http://orcid.org/0000-0002-6563-2485>
mourasouza@gmail.com

Admilson Clayton Barbosa
Universidade Federal de São Carlos, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3224382531961678>
<http://orcid.org/0000-0002-0371-1233>
admilson.barbosa@emae.com.br

Angélica de Cássia Oliveira Carneiro
Universidade Federal de Viçosa, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/9474032258378987>
<http://orcid.org/0000-0002-5992-3059>
cassiacarneiro1@gmail.com

Benedito Rocha Vital
Universidade Federal de Viçosa, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8240034013281714>
<http://orcid.org/0000-0002-3160-8356>
benedito.vital@gmail.com

DOI: 10.6008/CBPC2318-2881.2020.003.0009

Referencing this:

SOUZA, M. M.; BARBOSA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R..
Produção e avaliação de briquetes compostos por diferentes
proporções de resíduos sólidos urbanos. **Nature and Conservation**,
v.13, n.3, p.93-105, 2020. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2318-2881.2020.003.0009>

INTRODUÇÃO

Resíduos sólidos, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas, são definidos como quaisquer resíduos que se apresentem nos estados sólido e semissólidos resultantes de atividades industrial, domiciliar, hospitalar, comercial, agrícola, e de serviços de varrição (ABNT, 2004). Outros autores consideram que os estes resíduos compreendem, estritamente, os de origem residencial, comercial, serviços de varrição, de feiras livres, das capinas e de poda (BIDONE et al., 1999).

Independente da abrangência da definição, no Brasil se tem uma grande geração de resíduos sólidos no ambiente urbano, principalmente nas regiões metropolitanas e, de modo geral, na maioria das vezes não possuem destinação correta ou mesmo sustentável. Sendo assim, em 2010, foi aprovada a Lei 12.305 que Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que estabelece destinação ambientalmente adequada de resíduos incluindo a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde e à segurança e minimizar os impactos ambientais adversos. Esta mesma lei estabelece que, poderão ser utilizadas tecnologias que visem a recuperação energética de resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada a viabilidade técnica e ambiental, contemplando a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos.

Neste sentido, existe um grande esforço relacionado à obtenção de novas fontes de energia, principalmente provenientes dos resíduos, que sejam capazes de substituir parcialmente os combustíveis fósseis por fontes mais econômicas e ambientalmente corretas. É nesse contexto que a utilização de biomassa e de resíduos sólidos como fonte de energia, ganha destaque como alternativa técnica e econômica (CAIRES, 2010).

Um resíduo sólido urbano muito comum é o resultante da poda de árvores e outros vegetais que compõe a arborização dos municípios. Oriundo das atividades de manutenção das áreas verdes no ambiente urbano, e realizado tanto por prefeituras municipais quanto por concessionárias de energia elétrica, os resíduos de poda de árvores são compostos por galhos, folhas, raízes e troncos e podem normalmente podem ser obtidos ao longo de todo o ano. Apesar de alguns trabalhos feitos na tentativa de aproveitar estes resíduos, pesquisas apontam que este material vem sendo, em grande quantidade, descartados em aterros na maioria dos municípios (CENBIO, 2007). Embora a classificação dos resíduos de poda de acordo com a NBR 10.004/2004 seja classe II, não perigoso, a disposição destes em aterros pode provocar uma série de problemas, pois podem interagir química e biologicamente com materiais preexistentes, causando impactos sobre a qualidade do solo, água e ar (CORTEZ et al., 2008).

O papelão ondulado também é um dos produtos mais encontrados dentre os resíduos sólidos urbanos e é comumente separado como lixo seco para reciclagem. Este material é muito utilizado como embalagem para produtos diversos devido a sua versatilidade e uma gama de outras vantagens competitivas em relação a outros produtos tendo, dentre a mais importante delas, o fato de ser 100% reciclável. De acordo com o Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE), em 2011, 73,3% do volume total de papelão

ondulado produzido no Brasil foi reciclado, porém grande parte desse valor se deve à chamada exportação indireta, ocasionada devido à reciclagem do papelão em outros países que é exportado como embalagens de produtos. Apesar da alta taxa de reaproveitamento do papelão, observam-se algumas inconveniências como, por exemplo, contaminação ou perda de resistência das chapas devido à danificação das fibras durante os vários ciclos de reciclagem.

Neste contexto, pode-se destacar também as embalagens cartonadas ou multicamadas como outro resíduo de relevante ocorrência. Atualmente são amplamente produzidos e tem por função proteger alimentos líquidos, semilíquidos e viscosos preservando-os por períodos prolongados. Geralmente, são constituídas por 6 camadas, incluindo papel de fibra longa, polietileno de baixa densidade e alumínio, possuem reciclagem onerosa e complexa, atingindo taxas baixas de 27% no Brasil. O material obtido através da reciclagem de embalagens cartonadas tem sido empregado como matéria prima alternativa na produção de telhas e placas para indústria moveleira e de construção civil (CERQUEIRA, 2000).

Não muito convencional e com demanda de pesquisas quanto à destinação mais sustentável se tem o lodo advindo do tratamento de águas pela técnica de flotação. A técnica de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) é bastante utilizada no campo do saneamento ambiental e se destaca por ser parte dos sistemas de tratamentos de águas residuárias geradas em diversos segmentos industriais (REALI, 2004). Embora apresente diversas vantagens sob o ponto de vista de eficiência, a flotação pode gerar valores acima de 4% de lodo e considerando-se o volume de água tratada este percentual pode atingir valores consideráveis e em paralelo acarreta problema da disposição de forma segura e sustentável.

Existem várias rotas de melhor aproveitamento destes resíduos para energia, porém devido principalmente a heterogeneidade e a baixa densidade destes, a briquetagem é atualmente uma das alternativas mais viáveis técnica e economicamente para transformá-los em combustíveis com alta densidade energética e competitivo perante outras fontes.

De acordo com Gentil (2008), briquetes produzidos a partir de diferentes biomassas residuais vêm se destacando no mercado, principalmente pelo apelo ambiental. Karamazovi (2011) afirmou que os briquetes além de servirem para gerar energia para indústrias, podem ser utilizados em restaurantes, pizzarias, padarias, olarias, lareiras, dentre outros. Segundo Paula (2010) toda empresa que possuir um forno ou uma caldeira na qual possa ser utilizada lenha, é um cliente potencial para usar briquetes.

Desta forma, pode-se salientar que a relevante posição do Brasil no mercado mundial e na utilização de energias renováveis tem incentivado, cada vez mais, estudos com intuito de identificar novas fontes de biomassa para briquetagem bem como a otimização de parâmetros de produção, embora o processo de forma geral já esteja dominado. Além disso, discussões sobre a disponibilidade da biomassa, competitividade por diferentes usos, logística de transporte e mercado consumidor são fatores que devem ser considerados para a implantação de uma usina de briquetagem. Assim, o objetivo principal desse trabalho é a produção de briquetes a partir de diferentes proporções de resíduos sólidos urbanos visando a obtenção de novas fontes energéticas e, para tanto, fez-se necessário a caracterização dos briquetes de acordo com parâmetros físicos, mecânicos e químicos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a produção dos briquetes foram utilizados resíduos sólidos urbanos provenientes de poda de árvores do ambiente urbano, lodo de flotação, papelão ondulado e embalagens cartonadas. Os resíduos de poda de árvores foram coletados em um Centro de Processamento da cidade de Santo Amaro/SP e foram provenientes das atividades de poda da região Sul da cidade de São Paulo/SP. Foi coletado aproximadamente 0,95m³ de material processado na forma de cavacos. De acordo com dados provenientes deste Centro, as espécies arbóreas mais frequentes na área metropolitana de São Paulo são: *Ficus sp.*, *Caesalpinia peltophoroides* (Benth), *Licania Tomentosa* (Benth), *Tabebuia sp.* e *Largestroemia indica* (L.), sendo assim, as amostras foram compostas predominantemente por estas espécies além de gramíneas, pecíolos de palmeiras e alguns materiais parcialmente decompostos.

O papelão ondulado e as embalagens cartonadas foram obtidas em centros de triagem de material reciclável da cidade de Viçosa/MG. Todos os materiais foram coletados sem nenhuma contaminação visível, como manchas de óleo ou adesivos plásticos. Foram coletados aproximadamente 20Kg de cada material sem processamento prévio.

O lodo de flotação foi coletado em um sistema experimental de tratamento de águas do Rio Pinheiros, localizado na Empresa Metropolitana de Águas e Energia (EMAE), São Paulo. Foi coletado aproximadamente 0,5m³ de lodo proveniente da área de descarte deste processo. O lodo de flotação e os resíduos de poda urbana, após a coleta, foram submetidos à secagem em condições ambientais, com reviramento diário durante 10 dias e os demais resíduos já se encontravam em umidade adequada para utilização.

A preparação dos resíduos da poda urbana, do papelão ondulado e embalagens cartonadas para a produção dos briquetes consistiu basicamente da moagem em moinho de martelo, dotado de peneira de 6 mm. Para o lodo de flotação ocorreu apenas o peneiramento em peneira de 6 mm, visto que o material já se apresentava com aspecto granular. Os resíduos foram previamente caracterizados, sob o ponto de vista energético de acordo com a umidade, densidade a granel, poder calorífico e periculosidade de acordo com a NBR 10.004.

Os briquetes foram produzidos usando como base os resíduos de poda urbana devido sua composição lignocelulósica que é adequada ao processo de compactação. Foram realizados três experimentos distintos (Figura 1) em função do tipo de resíduo, a saber: Experimento I: briquetes compostos por resíduos de poda e lodo de flotação, sendo 11 tratamentos compostos de misturas de 0 até 25% de adição de lodo (amplitude de 2,5%); Experimento II: briquetes constituídos por resíduos de poda e papelão ondulado, sendo 11 tratamentos compostos de misturas de 0 até 100% (amplitude de 10%); Experimento III: briquetes constituídos por resíduos de poda e embalagens cartonadas, sendo 11 tratamentos de misturas de 0 até 100% (amplitude de 10%).

Foi utilizada uma briquetadeira laboratorial da marca Lippel modelo LB-32, ajustada na temperatura de 120°C, exceto para os briquetes produzidos com embalagens cartonadas que, devido as propriedades do

polietileno contido nesse material, foram compactados a temperatura de 90°C. O tempo de prensagem e de resfriamento dos briquetes foram ambos de 5 minutos e a pressão de compactação utilizada foi de 1200 PSI.

Figura 1: Delineamento experimental utilizado para a produção dos briquetes a partir dos diferentes resíduos sólidos urbanos.

Para a produção de cada briquete foi utilizado 16,0g de mistura de materiais, na granulometria inferior que 6 mm e teor de umidade entre 8 e 12%, base seca. Após a produção, os briquetes foram condicionados em câmara climática até atingir a umidade de equilíbrio, nas condições de $65 \pm 3\%$ de umidade e temperatura de $20 \pm 3^\circ\text{C}$. A densidade aparente foi determinada de acordo com o método proposto por Vital (1984), utilizando-se uma balança hidrostática para determinação do volume deslocado.

A carga máxima de ruptura foi calculada durante a aplicação de força de compressão plana, utilizando-se uma máquina de testes universal modelo LOSENHAUSEN. O procedimento de análise foi de acordo com a metodologia NBR 7190 – Anexo B (ABNT, 1997), uma vez que não se tem normas específicas para testes em briquetes. A umidade de equilíbrio higroscópico foi obtida após climatização dos briquetes em câmara climática a 23°C e 65% de umidade relativa.

O poder calorífico superior foi determinado de acordo com a metodologia descrita pela norma da ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984), em duplicatas, utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática. A densidade energética foi calculada pela multiplicação da densidade a granel pelo poder calorífico. A determinação do conteúdo de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986).

O experimento foi analisado segundo um delineamento inteiramente casualizado. Os dados foram submetidos aos testes de Lilliefors para testar a normalidade, e Cochran para testar a homogeneidade das variâncias. Em seguida, procedeu-se à análise de variância pelo teste *F* e realizaram-se gráficos de regressão linear simples e quadrática, dependendo do comportamento dos dados, sendo:

$$\text{Linear: } Y = \beta_1 \cdot x + \beta_0$$

$$\text{Quadrática: } Y = \beta_2 \cdot x^2 + \beta_1 \cdot x + \beta_0$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Características dos Resíduos sólidos urbanos

Na Tabela 1 são apresentadas as principais características dos resíduos utilizados para a produção dos briquetes, bem como a sua classificação quanto a periculosidade.

Tabela 1: Características e periculosidade dos resíduos sólidos urbanos

Parâmetro	Resíduos			
	Poda	Papelão Ondulado	Embalagens Cartonadas	Lodo
Umidade (%)	10,42	9,58	4,99	11,36
Densidade a Granel(kg/m ³)	240	30	30	690
Cinzas (%)	5,23	3,92	5	64,54
PCS (Kcal/Kg)	5059	4220	4412	1338
Classificação NBR 10.004	Classe II	Classe II	Classe II	Classe II – não inerte

Briquetes compostos por resíduos de poda urbana e lodo de flotação

Nas Figuras 2 e 3 são apresentados os valores observados e estimados dos parâmetros determinados em função das porcentagens de lodo de flotação e resíduos de poda urbana presente nos briquetes. Na Figura 2ª se observa que a umidade de equilíbrio higroscópico diminuiu com o aumento da porcentagem de lodo adicionada aos briquetes, característica bastante importante em se tratando de combustíveis, pois a adição de materiais que favoreçam uma menor absorção de água durante manuseio, armazenamento e transporte, melhora a eficiência energética do produto. Observa-se na Figura 2b aumento da densidade aparente à medida que se aumenta a quantidade de lodo na composição dos briquetes, isso se deve possivelmente a maior densidade do resíduo do lodo em comparação ao resíduo de poda.

Houve uma tendência de aumento da carga máxima de ruptura dos briquetes com o aumento de lodo na composição (Figura 2c). A força requerida durante o teste de resistência a compressão plana expressa a tensão máxima suportada pelo briquete até o seu rompimento e está relacionada com as forças de aderência entre as partículas do material que o constitui (KALYAN et al., 2009). Dessa forma se pode dizer que o lodo de flotação e as partículas de poda urbana tiveram uma aderência satisfatória mesmo nas maiores proporções de lodo.

O lodo possui um forte caráter inorgânico, evidenciado por maiores teores de cinzas nos briquetes com maiores concentrações de lodo (Figura 2d). Esse fato ocasionou a tendência de diminuição do poder calorífico com o aumento da proporção de lodo, assim como a redução dos voláteis e do carbono fixo, além da diminuição da umidade de equilíbrio higroscópico, conforme já mencionado.

As características discutidas acima podem levar a pressuposição de que a adição de lodo de flotação nos briquetes de resíduos de poda urbana proporcionou uma maior estabilidade dimensional, bem como maior densidade e consequentemente maior resistência favorecendo dessa maneira, as atividades de manuseio, transporte e uso final. No entanto, apesar de proporcionar melhorias em algumas propriedades, o lodo afetou negativamente no poder calorífico dos briquetes (Figura 3a), além de proporcionar o aumento da porcentagem de cinzas.

Figura 2: Valores observados e estimados de umidade de equilíbrio higroscópico (%), densidade (g/cm³), carga máxima de ruptura (kgf) e percentual de cinzas (%), materiais voláteis (%) e carbono fixo (%) em função do teor de lodo presente nos briquetes de resíduos de poda urbana.

Figura 3: Valores observados e estimados de poder calorífico superior (kcal/kg) e densidade energética (Mcal/m³) em função do teor de lodo presente nos briquetes de resíduos de poda urbana.

Rodrigues (2010) pesquisando a utilização de lodo biológico da indústria de papel e celulose e finos de madeira obteve resultados satisfatórios quanto ao potencial energético destes dois resíduos sólidos para a produção de briquetes. Vale ressaltar que, a pressão de compactação utilizada pela autora para produção dos briquetes foi de 1000 PSI, inferior a utilizada neste trabalho, e a compactação foi possível devido à presença de lignina residual no lodo biológico. Nesse trabalho, também foi observado que a mistura de lodo com finos de madeira, melhorou as características dos briquetes em relação à resistência à compressão, expansão linear, absorção de água e densidade aparente e por outro lado acarretou aumento no teor de cinzas e reduziu o poder calorífico, características semelhantes às encontradas no presente estudo.

Briquetes compostos por resíduos de poda urbana e papelão ondulado

Na Figura 4 e 5 são apresentadas as regressões para a análise dos parâmetros determinados em função das porcentagens de papelão ondulado e resíduos de poda urbana presente nos briquetes. Observa-se na Figura 4a que houve uma pequena redução da umidade de equilíbrio higroscópico dos briquetes com o aumento da proporção de papelão na composição, tendo os valores médios compreendidos entre 7,9 a 10,8%. Isso se deve, provavelmente, a composição menos hidrofílica do papelão em relação a madeira, e também pela sua baixa densidade, o que contribui para uma melhor compactação e consequente redução da área superficial dos briquetes.

Para a densidade aparente e a carga máxima de ruptura se verificou um aumento destas propriedades com a adição do resíduo de papelão (Figura 4b e 5a), podendo ser explicado devido a menor densidade em relação ao resíduo de poda. A razão entre a densidade aparente do briquete e a densidade a granel dos resíduos pode ser dita como razão de compactação, e quanto maior essa razão, maior a redução do volume do briquete e maior o ganho em densidade (RODRIGUES, 2010).

Figura 4: Valores observados e estimados de umidade de equilíbrio higroscópico (%) e densidade (g/cm^3), em função do teor de papelão ondulado presente nos briquetes de resíduos de poda urbana.

Figura 5: Valores observados e estimados de carga máxima de ruptura (kgf), teor de cinzas (%), materiais voláteis (%), carbono fixo (%), poder calorífico superior (kcal/kg) e densidade energética (Mcal/m³) em função do teor de papelão ondulado presente nos briquetes de resíduos de poda urbana.

Paula (2010) produziu briquetes com resíduos agrícolas e de madeira obtendo correlação positiva entre a densidade aparente e a resistência à compressão para todos os tratamentos. Para os briquetes produzidos com resíduos de madeira, a densidade média foi de 0,903 g.cm⁻³ e para os agrícolas como casca de arroz e pergaminho de café, 1,077 e 0,946 g.cm⁻³, respectivamente. Os valores determinados por essa autora foram inferiores aos obtidos para os briquetes compostos por papelão e resíduos de poda, que variaram entre 1,10 e 1,28 g.cm⁻³.

Foi verificado também que, o teor de cinzas reduziu com o aumento da proporção de papelão na composição dos briquetes (figura 5b). Fato esse esperado, devido o papelão ser mais homogêneo que os

resíduos de poda e possuir menos inorgânicos na composição. No entanto, não se observou um aumento do poder calorífico (Figura 5e), devido ao maior conteúdo energético do resíduo de poda em relação ao papelão. Na Figura 5c observa-se que a porcentagem de materiais voláteis aumentou em função do aumento do papelão na composição dos briquetes, o que pode favorecer a ignição, processo inicial de combustão.

Embora a adição de papelão acarrete uma redução na quantidade de energia disponível no briquete (Figura 5f), a redução no teor de cinzas e o aumento do teor de voláteis devem ser considerados também. Assim a utilização de misturas de materiais para produção industrial de briquetes devem ser otimizadas, visando um adequado fornecimento de energia e uma baixa produção de cinzas, que está atrelada ao bom funcionamento e aumento de vida útil dos equipamentos.

Briquetes compostos por resíduos de poda urbana e embalagens cartonadas

Na Figura 6 e 7 são apresentadas as regressões para a análise dos parâmetros determinados em função das porcentagens de embalagens cartonadas e resíduos de poda urbana presente nos briquetes. Na Figura 6a nota-se a redução da umidade de equilíbrio higroscópico com a adição de embalagens cartonadas na composição dos briquetes, tendo os valores médios compreendidos entre 5,7 e 11,7%, umidade favorável para o uso como fonte de energia.

Figura 6: Valores observados e estimados de densidade (g/cm^3), carga máxima de ruptura (kgf), umidade de equilíbrio higroscópico (%) e percentual de cinzas (%), materiais voláteis (%) e carbono fixo (%) em função do teor de embalagens cartonadas presente nos briquetes de resíduos de poda urbana.

Figura 7: Valores observados e estimados de poder calorífico superior (kcal/kg) e densidade energética (Mcal/m^3) em função do teor de embalagens cartonadas presente nos briquetes de resíduos de poda urbana.

A densidade aparente e a carga máxima de ruptura (Figuras 6 b-c) aumentaram com o aumento da adição de embalagens na composição dos briquetes. Os briquetes compostos apenas por resíduos de poda urbana apresentaram menor densidade e por consequência menor resistência à compressão do que aqueles com misturas de embalagens. Provavelmente, devido à baixa densidade a granel dos resíduos de embalagens e a presença de polietileno na sua composição, que pode ter contribuído para uma melhor compactação das partículas. É importante ressaltar que, embora os briquetes produzidos com maiores proporções de resíduos de poda tenham apresentado menores densidades, esses foram superiores a $1,0 \text{ g}/\text{cm}^3$, considerado satisfatório para uso industrial, principalmente no abastecimento de fornalhas.

Para os parâmetros obtidos a partir da análise química imediata, apresentada nas Figuras 6d, 6e e 6f, observa-se que a adição de embalagens cartonadas na composição dos briquetes proporcionou um aumento acentuado do teor de materiais voláteis e decréscimo do carbono fixo, devido, principalmente, a presença do polietileno. Embora o teor de cinzas tenha apresentado uma tendência ao aumento com a adição do resíduo de embalagem cartonada, esse não foi muito acentuado, tendo as médias compreendidas entre 4,15 e 5,23%.

O teor de cinzas obtido por Paula (2004) para briquetes produzidos com casca de arroz foi em média de 16,6%, valor acima do encontrado para os resíduos de poda e embalagens, indicando dessa forma que é

possível a utilização de materiais com altos teores de cinzas, embora sejam necessárias considerações ambientais e de processo.

Com relação ao poder calorífico (Figura 7a) nota-se um ligeiro decréscimo à medida que aumenta a porcentagem de embalagens cartonadas. Apesar desta redução, de forma geral, as médias ficaram compreendidas entre 5060 e 4038 kcal.kg⁻¹, valores compatíveis com resíduos de biomassa aptos para o uso como fonte de energia. Furtado et al. (2010), ressaltaram que o aumento da compactação dos briquetes, pode ocasionar redução do poder calorífico devido à perda de voláteis, que é consequência da temperatura do processo aliado ao aumento da pressão, causado escape desses compostos para o meio.

Gonçalves (2009) estudando a viabilidade técnica da produção de briquetes de madeira de *E. grandis* em composição com rejeitos de resíduos sólidos urbanos (RRSU) verificou que a adição de 5 e 10% de RRSU a mistura não proporcionou uma adequada compactação, tendo melhor desempenho aqueles produzidos com 20% de RRSU. Com relação ao poder calorífico e ao teor de cinzas, da mesma forma que para os briquetes compostos de resíduos de poda e embalagens cartonadas, houve a diminuição de ambos com o aumento da porcentagem de RRSU nos briquetes de eucalipto. Além disso, os briquetes que apresentaram maior combustibilidade e menor teor de cinzas foram àqueles provenientes das misturas com 5, 10 e 15% de RRSU.

CONCLUSÕES

De acordo com os objetivos estabelecidos nesse trabalho conclui-se que: foi tecnicamente possível a produção, em escala laboratorial, de briquetes compostos por resíduos de poda urbana agregando lodo de flotação, papelão ondulado ou embalagens cartonadas, sendo obtidos briquetes bem estruturados e com compactação adequada.

A adição de lodo de flotação deve ser feita até valores inferiores a 25% devido ao alto conteúdo de inorgânicos desse material que proporciona alto teor de cinzas após combustão. A adição do lodo nos briquetes aumenta a densidade aparente e a resistência à compressão, e diminui a umidade de equilíbrio higroscópico.

A adição de resíduos de papelão ondulado na composição dos briquetes proporciona um aumento na densidade aparente e a resistência à compressão. A umidade de equilíbrio higroscópico é inversamente proporcional ao aumento da proporção de papelão contido nos briquetes. A adição de embalagens cartonadas na composição contribui positivamente para o aumento da densidade e da resistência dos briquetes, porém reduz o poder calorífico e o teor de carbono fixo.

De modo geral, para a produção de briquetes podem ser utilizadas diferentes fontes de biomassa, seja agroflorestal ou industrial, abrangendo desde resíduos de madeira, papéis, lodo de tratamento de águas, até rejeitos sólidos urbanos. Assim, a caracterização inicial dos resíduos, bem como a produção dos briquetes em escala laboratorial poderá nortear a forma como esses materiais deverão ser compactados e principalmente, estabelecer os limites de utilização tendo em vista a maximização de obtenção de energia.

Logo, as misturas de resíduos não lignocelulósicos as biomassas convencionais para a composição da

matéria prima para a produção de briquetes é uma tendência, principalmente devido ao aumento da demanda de resíduos madeireiros em diversos setores e ao mesmo tempo a oferta de outros tipos rejeitos. Assim, o desenvolvimento de pesquisas que visem a caracterização e a produção de briquetes compostos por diferentes matérias-primas são relevantes no cenário da busca por fontes renováveis e alternativas de energia.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6922:** Carvão vegetal: Ensaios físicos determinação da massa específica (densidade a granel). Rio de Janeiro: ABNT, 1981.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7993:** Determinação da umidade da madeira por secagem em estufa quando reduzida à serragem. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8112:** Análise química imediata do carvão vegetal. Rio de Janeiro: ABNT, 1981.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8633:** Carvão vegetal: Determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004:** Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. **Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos**. São Carlos: USP, 1999.

BRASIL. **Lei n.12.305 de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: DOU, 2010.

CAIRES, R. R.. **Briquetagem: Biomassa**. Campinas: EBAH, 2010.

CEMPRE. Compromisso Empresarial para Reciclagem. **Papel ondulado**. São Paulo: CEMPRE, 2011.

CENBIO. Centro Nacional de Referência em Biomassa. **3º Relatório parcial do projeto Fortalecimento Institucional do Centro nacional de Referência em Biomassa**. CENBIO, 2007.

CERQUEIRA, M. H.. **Placas e telhas produzidas a partir da reciclagem do polietileno/alumínio presentes nas embalagens Tetra Pak**. AFCAL, 2000.

CORTEZ, C. L.; COELHO, S. T.; GRISOLI, R.; GRAVIOLI F.. **Compostagem de resíduos de poda urbana**. CENBIO, 2008.

FURTADO, T. S.; VALIN, M.; BRAND, M. S.; BELLOTE, A. F. J.. Variáveis do processo de briquetagem e qualidade dos briquetes de biomassa florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.30, n.62, p.101-106, 2010.

GENTIL, L. V. B.. **Tecnologia e Economia do Briquete de Madeira**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

GONÇALVES, J. E.. 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.

KALYAN, K.; MOREY, R. V.. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass & Bioenergy**, Oxford, v.33, n.3, p.337-359, 2009.

KARAMAZOVI. **Processo de briquetagem**. 2011.

PAULA, L. E. R.. **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos**. Dissertação (Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

REALI, M. A. P.. Processos físico-químicos associados a processos biológicos para o tratamento de esgoto sanitário. In: SIMPÓSIO DA ENGENHARIA AMBIENTAL, 1. **Anais**. São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo, 2004. p.14-37.

RODRIGUES, V. A. J.. **Valorização energética de lodo biológico da indústria de polpa celulósica através da briquetagem**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

VITAL, B. R.. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa: Sociedade de Investigações Florestais, 1984.

A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detém os direitos materiais desta publicação. Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas sob coordenação da **Sustenere Publishing**, da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.